

附件 7

《生态保护红线生态功能评价技术指南 (征求意见稿)》编制说明

《生态保护红线生态功能评价技术指南》编制组

二〇二〇年五月

目 录

1. 项目背景.....	1
1.1 任务来源	1
1.2 工作过程	2
2. 标准制订的必要性分析.....	3
2.1 落实《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》的要求.....	3
2.2 加强生态保护红线监管的重要手段.....	3
2.3 完善国家相关标准技术体系的要求.....	4
3. 标准制订的技术路线.....	4
3.1 制订目的	4
3.2 制订原则	4
3.3 采用方法	5
3.4 技术路线	5
4. 国内外相关标准分析.....	6
4.1 生态功能的概念与内涵	6
4.2 生态功能评价方法	7
4.3 生态功能评价尺度	19
4.4 经验与展望	22
5. 主要技术内容及说明.....	23
5.1 标准结构框架	23
5.2 适用范围	23
5.3 规范性引用文件	24
5.4 术语和定义	24
5.5 评价单元	26
5.6 评价周期	27
5.7 评价工作程序	27
5.8 生态功能评价	29
5.9 结果分析与报告编制	44
6. 对实施本标准的建议.....	45
7. 主要参考文献.....	47

《生态保护红线生态功能评价技术指南（征求意见稿）》

编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

2017年2月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》（以下简称《若干意见》）中，提出要对生态保护红线开展定期评价，从生态系统格局、质量和功能等方面，建立生态保护红线生态功能评价指标体系和方法。定期组织开展评价，及时掌握全国、重点区域、县域生态保护红线生态功能状况及动态变化，评价结果作为优化生态保护红线布局、安排县域生态保护补偿资金和实行领导干部生态环境损害责任追究的依据，并向社会公布。

《落实〈关于划定并严守生态保护红线的若干意见〉工作方案》（环办生态〔2017〕49号）进一步对“建立生态保护红线评价机制”作出具体部署，要求“提出生态保护红线生态功能评价指标体系和方法，开展评价试点，制定发布生态保护红线生态功能评价技术指南，评价生态保护红线生态功能状况及动态变化”，并提出按照“2018年启动评价试点，2019年发布生态保护红线生态功能评价技术指南，2020年组织开展评价工作”的时间节点推进工作进程。

按照《若干意见》要求，各省（区、市）按照《生态保护红线划定指南》，划定了生态保护红线的范围，其中涉及到生态功能重要性的评价。此外，2002年原国家环境保护总局发布的《生态功能区划技术暂行规程》、2011年发布的《全国主体功能区规划》、2015年原环境保护部发布的《生态环境状况评估规范》（HJ 192-2015）、2016年原国家林业局发布的《自然资源（森林）资产评估技术规范》（LY/T 2735-2016）中均涉及到生态功能评价。然而，在实际应用过程中生态功能评价仍然存在一些问题，如评价的指标口径不一，评价的方法所适用的区域和规模范围不同，评价采用的模型过于复杂，评价的结论差异

较大等，还有待进一步完善。生态保护红线生态功能评价是生态保护红线监管的基础，因此，需要充分吸收已有生态功能评价方法的优点，根据生态保护红线评价的周期、目的等，进一步建立科学合理、操作可行的评价指标体系和技术方法。2018年，为了进一步指导全国各地生态保护红线划定和严守各项工作，统一规范生态保护红线生态功能评价的技术方法与技术流程，生态环境部自然生态保护司拟以标准制修订绿色通道的方式制订《生态保护红线生态功能评价技术指南》。根据生态保护红线系列标准的工作部署，本标准由中国环境科学研究院牵头，生态环境部南京环境科学研究所、生态环境部环境规划院、生态环境部卫星环境应用中心等作为协作单位共同参与完成。

1.2 工作过程

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，2018年初，在原环境保护部生态保护红线部际协调领导小组办公室（简称“红线办”）领导下，组织开展了生态保护红线生态功能评价的相关基础研究，并进行了典型区域的实地调研，以及领域内的多个专家咨询。

2018年10月，完成标准初稿和开题报告的编制。

2018年11月19日，生态环境部自然生态保护司在北京组织召开了《生态保护红线生态功能评价技术指南》开题论证会，专家组一致同意通过开题论证，同时提出了如下主要意见：

（1）要考虑是以评价主导功能为主，还是评价所有生态功能，评价所有功能时要有个权重的加和，主观性太强，会很大程度上影响评价结果。

（2）关于评价基准年，侧重基数评价还是动态变化评价，是否考虑海域生态红线。

（3）如何平衡单项功能评价指标的科学性和可操作性。

（4）补充和细化国内外的研究进展。

标准编制组根据专家意见对本标准进一步修改完善。修改的内容包括以下方面：

（1）以单项主导功能评价为基础，同时增加综合评价，尽量减少主观性。

(2) 评价暂时不考虑海洋生态红线，目前全国各地生态保护红线只是初步划定，尚未开展生态功能评价，以初次评价为基准年，原则上每 5 年开展一次评价，着重分析生态功能变化的区域和强度。

(3) 既保证对《生态保护红线划定指南》相关评价方法的沿用，又考虑较为常用、可操作的评价模型以及相关价值转化法。

(4) 补充完善了国内外相关研究进展内容，从生态系统类型和评价方法等方面进行了细化。

2019 年 5 月，组织召开专家咨询会，并进一步修改完善。

2019 年 12 月 27 日，生态司组织召开指南征求意见稿的技术审查会，根据专家意见进行了修改完善。同时，按照红线办的统一部署对生态保护红线的系列标准规范进行相互衔接和统一。

2020 年 5 月，进一步修改完善，形成目前的征求意见稿。

2 标准制订的必要性分析

2.1 落实《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》的要求

《若干意见》提出开展定期评价，从生态系统格局、质量和功能等方面，明确水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护等生态功能重要区域，以及水土流失、土地沙化、石漠化等生态环境敏感脆弱区域的评价方法，并建立生态保护红线生态功能评价指标体系和方法，定期组织开展评价，及时掌握全国、重点区域、县域生态保护红线生态功能状况及动态变化。编制《生态保护红线生态功能评价技术指南》，是《若干意见》的明确要求和生态环境部生态保护红线监管工作的具体部署，为开展生态保护红线生态功能评价提供依据和技术支撑，有助于建立生态保护红线制度，优化和保护国土生态空间，完善国家生态安全格局。

2.2 加强生态保护红线监管的重要手段

根据《若干意见》要求，2018 年年底将完成全国生态保护红线划定，目

前京津冀、长江经济带和宁夏 15 省生态保护红线划定方案已经国务院批准并由省级政府发布，其他 16 省份也已形成划定方案，机构改革后，根据国务院最新要求，自然资源部会同生态环境部正在指导各地对划定结果进行评估优化。生态保护红线工作划定是基础，严守是关键。生态保护红线生态功能评价标准制定是生态保护红线监管的紧迫需求，是严守生态保护红线的重要评价依据与技术支撑，是落实生态文明体制改革、加强生态保护红线监管的重要手段。

2.3 完善国家相关标准技术体系的要求

生态保护红线是我国在生态保护领域的一项工作创新，并逐步上升为了国家战略，生态文明体制改革的一项重要制度。我国目前尚未出台关于生态保护红线的相关标准规范，制定生态保护红线生态功能评价技术指南，对于填补该领域的技术标准规范，按照“生态功能不降低”的要求，从源头上构筑防止逾越红线、破坏生态环境的制度屏障，切实严守生态保护红线具有重要作用，同时也是国家环境保护标准体系建设的客观要求。

3 标准制订的技术路线

3.1 制订目的

编制本指南，为全国生态保护红线生态功能评价提供较为通用的工作流程，以及评价模型和技术方法，以指导和规范全国生态保护红线生态功能评价工作，维护生态保护红线生态功能，保障国家生态安全。

3.2 制订原则

科学系统性。科学客观地反映生态保护红线的生态功能状况，同时，综合考虑自然生态系统的整体性，系统反映生态保护红线内的山水林湖草生态系统整体状况。

分类分区。综合考虑生态保护红线所处的自然地理单元特征、生态保护红

线内部的生态系统类型及格局，根据生态保护红线的生态功能类型及其主导生态功能的差异，选取模型方法，分别开展主导生态功能评价和生态功能综合评价。

定量评价。通过各类模型，计算生态功能的物质量，并转化为价值量，用以定量描述生态保护红线内各类生态功能状况及其综合情况。

可操作性。计算方法简明快捷；所需参数简单、易获取，可操作性强。

3.3 采用方法

文献查阅。通过广泛的文献和资料查询，对国内外生态功能评价方法及其标准制定的现状及问题进行总结，把握评价的指标、模型和数据来源，明确生态保护红线内生态功能评价需要改进之处。

专家咨询。联系生态、地理信息系统、遥感、地理学等领域的专家学者，环保、农业、林业、气象等部门的管理人员以及自然保护区工作人员，听取其意见，确定评价方法的科学性和可行性。组织多学科、多部门专家的研讨会，对标准草案进行咨询论证，在充分吸收专家学者及技术工作人员意见的基础上，不断完善标准的文本，使之服务于我国生态保护红线监管评价工作。

实地调研。开展实地走访调查，选取一些具有地域代表性、主体功能不同、规模大小不同的红线划定区域进行实地调研以及遥感数据分析，探索试验评价标准的科学性和可操作性，对评价标准进行补充完善。

3.4 技术路线

本标准分四部分开展生态保护红线生态功能评价。首先，开展前期准备，搜集处理数据，并选取生态功能评价模型；然后，采用模型和综合指数法计算生态保护红线栅格尺度的水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护等各类生态功能评价的综合指数（即水源涵养量、水土保持量、防风固沙量、生物多样性维护服务能力指数等），在主导生态功能区尺度，计算单项生态功能的区域价值总和；第三，进行县域生态功能综合评价并对评价结果进行分级；最后，编制生态保护红线生态功能评价报告。具体技术路线如下：

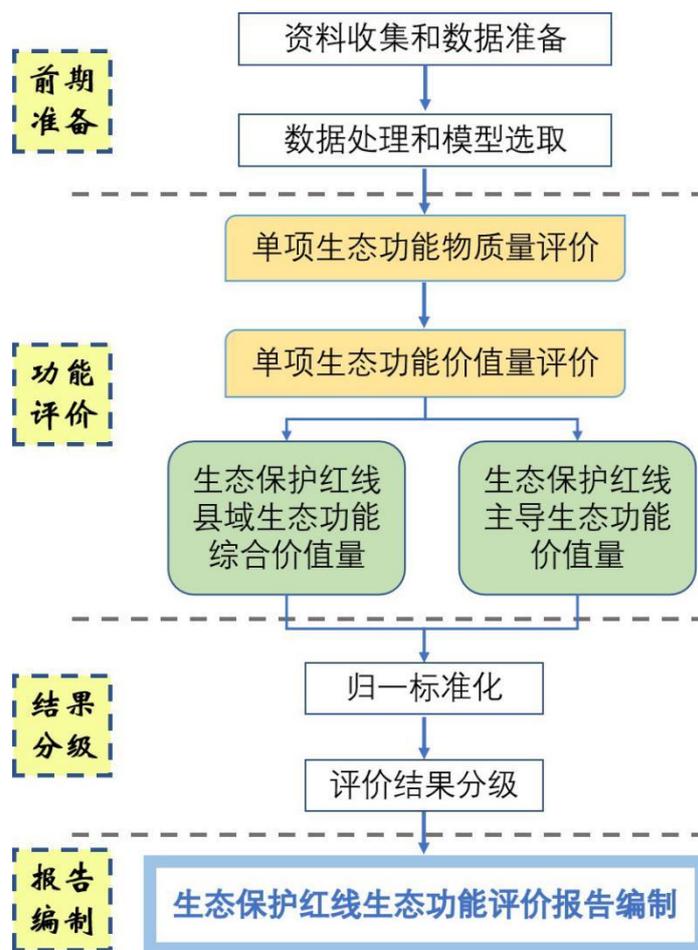


图 3-1 技术路线图

4 国内外相关标准分析

4.1 生态功能的概念与内涵

对于生态功能，在生态学的定义并不统一。1970 年，《Man's Impact on the Global Environment》中首次使用了生态系统服务一词，列出了自然生态系统对人类的环境服务功能，包括害虫控制、昆虫传粉、渔业、土壤形成、水土保持、气候调节、洪水控制、物质循环与大气组成等方面。1992 年，DeGroot 提出生态系统功能即自然的过程和结构直接或间接地提供人类所需产品和服务的能力，这个定义反映生态系统功能是生态过程和生态系统结构作用的结果。

有关生态系统服务的定义也出现了很多，其中最具代表性的是 1997 年 Daily 提出的，即生态系统服务是指自然生态系统及其物种所提供的能够满足和

维持人类生活所需的条件和过程。同年，Constanza 在发表的题为《全球生态系统服务和自然资本的价值》一文中认为生态系统产品和服务是人类直接或者间接从自然生态系统中获得的益处，生态系统产品和服务统称为生态系统服务，并将生态系统服务具体分为 17 种类型，每一种类型又对应着不同的生态系统功能。基于 Daily, Costanza 等人的基础，千年生态系统评估的报告对于生态系统服务的定义进行补充和归纳，认为生态系统服务是人们从自然系统获得的益处，共分为四大类，即支持服务、调节服务、文化服务和供给服务。

一般认为，生态系统功能和生态系统服务功能既有联系又有区别。生态系统功能是生态系统本身所具有的内在属性，不依附于人类存在，而生态系统服务功能强调的是以人类从生态系统中获取利益为基础，体现的是对人类需求的满足情况。生态系统功能是生态系统为人类提供生态服务的过程和基础，没有生态系统功能，生态系统就不可能为人类提供各种生态系统服务功能。可以说生态系统服务功能的每一种形式都必须有生态系统功能作为支撑。

4.2 生态功能评价方法

随着全球范围内自然资源 and 良好生态环境稀缺性的提升，人们逐渐认识到，自然资源和生态环境不仅是人类生存和发展的基本条件，也是人类创造商品和服务的基础。从 20 世纪 90 年代开始，国内外学者陆续对生态功能进行了研究。初期，学者将生态系统服务功能分为：调节功能、承载功能、生产功能、信息功能，或者将其分为 3 类：为经济系统输入原材料，维持生命系统、提供舒适性服务，以及分解、转移和容纳经济活动的副产品，也有学者将生态系统服务功能分为：生活与生产物质的提供、生命支持系统的维持和精神生活的享受。Constanza 等（1997）将全球生物圈根据海洋、森林、草原、湖泊、沙漠、农田、城市等分为 16 个生态系统类型，并将生态系统服务功能分为 17 个类型。在此基础上，联合国千年评估计划（Millennium Assessment, MA）将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化 4 种类别，25 个子类。

目前，生态功能的评估方法主要有四类，分别是物质量、价值量、能值和指标体系评估法。

4.2.1 物质生态功能评估

物质质量的评估方法适合分析生态功能的时间变化特征，或对比某一项生态功能在不同生态系统中的大小和重要性，是区域生态系统服务价值评估和健康状况评价研究的重要手段。主要可以归纳为以下 3 种：一是收集直接观测的数据，如草地、林地的面积等；二是进行指标换算，使用单一或组合的指标分析生态状况，如在评价森林草地生态系统的功能变化时，通常会选择净初级生产力（NPP）和归一化植被指数（NDVI）作为参考指标；三是采用过程模型模拟结果作为生态系统服务评估的基础，例如用模型计算区域的防风固沙量，以此作为生态系统防风固沙功能的评价标准。

4.2.2 价值量生态功能评估

价值量评估法以货币的形式呈现出生态系统服务价值，使人们更直观清晰地认识到生态系统除了直接的供给功能以外，潜在的其他服务功能也是十分宝贵的（Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2012; Xie *et al.*, 2017; Li & Fang, 2014）。价值量评价更多地是反映生态系统服务的总体稀缺性，其评估方法与市场波动和人们对生态产品的支付意愿有关，不同价值量评估方法的侧重点和关键点也不一致，国际上也没有公认的计算方法，计算结果可能会出现较大偏差。

目前，我国大多数生态系统服务功能价值评估工作还停留在模仿国外研究的阶段，尤其是采用基于生态学的类型研究范式，即采用样地测定、类型累加和尺度外推的三段研究范式。这种研究范式在不同类型生态系统服务功能的确定和单位价值量的核算等方面有着不可替代的优势，但加总过程中的不确定性、尺度转换的误差以及生态服务功能和价值构成的地域性差异，构成该范式应用和推广的潜在制约因素。因此，要提高计算的精度，使计算结果更加符合实际情况就必须对某些参数进行校正（刘慧明等，2020）。郭中伟等（1998）根据不同类型植被、土壤和坡度的组合将兴山县划分为 90 种类型共 6184 块地块，对不同植被、土壤和坡度类型下，生态系统服务功能的价值进行了测算，该方

法在一定程度上校正了生态系统服务功能的地域差异性，提高了计算精度。谢高地等(2001)也考虑到了生态系统地域分布条件对生态系统价值大小的影响，基于 Costanza 等提出的方法，在对青藏高原天然草地生态系统服务价值根据其生物量订正的基础上，逐项估算了各种草地类型的各项生态服务价值。李双成等(2002)提出，目前不同类型生态功能评估工作应考虑四个方面对功能价值产生的影响（环境与生态系统资源的地域空间差异性、生态服务功能价值的空间流转和异地实现、生态系统资源和生态服务功能稀缺性与需求性的区域差异、社会经济发展水平的区域差异性），提出有必要建立一种基于空间格局的环境与生态系统功能价值评估的区域范式，首先对评估区域进行生态地域划分，并以此作为控制性框架指导具体工作；然后分别用生态功能分区、域外价值评估、生态功能稀有性评估、生态功能需求性评估分别校正以上四个方面存在的问题，最终划定评估区域环境与生态系统功能空间格局。区域范式评估生态功能的方法在一定程度上校正了类型评价范式中只依据生态系统生物属性的做法，将生物属性作为基础，同时重视生态服务功能及其价值量实现过程中的社会经济因素，使得环境与生态系统资本价值的效用性和稀缺性得到充分体现。

受 Costanza 思维影响，近年来我国对生态功能价值量评估的认识进入了一个活跃时期。从模仿研究、参数修正到估价方法与对象研究各种研究相继涌现，主要可分为 3 种方向：

1、生态功能估价方法研究

目前比较成熟的估价方法有：条件价值法、影子工程法、直接市场法、旅游成本法等，用于静态描述生态功能价值情况（表 4-1）。遥感技术的应用为动态实时测量生态功能价值变化，由点及面系统评估生态功能价值提供了技术基础。

表 4-1 生态系统功能评价方法

功能类别	核算项目	物质质量指标	物质质量核算方法	价值量指标	价值核算方法
产品提供	农业产品	农业产品产量	统计调查	农业产品产值	市场价值法
	林业产品	林业产品产量		林业产品产值	
	畜牧业产品	畜牧业产品产量		畜牧业产品产值	
	渔业产品	渔业产品产量		渔业产品产值	

功能类别	核算项目	物质量指标	物质量核算方法	价值量指标	价值核算方法
	生态能源	生态能源总量		生态能源产值	
	水资源	用水量		用水产值	
调节功能	水源涵养	水源涵养量	水平衡法	水源涵养价值	影子工程法(水利工程建设成本) 市场价值法(市场水价)
	土壤保持	土壤保持量	修正通用土壤流失方程	减少淤泥淤积价值	替代成本法
				降低面源污染价值	
	洪水调蓄	湖泊: 可调蓄水量	水平衡法	洪水调蓄价值	影子工程法(水利工程建设成本)
		水库: 防洪库容	监测数据		
		沼泽: 滞水量			
	防风固沙	固沙量	修正风力侵蚀 REWQ 模型	固沙价值	恢复成本法(固沙成本法)
	固碳释氧	固定二氧化碳量	质量平衡法	年固定二氧化碳量价值	代替成本法(造林成本、工业减排成本) 市场价值法(碳市场价格)
		氧气生成量	质量平衡法	氧气生成价值	代替成本法(造林成本) 市场价值法(工业制氧价格)
	大气净化	净化二氧化硫量	植物净化模型	净化二氧化硫价值	代替成本法(二氧化硫治理成本)
		净化氮氧化物量		净化氮氧化物价值	代替成本法(氮氧化物治理成本)
		净化粉尘量		净化粉尘价值	代替成本法(粉尘治理成本)
	水质净化	净化 COD 量	植物净化模型	净化 COD 价值	代替成本法(COD 治理成本)
		净化总氮量		净化总氮价值	代替成本法(总氮治理成本)
净化总磷量		净化总磷价值		代替成本法(总磷治理成本)	
气候调节	植物蒸腾消耗能量	蒸散模型	植物蒸腾消耗价	代替成本法(人工	

功能类别	核算项目	物质量指标	物质量核算方法	价值量指标	价值核算方法
				值	降湿、增湿成本)
		水面蒸发消耗能量		水面蒸发消耗价值	
	病虫害控制	病虫害发生面积	类比法	病虫害控制价值	防护费用法(人工防治成本)
文化功能	自然景观	游客总人数	统计调查	生态旅游价值	旅行费法 条件价值法

(1) 直接市场法

直接市场法包括费用支出法、市场价值法、机会成本法、恢复和防护费用法、影子工程法、人力资本法等，用于直接或间接市场量化的生态功能或产品价值估算，主要包括以下几个方面的研究内容：①生态系统产品与服务可直接在市场中以价格的形式体现。如农产品、工业原材料、矿产资源、药材等。②生态系统的产品与服务以间接市场价格的形式体现出来，如森林涵养水源、水土保持固碳释氧的功能可以通过影子工程与替代工程方式，通过市场替代估算各项生态功能的价值。③环境污染损失估算，由于环境污染与生态破坏造成的人们的福利变化与健康影响，通过计算人们福利的变化从而间接反应环境损失价值。

(2) 替代市场法

替代市场法包括旅行费用法和享乐价格法。其中旅行费用法利用游憩的费用资料求出消费者剩余，并以此估算生态功能价值，基于以下假设：根据游客的来源和消费情况，推出旅游需求曲线，从而可以计算出消费者剩余作为生态功能的价值。享乐价值法主要应用于房地产开发周围生态环境价值的估算。

(3) 条件价值法

条件价值法在详细介绍研究对象概况（包括现状、存在的问题、提供的服务与商品等）的基础上，假想形成一个市场（成立一项计划或基金）用以恢复或提高该公共商品或服务的功能，征询研究对象附近居民的支付意愿或者允许目前环境恶化与生态破坏的趋势继续存在，征询研究对象附近居民接受意愿，累积后获得该公共商品或服务总体价值的评估方法。条件价值法对生态功能估

价结果受调查方式、问卷设计与调查对象的年龄、学历、收入、户籍和居住的地理区域等因素影响，其结果存在不确定性。但作为评估难以市场化的生态功能类型，条件价值法是一种较好的定量估算方法。

（4）技术与估价方法的综合应用

随着遥感与地理信息系统技术的引入，生态功能价值评估进入了一个全新的阶段，遥感技术克服了获取数据难的问题，避免出现“以点代面”的情况，有利于进行大尺度宏观生态系统的评估与动态监测。学者对生态系统遥感观测、遥感测量生态参数的选取、遥感评估模型的建立、模型各生态参数的遥感测量方法等方面开展研究。比如潘耀忠等（2004）利用 NOAA/AVHRR 数据对中国陆地生态系统生态系统服务价值进行遥感测量，并绘制了中国陆地生态系统生态系统服务价值空间分布图，估计结果为中国陆地生态功能价值为 64441.77 亿元。何浩（2005）等利用遥感技术计算了中国陆地生态系统 2000 年生态功能价值为 9.17×10^{12} 元，总体空间分布由东向西递减，由中部向东北和南部递增。

2、生态功能价值估算

主要是利用 Costanza 生态参数、市场价值法、影子工程法、碳税法等方法针对某一区域生态功能价值进行估算。例如，2000 年陈仲新参考了 Costanza 等的参数，以 1994 年为基准估算了中国生态功能的总价值为 56098.46 亿元/a，其中陆地生态系统效益为 56098.46 亿元/a；海洋生态系统效益为 21736.02 亿元/a，是 1994 年中国 GDP 的 1.73 倍。类似的，欧阳志云等以贵州省（2013）和青海省（2019）为对象，董天等（2019）以鄂尔多斯市为对象，王莉雁等（2017）以阿尔山市为对象，白玛卓嘎等（2017）以甘孜藏族自治州为对象，分别核算了生态功能价值。

生态功能价值估算中，当量法应用最为广泛，其原理是基于单位面积生态功能价值流强度，在区分不同种类生态功能的基础上，基于可量化的标准构建不同类型生态系统各种服务功能的价值当量，然后结合生态系统的分布面积进行评估。当量因子法较为直观易用，数据需求少，特别适用于区域和全球尺度生态功能价值的评估。当量法的主要任务有如下四个：

一是确定标准当量。1 个标准单位生态功能价值当量因子（简称标准当量）

是指 1 hm² 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值，以此当量为参照并结合专家知识可以确定其他生态功能的当量因子，其作用在于可以表征和量化不同类型生态系统对生态服务功能的潜在贡献能力。在实际应用中，特别是在区域尺度上，完全消除人为因素的干扰以准确衡量农田生态系统自然条件下能够提供的粮食产量的经济价值存在较大难度。参考谢高地等的处理方法，将单位面积农田生态系统粮食生产的净利润作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量。农田生态系统的粮食产量价值主要依据稻谷、小麦和玉米三大粮食主产物计算。

二是确定生态功能的分类。采用千年生态系统评估（MA）的方法，将生态功能分为供给功能、调节功能、支持功能和文化功能 4 大类，并进一步细分为食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等 11 种服务功能。其中，水供给服务功能是指由各生态系统提供的、为居民生活、农业（灌溉）、工业过程等使用的水资源；水文调节功能是指生态系统截留、吸收和贮存降水，调节径流，调蓄洪水、降低旱涝灾害；净化环境功能是指植被和生物去除和降解多余养分和化合物，滞留灰尘、除污等，包括净化水质和空气等；维持养分循环功能是指对 N、P 等元素与养分的储存、内部循环、处理和获取。

三是确定单位面积生态系统服务功能价值的基础当量表。单位面积生态系统服务功能价值的基础当量是指不同类型生态系统单位面积上各类服务功能年均价值当量（以下简称基础当量）。基础当量体现了不同生态系统及其各类生态系统服务功能在全国范围内的年均价值量，也是合理构建表征生态系统服务价值区域空间差异和时间动态变化的动态当量表的前提和基础。

①对于生态系统供给功能中的原料生产服务，主要根据《中国统计年鉴》、《全国农产品成本收益资料汇编》和《中国林业统计年鉴》等统计资料提取和计算。

②将文献与资料中直接对应的生态系统服务功能价值研究结果（修正单位功能价值量为统一标准后得到的结果）进行平均计算，并计算与标准当量的比例，作为该类生态系统服务功能的基础当量，如森林、农田等部分生态系统服

务功能价值当量的确定。

③通过文献资料计算获取单位面积生态系统服务功能量和单位功能量的价值量，进而计算得到单位面积服务价值，再与标准当量价值比较，得到该类生态系统服务功能的基础当量，如森林、草地、湿地的气候调节服务功能价值当量因子的确定。

④如果生态系统二级分类中无直接对应文献资料的服务功能价值，参照一级分类的研究结果和生物量，根据二级分类各类型生态系统的生物量和面积进行加权计算，如部分森林、草地等生态服务功能价值当量的确定。

⑤如果生态系统一级分类中也缺少直接对应文献资料的服务功能价值，且不易根据现有文献资料推算其服务功能价值的，对于陆地生态系统，主要参照与森林生态系统生物量的比例关系进行推算；对于水域生态系统，如冰川的原材料供给、土壤保持、维持养分循环、维持生物多样性服务的价值当量因子主要采用专家经验确定。

⑥对最终计算结果进行整体评价，并对个别远远高出平均水平的指标进行重新厘定。

四是构建得到单位面积生态服务价值动态当量表。生态系统在不同区域、同一年内不同时间段的内部结构与外部形态是不断变化的，因而其所具有的生态服务功能及其价值量也是不断变化的。借鉴前期的初步研究，生态系统食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、生物多样性和美学景观功能与生物量在总体上呈正相关，水资源供给和水文调节与降水变化相关，而土壤保持与降水、地形坡度、土壤性质和植被盖度密切相关。基于上述认识，进一步分析确定 NPP（植被净初级生产力）、降水和土壤保持调节的时空动态因子，结合生态系统服务价值基础当量表，构建生态服务时空动态变化价值当量表。

3、生态功能的机理与驱动力分析

分析影响生态功能的驱动机制，如土地利用/覆盖变化引起的生态功能响应。比如喻建华等（2005）在 Costanza 的生态系统服务价值理论基础上，计算了 1994—2002 年江苏昆山市生态系统服务价值变化，其中，建设用地对耕地和水

域的占用引起昆山市生态系统服务价值下降，9年间生态系统服务价值总量下降8.9%，人均占有量下降了13.0%。

4.2.3 能值生态功能评估

20世纪80年代，国际生态学界提出能值理论和分析方法，开始用能值分析的理论来定量分析环境资源与经济活动的真实价值以及生态系统与人类社会、经济系统的复杂关系。能值评估法通过将生态经济系统流动或存储的不同的能量和物质转换成同一种能值——太阳能值，解决了不同类型能量之间无法进行核算的问题，同时也解决了能量流、物质流、价值流三者的综合与核算的难题，从而为生态经济系统的定量研究开拓了一条新途径（赵晟和李自珍，2004）。运用能值理论度量自然资本和生态系统服务功能，综合了传统经济学和生态学方法的优点。它以能值作为基本测度单位，将自然资本的价值纳入环境经济系统范畴来反映环境、资源的外部性及其对经济过程的贡献，衡量自然资本服务价值对经济过程的影响，成为目前生态资本和生态服务价值评价研究中广泛采用的方法之一（姚作芳等，2009）

能值分析的基本原理，就是将各种形式的能量换算成同一量纲的太阳能值，能量和能值相互转化的桥梁是太阳能值转换率。计算公式如下：

$$E_M = S_C \times E$$

式中， E_M 为能量所具有的能值（Sej（太阳能焦耳））； S_C 为太阳能值转换率（Sej/J）； E 为物质或产品所含能量（包括太阳光能量、雨水化学能量等）（J（焦耳））。

在此基础上，结合前人研究结果，采用Odum于2000年确定的新的全球能值基准（ $15.83 \times 10^{24} \text{Sej/a}$ ），对以往研究中各产品能值转换率进行基准变换，最终得到新的全球能值基准下生态系统供给—文化—承载的能量折算与能值转换标准。

在获取太阳能值的基础上，能值—货币价值可由能值/货币比率具体衡量。能值/货币比率是评价一个国家或地区经济发达程度的指标，可以衡量一个国家或地区的财富，表示单位货币能购买的财富数量。能值/货币比率（EDR）等于

生态经济复合系统的年能值总利用量与当年国内生产总值 GDP 的比值。其中，能值总利用量为外部输入的可更新自然资源流、本地可更新资源和产品、农业系统生产散失的资源 and 商品、经济系统集约使用的富集资源和产品、未经本地使用的直接出口不可更新资源和产品（以出口额代替）的能值流之和。最后计算能值—货币价值，其计算公式为：

$$V_E = E_M / EDR$$

式中， V_E 为每项的能值—货币价值， E_M 为每项的太阳能值， EDR 为能值/货币比率。由于能值核算已经将各种不同的产品统一转换为太阳能焦耳的量纲，能值/货币比率也按照当年汇率和美元计算。因此，产品的能值—货币价值能够进行其他国家或地区间的比较，无疑能为生态文明主要指标体系在国际上的对接提供新的思路。

4.2.4 生态功能评价指标体系

此前的研究中，美国海茵茨中心建立的美国国家生态功能评价指标体系中包含了六大类生态系统（农田、森林、淡水湿地、海岸海洋、草木灌木、城市郊区）的四大类指标（系统规模、物理和化学情况、生物组成、人类利用）共 93 个，以及国家核心指标 10 个。该指标体系中存在许多数据无法获得或者无法测量的指标，并且没有将众多的指标集成为一个或几个综合性指数，公众和决策者无法迅速从中了解到美国生态系统的整体评价，但是它能科学、客观、全面地反映美国生态系统状态，为后续政策制定提供了科学基础。

美国国家科学研究委员会的生态指标研究报告则更强调利用能反映生态过程和状态的指标，注重指标的理论基础，倾向于制定一套数量较少但有影响力的指标反映国家生态状况。该指标体系从生态系统范围和状态、生态资产、生态功能三大方面共选择了 13 个指标。从理论上讲，该指标体系可以很好地反映生态的状态和变化趋势，但是其科学性较强，限制了公众和决策者对该指标体系的参与程度。

2015 年我国发布的《生态环境状况评价技术规范（HJ 192—2015）》中利用一个综合指数（生态环境状况指数，EI）反映区域生态环境的整体状态，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 5 个分指数分别反映评价区内生物的丰贫、植被覆盖的高低、水的丰富程度、遭受的胁迫强度、承载的污染物压力，用环境限制指数对生态环境状况类型进行调级。此外，还专门为生态功能区建立了生态功能区功能状况指数（FEI），包括 3 个指标、5 个分指数和 12 个分指标，其中防风固沙、水土保持、水源涵养涉及到的植被覆盖指数和水源涵养指数来源于遥感数据。FEI 可定量指示生态功能区生态环境质量，然而该指标体系中权重的设定受主观影响因素较大，且指标较多，数据难以获取，限制了其客观性和通用性。

2017 年 5 月环境保护部和国家发改委发布了《生态保护红线划定指南》，划定技术流程的第一步涉及到用模型法评估生态系统服务功能。划定指南采用水量平衡方程来计算水源涵养量，该指标也可以通过综合蓄水能力法和降水储存法计算得到。水土保持量是潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值，一般采用修正通用水土流失方程（RUSLE）的水土保持服务模型进行计算。防风固沙量则相当于潜在风蚀量与实际风蚀量的差值，通常采用修正风蚀方程（RWEQ）计算得到。在生物多样性维护区，需要全面收集区域动植物多样性和环境资源数据，建立物种分布数据库。

《生态保护红线划定指南》中还提到了另一种相对简单的方法，即采用 NPP 定量指标评估法计算生态系统的水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护服务能力指数。NPP 定量指标法评价因子少、相关数据易获取，但是评价结果只能用于定性分析；模型法评价因子多、相关数据不易获取，但是评价结果为定量分析并且适用于极小区域评价。基于两种模型的特点，张紫萍等（2018）采用 NPP 定量指标法得出防风固沙功能评价数据，采用模型法得出的水源涵养、水土保持功能评价数据，综合评价了青海省生态服务功能。刘世梁等（2018）以鹤壁市为例，在市域尺度上比较了 NPP 定量指标法和模型法评价结果的差异，结果表明模型法得到的鹤壁市生态系统服务高评价区域与生态保护现状较好的区域更为一致，而 NPP 定量指标法的评价结果与保护现状并不一致。

表 4-2 生态功能评价指标体系汇总表

功能类型	指标类型	具体指标	文献来源 (参考文献编号)	
水源涵养	气候条件	年均降水量	65	
	植被	林地覆盖率、草地覆盖率、水域湿地覆盖率	20、66	
	土壤、土层厚度	土壤深度	65	
	土地利用	耕地和建设用地比例	20、66	
	人类活动	人口密度	7、66	
	特征指标	调节水量 (实物量: m^3/a , 水量平衡方程, 价值量: 元/a)		12、40、42、49、64
		净化水质 (元/a)		12、49
		涵养水源总价值 (冠层、枯枝落叶层、土壤层存水能力, 降雨储存)		2、21
		水源涵养指数 (土地利用类型)		20
		水源涵养服务能力指数 (NPP)		51、69
水源涵养量 (Invest 模型, 产水模型, 水量平衡)			11、29、65	
	水源涵养量 (水量平衡方程)		58、69	
水土保持	气候	平均年降水量、平均年径流量、降雨侵蚀力因子	23	
	土壤	土壤流失量、土壤质地、土壤可蚀性因子	23	
	地形	坡度	23	
	植被	林地覆盖率、草地覆盖率、水域湿地覆盖率	7、20	
	土地利用	耕地和建设用地比例		7、20、66
		大于 15° 坡耕地占耕地面积比例		7、66
		水土流失面积比例		65
	特征指标	固土 (实物量: t/a , 价值量: 元/a)		12、64、40、49
		保肥 (实物量: t/a , 价值量: 元/a)		2、12、40、42、49、64
		土壤保持总量 (修正通用水土流失方程)		2、21、42、58、69
		减少土地废弃价值		2、40、64
		减少泥沙淤积价值		40、42、64
		植被覆盖指数		20
水土保持服务能力指数 (NPP)			51、69	
	土壤保持量 (Invest 模型)		27、29、71	
防风固沙	气候	多年平均风速	7	
		大风日	66	

功能类型	指标类型	具体指标	文献来源 (参考文献编号)
	土壤	土地沙化面积占比	
	植被	林地覆盖率、草地覆盖率、水域湿地覆盖率	20、66
	土地利用	耕地和建设用地比例	20、66
		风蚀面积比例	7、66
	特征指标	植被覆盖指数	2、5
		防风固沙服务能力指数 (NPP)	4、6、14
生物多样性维护	气候	多年平均气温、多年平均降水量	7
	植被	林地覆盖率、草地覆盖率、水域湿地覆盖率、多年植被净初级生产力平均值	2、7
	土地利用	耕地和建设用地比例	2、16
	特征指标	物种保育 (元/a)	1、15
		生物丰度指数	2、5
		生物多样性指数 (NPP)	4、6、10、14
		生态系统景观破碎化程度	16

4.3 生态功能评价尺度

4.3.1 生态功能评价的空间尺度

原环境保护部于 2006 年发布《生态环境状况评价技术规范（试行）（HJ/T 192—2006）》，并于 2015 年发布修订版本《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的指标体系和计算方法，运用综合性指数衡量评估区域的生态环境状态，实现了不同区域及同一区域不同时间之间的比较，目前已经在我国大部分地区得到实际应用。

行政区尺度上，据此技术规范，李嘉力等（2018）用多源遥感数据评估了 2015 年广西省 40 个国家重点生态功能区内生态环境状况指数及其等级；钱贞兵等（2018）计算了安徽省 78 个县区的生态环境状况指数，统计分析出 5 个生态区 2011 到 2015 年的生态状况变化；王彦芳和裴宏伟（2018）基于防风固沙生态功能区的评价指标体系计算了 1980—2015 年间河北坝上四县生态环境功能状况指数。除了根据 2015 年发布的技术规范，县级尺度上也有学者采用模型

法评估生态环境状况。比如侯鹏等（2018）分别采用 NDVI 年均值、水源涵养量、土壤保持量法和人类扰动指数评估了 1990 到 2013 年间海南岛中部山区国家重点生态功能区 21 个县的陆表植被长势、水源涵养服务功能、水土保持服务功能和生物多样性保护服务功能,其中水源涵养量通过降水贮存量法估算得到,土壤保持量采用了修正的水土流失通用方程（RUSLE）估算得到。利用同样的方法,刘璐璐等（2018）评估了国家重点生态功能区在实施转移支付前（2000—2010 年）、后（2010—2015 年）生态系统服务的时空分布格局及其变化特征。

区域尺度上,许多学者对生态系统状况和生态保护成效进行了综合评估,比如张镜铨等（2015）基于 NPP 数据探讨了青藏高原自然保护区的保护成效;邵全琴等（2016）从生态系统宏观结构、质量和服务等方面探讨了生态保护与建设工程在青海三江源地区的实施成效。根据《生态环境状况评价技术规范(HJ 192—2015)》,张沛等（2017）评估了干旱区塔里木河干流 1990 到 2010 年间生态状况的变化,讨论了塔里木河流域治理工程治理的成效;满卫东等（2018）评估了三江平原生物多样性维护功能区 1990 到 2015 年间生态功能状况及其变化趋势。

在大尺度的动态观测方面,环保部和中科院于 2012 年联合开展“全国生态环境十年变化（2000—2010 年）遥感调查评估”,通过对生态系统格局、生态系统质量、生态系统服务功能、生态环境问题及变化,以及生态环境变化驱动因素等问题的研究,初步揭示了我国十年间的生态系统状况及其变化趋势。

其他国家中,英国基于联合国千年生态系统评估（MA）的框架,于 2009 年开展了英国生态系统评估（UK NEA）,综合考虑了物质量和价值量,明确了生态系统的现状,分析了近 60 年的变化趋势及其驱动力,并模拟了六种未来发展情景模式对人类福祉造成的影响。2008 年欧盟环境委员会启动“欧洲生物多样性信息系统”项目,生态系统评估是重要内容之一,因而欧洲许多国家也都基于 MA 的框架开展了国家生态系统状况评估工作。与欧洲国家不同,美国海茵茨中心于 2008 年出版的《美国国家生态系统状况报告:土地、水和生物资源》则更加偏重于物质量的生态调研,仅通过一套系统的指标体系描述 1950 年来各类生态系统的客观状态,而不对生态系统状况的好坏做出评价,也不提出任何

政策或行动建议。

4.3.2 基于生态系统类型的生态功能评价

不同类型的生态系统服务功能评价主要包括对森林生态系统、湿地生态系统、农田生态系统、水生态系统、草地生态系统、城市绿地和海洋生态系统服务功能评价的相关研究。其中，以森林和湿地生态系统服务功能评价的研究较多，森林生态系统生物多样性丰富，是陆地生态系统中面积最大的生态系统，对于维持生态平衡、改善生态环境具有不可替代的作用，其研究区域主要集中在南部多山丘陵地区和东北大小兴安岭山脉等地。湿地生态系统作为地球之肾，主要研究区域集中在滨海地区、湿地公园、洞庭湖、鄱阳湖和白洋淀等区域以及南方多河流湖泊地区和东部沿海地区，但总体研究区域较少且呈点状分散。闵庆文等（2004）对青海典型草地生态系统的价值进行评估，谢高地等（2003）对中国自然草地和青藏高原高寒草地的生态系统服务价值进行了研究与评估。侯元兆和王琦（1995）、余新晓（2005）等分别对我国森林生态系统价值进行了测算。韩维栋等（2000）估算中国现存自然分布的 13646 hm² 红树林的年总生态系统功能价值为 236531 万元。辛琨和肖笃宁（2002）以辽河三角洲盘锦地区湿地为例，得到该地区湿地生态系统的服务功能价值为 62.13 亿元，是该地区国民生产总值的 1.2 倍。肖寒等（2000）在地理信息系统的支持下，估算了海南岛现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量，得到了海南岛生态系统年土壤保持总价值为 7492.41 万元。欧阳志云等（2004）评价了水生态系统由调蓄洪水、疏通河道、水资源蓄积、土壤持留、净化环境、固定碳、提供生境、休闲娱乐 8 项功能总的价值为 6038.78×10⁸ 元，相当于供水、发电、航运、水产品生产等水生态系统提供的直接使用价值的 1.6 倍。

4.3.3 基于区域的生态功能评价

以典型区域为评价对象，开展某一类型的生态功能评价。比如余新晓等（2012）应用 InVEST 模型，开展了北京山区不同森林类型的水源涵养功能评价；褚丽妹（2017）研究确立适用于辽宁省的水土保持功能评价指标体系，针

对不同水土保持分区进行了水土保持功能评价。流域尺度方面, 高清竹等(2002)利用 NOAA/AVHRR 数据, 采用 Costanza 等人的测算方法, 评估了过去 10 年海河流域上游农牧交错带区域, 土地利用的变化损害该流域生态系统的生态服务功能达到 $4.18 \times 10^7 \sim 4.90 \times 10^7$ 美元。许中旗(2005)对锡林河流域生态系统服务功能价值变化研究表明, 在 1987—2000 年 13 年间, 锡林河流域每年提供的服务总价值下降了 31.6%。

4.4 经验与展望

生态保护红线内生态功能评价的主要目的在于为红线内的生态系统保护监管提供技术支撑, 因而首先需要关注其物质量的动态变化。在物质量评估的基础上, 为评估研究区域不同生态功能综合价值, 需将各类不可比的生态功能物质量转化为同一量纲。考虑到能值法一方面较难理解, 不如价值量直观, 另一方面, 能值法多用于流动性较强的研究, 比如生态足迹的能值计算, 而针对各类生态系统水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维持等功能尚未形成一套较为成熟的能值计算方法。

目前, 生态功能价值评价的方法相对完整, 但尚未形成统一或普遍接受的评估体系, 尤其是研究方法、生态参数及研究内容还处于模仿阶段。由于使用的评价方法不同, 常常使不同地区甚至同一地区的评价结果没有可比性, 影响评估成果的权威性和可利用性。受地域分异规律及人类活动差异影响, 同类型不同区域生态系统单位面积上提供的生态价值与服务功能存在差异, 因而必须进行实地研究或者对生态参数进行修正。从我国现有文献来看, 主要以 Costanza 的研究作为规范, 或根据已有的研究基础, 选择几种易于定量的指标进行估算, 各类研究之间缺乏可比性与沿续性。

此外, 估价方法的局限性与市场信息的不对称导致生态功能价值估算存在较大的不确定性。尽管直接市场法与替代市场法比较接近生态系统的实际价值, 由生态系统的特殊性以及市场的不完备性, 生态系统许多功能与服务无法通过市场得以体现, 而条件价值法受调查方式、调查表格设计、调查对象等因素影响, 存在很大的主观性与偶然性, 如一个人在不同时期可能对同一生态系统服

务功能支付意愿存在很大的差异。

目前对生态系统提供服务功能有待深入研究，还有一些生态系统服务功能将进入评价体系中。生态系统价值是一个变化的过程，目前国内的研究主要集中于 Costanza 总结的 17 种生态服务功能，或者从中选取几种主要功能进行研究，导致研究结果与事实不符，也无法体现生态系统的价值。一个生态服务或产品可提供一种或者多种价值，同时一种价值可能由多个服务与产品提供，因此需要厘清生态系统所提供的服务与功能，避免出现重复与遗漏计算，完善生态功能的内容框架。

5 主要技术内容及说明

5.1 标准结构框架

本标准专业包括适用范围、规范性引用文件、术语和定义、评价单元、评价周期、评价工作流程、生态功能评价、结果分析与报告编制等 8 部分内容。

- (1) 适用范围：概述了本标准的编制内容和适用范围。
- (2) 规范性引用文件：介绍了本标准中引用的相关标准文件。
- (3) 术语和定义：规定了规范中的相关术语。
- (4) 评价单元：规定了本标准评价的评价单元。
- (5) 评价周期：规定了本标准评价的评价周期。
- (6) 评价工作流程：规定了本标准评价的整体流程。
- (7) 生态功能评价：规定了以县域为单元的生态保护红线内的生态功能评价方法。
- (8) 结果分析与报告编制：明确了县域生态保护红线生态功能评价报告编制大纲。

5.2 适用范围

本标准规定了生态保护红线生态功能评价的流程、技术方法和主要内容。

本标准适用于以县域为单元的陆域生态保护红线生态功能评价。其他级别

行政辖区或一定地理空间单元范围内的陆域生态保护红线生态功能评价可参考使用。以县域为单元主要是考虑到县域行政区划是我国最基本的行政单元，从空间尺度看属于中等尺度，总体基本属于同一个自然地理区划。同时，我国针对生态保护红线的监管也将是以县域为单元建立基本信息台账，通过生态保护红线监管平台加强日常的监管。

由于陆域和海域生态保护红线的生态特征差异较大，陆域和海域生态保护红线划定评估相关工作的进展也不一致，因此，本指南暂时不考虑海域生态保护红线的生态功能评价，关于海域生态保护红线生态功能评价技术指南可另行制定。

5.3 规范性引用文件

本部分列出了在本规范中所引用的规章、标准、技术规范等规范性文件。包括涉及不同生态功能类型的评价、不同区域或领域生态状况及质量评价的规范性文件。

GB/T 24255	沙化土地监测技术规程
GB/T 38582	森林生态系统服务功能评估规范
HJ 192	生态环境状况评价技术规范
LY/T 2735	自然资源（森林）资产评价技术规范
SL 190	土壤侵蚀分类分级标准
《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》	（厅字〔2017〕2号）
《生态保护红线划定指南》	（环办生态〔2017〕48号）
《全国生态功能区划（修编版）》	（环境保护部公告 2015 年 第 61 号）
《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南（试行）》	（自然资办函〔2020〕127号）

5.4 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。参考中办、国办印发的《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》《生态保护红线划定指南》等已经发布的标准规范和政策文件，对相应的术语进行定义。

(1) 生态保护红线 ecological conservation redline

指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、石漠化等生态环境敏感脆弱区域。

早在 2000 年，高吉喜就提出划定“生态红线”、优化国土生态安全格局的构想，把一些重要的生态区域严格保护起来，保护区之外的地域可以为工业化、城镇化所利用。近年来，许多专家学者对生态保护红线的概念进行了研究辨析。2017 年 2 月，中共中央办公厅、国务院办公厅联合印发《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》明确了生态保护红线的概念。生态保护红线指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、石漠化等生态环境敏感脆弱区域。

(2) 生态功能 ecological function

指生态系统在维持生命的物质循环和能量转换过程中，为人类提供的惠益，包括水源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性等功能类型。生态功能的正常发挥是保证区域生态系统健康持续稳定发展的基础和前提。该定义来源于中国生物多样性保护国家委员会官网。

(http://cncbc.mep.gov.cn/kpzs/bhzs/201506/t20150615_303658.html)

(3) 水源涵养 water conservation

指生态系统（如森林、草地等）通过其特有的结构与水相互作用，对降水进行截留、渗透、蓄积，并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控，主要表现在缓和地表径流、补充地下水、减缓河流流量的季节波动、滞洪补枯、保证水质等方面。该定义来源于《生态保护红线划定指南》。

(4) 水土保持 soil and water conservation

指生态系统通过截留、吸收、下渗等作用以及植物根系的固持作用，减少土壤肥力损失以及减轻河流、湖泊、水库淤积的重要功能。体现了生态系统有

利于保护水土资源、改善生态环境、促进社会经济发展等方面的直接作用或效能。该定义来源于《生态保护红线划定指南》

(5) 防风固沙 sand fixation

指生态系统通过固定表土、改善土壤结构、增加地表粗糙度、阻截等方式，减少土壤的裸露机会，提高起沙风速、降低大风功能，从而提高土壤的抗风蚀能力，削弱风的强度和携沙能力，减少土壤流失和风沙危害的重要功能。

(6) 生物多样性维护 biodiversity conservation

指生态系统在维持基因、物种、生态系统多样性发挥的作用，与珍稀濒危和特有动植物的分布丰富程度密切相关。该定义来源于《生态保护红线划定指南》。

(7) 主导生态功能 dominant ecological function

指在生态功能重要性评估的基础上，采用定性分析和定量分析相结合的方法确定的反映区域生态功能主要因素的生态功能。为方便生态环境管理，生态保护红线的主导生态功能包括水源涵养、水土保持、生物多样性维护、防风固沙和其他生态功能等。

(8) 生态功能价值量 ecological function value

指采用经济学方法对生态功能的价值量进行评估，利用价值量（货币价值量）反映生态系统服务功能的物质量大小，常用生态功能价值化的方法有条件价值法、成本核算法、直接市场价格法、替代市场法和假设市场法等。

(9) 生态功能综合指数 ecological function integrate index

指反映生态保护红线生态功能状况的一系列指数的综合，利用生态功能综合价值量进行标准化获取数值，值域范围为 0-1。

5.5 评价单元

以县级行政区划为单位开展生态保护红线生态功能评价工作，评价范围为县域内的生态保护红线，包括对辖区生态保护红线范围的生态功能综合状况评价、以及生态保护红线主导生态功能的单项评价。评价基本单元以 250 m×250 m 的栅格数据单元为主，有条件的地区可进一步提高空间尺度。

5.6 评价周期

评价周期原则上为每 5 年开展一次，与生态保护红线保护成效评估等工作保持一致，有条件的地区可结合实际增加评价频次。

5.7 评价工作程序

5.7.1 前期准备

主要是开展生态功能评价前的数据及资料搜集等工作。包括：了解县域主体功能定位、生态环境状况、社会经济发展总体情况，以及生态保护红线基本特征，包括生态保护红线的生态功能类型、面积和空间分布区域，主要保护生态系统类型及重要物种等。搜集基础资料，获取自然地理、遥感监测、生态系统、气象等数据，进行数据预处理，通过遥感数据解译、生态参数反演、空间差值等空间信息技术手段，将数据统一到 250 m×250 m 栅格或更高精度的空间尺度。

5.7.2 选取评价模型和方法

结合相关的文献研究和本地生态特征，根据生态保护红线的主导生态功能类型，选取生态保护红线生态功能评价的具体模型和方法。各地可结合实际对评价模型和方法进一步优化和修正。

本指南按照较为常用、相对简易和可操作的原则，针对水源涵养、水土保持、生物多样性维护和防风固沙生态功能，分别确定了水量平衡方程、通用水土流失方程、NPP 校正模型、修正风蚀方程等模型开展生态功能物质质量评价，在此基础上利用替代工程法、恢复成本法和替代成本法等方法开展生态功能价值量评价。

5.7.3 生态功能评价

生态功能评价包括模型运算、主导生态功能评价和综合评价三步。

模型运算。获取模型参数，根据生态功能评价模型公式，在地理信息系统软件中输入所需的各项参数，进行空间分析统计和运算，获得生态功能评价结果数据图层。

主导生态功能评价。基于生态保护红线的主导生态功能，对水源涵养、水土保持、生物多样性维护和防风固沙等单项生态功能进行评价，计算获得单项生态功能物质质量和单项生态功能价值量评价结果。对于水土流失和石漠化生态环境敏感红线斑块类型，考虑到与水土保持功能密切相关，均可归入水土保持功能红线进行计算；土地沙化生态环境敏感红线斑块类型，考虑到与防风固沙功能密切相关，可归入防风固沙功能红线进行计算；其他未明确主导生态功能类型的红线斑块可参考生态功能区划，归入相应的主导生态功能进行考虑。

县域生态功能综合评价。按照生态保护红线的功能类型，综合各项生态功能价值量，根据计算公式，获取生态保护红线县域生态功能综合价值量的计算结果。

5.7.4 综合指数计算与分级

县域生态功能综合指数计算。对生态保护红线县域生态功能综合价值量的数据图层进行归一化，统一量纲，获取生态保护红线生态功能综合指数，数值在 0-1 之间。

综合指数分级。按照生态保护红线生态功能综合指数的数值大小，将生态功能等级划分为优秀、良好、一般和较差共计四级，反映县域生态保护红线生态功能综合状况的空间差异。

5.7.5 报告编制

根据评价结果，对生态保护红线主导生态功能以及生态功能综合状况评价结果进行分析与应用，编制县域生态保护红线生态功能评价报告。

5.8 生态功能评价

由于我国生态环境地域特征明显，主导生态功能区域差异大。结合县域生态功能区划定位和实地调查分析结果，确定需开展评价的某项或多项生态功能类型，按照生态功能类型分别计算生态系统物质和价值量，并在此基础上开展生态功能综合评价。

5.8.1 水源涵养功能

水源涵养功能是生态系统（如森林、草地等）通过其特有的结构与水相互作用，对降水进行截留、渗透、蓄积，并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控，是陆地生态系统重要的服务功能之一，其变化直接影响区域气候、水文、植被和土壤等状况，主要表现在缓和地表径流、补充地下水、减缓河流流量的季节波动、滞洪补枯、保证水质等方面，是区域生态系统状况的重要指示器。水源涵养能力与降雨、地表径流、生态系统类型组成、地表植被、土层厚度及物理性质等因素相关。

目前，主要的功能量计算方法包括降水储存量法、多因子回归法、综合蓄水能力法、水量平衡法、林冠截留剩余量法以及森林水文模型法等。其中水量平衡法应用范围最广，它将生态系统视为一个“黑箱”以水量的输入和输出为着眼点，从水量平衡的角度计算，结合遥感和气象资料，应用方便，结果可信度较高。

参照《生态保护红线划定指南》《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南（试行）》中的水源涵养功能计算方法，采用水量平衡方程计算水源涵养量，以水源涵养量作为生态系统水源涵养功能的评估指标。计算公式为：

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^{-3}$$

式中： TQ ——总水源涵养量， m^3 ；

P_i ——多年平均降雨量， mm ；

R_i ——多年平均地表径流量， mm ；

ET_i ——多年平均蒸散发, mm;

A_i —— i 类生态系统面积, km^2 ;

i ——研究区第 i 类生态系统类型;

j ——研究区生态系统类型数。

其中, 降雨量因子 P_i 根据气象数据集处理得到。在 Excel 中计算出区域所有气象站点的多年平均降水量, 将这些值根据相同的站点名与地理信息系统中的站点(点图层)数据相连接(Join)。在 Spatial Analyst 工具中选择 Interpolate to Raster 选项, 选择相应的插值方法得到降水量因子栅格图。

地表径流因子 R 为降雨量乘以地表径流系数获得, 计算公式:

$$R = P \times \alpha$$

式中: R ——地表径流量, mm;

P ——多年平均降雨量, mm;

α ——平均地表径流系数, 如表 5-1 所示;

表 5-1 各类型生态系统地表径流系数均值表

生态系统类型 1	生态系统类型 2	平均地表径流系数 (%)
森林	常绿阔叶林	2.67
	常绿针叶林	3.02
	针阔混交林	2.29
	落叶阔叶林	1.33
	落叶针叶林	0.88
	稀疏林	19.20
灌丛	常绿阔叶灌丛	4.26
	落叶阔叶灌丛	4.17
	针叶灌丛	4.17
	稀疏灌丛	19.20
草地	草甸	8.20
	草原	4.78
	草丛	9.37
	稀疏草地	18.27
湿地	湿地	0.00

蒸散发因子 ET 根据国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统网站提供的产品数据得到。原始数据空间分辨率为 1 km，通过地理信息系统软件重采样为 250 m 空间分辨率，得到蒸散发因子栅格图。

生态系统面积因子 A_i 根据全国生态状况遥感调查与评估成果中的生态系统类型数据集得到。原始数据为矢量数据，通过地理信息系统软件转为 250 m 空间分辨率的栅格图。

将各因子统一成 250 m 分辨率的栅格数据，通过地理信息系统软件的栅格计算器（Spatial Analyst→Raster Calculator）工具，根据公式计算得到生态系统水源涵养量。

参考《森林生态系统服务功能评估规范》（LY/T 1721-2008），水源涵养的价值量主要采用替代工程法计算，以水库建造成本进行评价。该方法较为常见，比如牟雪洁等（2020）在核算北京市延庆区生态系统生产总值时，博文静等（2017）在评估中国森林生态资产水源涵养价值时，赖敏等（2013）在评估三江源区生态系统服务间接使用价值时均参考此方法进行价值量换算。此外，也有一些研究采用自来水厂居民生活用水的供水价格来进行换算（刘菊等，2019）。

具体计算方法为：

$$V_W = TQ \times c$$

式中： V_W ——水源涵养价值量，元；

c ——建设单位库容的工程成本，元/ m^3 。2005 年水库建设单位库容造价为 6.11 元/t，由于水库为固定资产投资，需要通过折现率和使用年限折算成年金现值。

得到每个栅格单元（250 m×250 m）的水源涵养价值量数值后，采用空间统计分析，计算县域范围内水源涵养主导生态功能的生态保护红线斑块的水源涵养价值总和，即水源涵养功能价值指数（ $V_{W_{总}}$ ），以及县域生态保护红线的水源涵养价值总量。

表 5-2 生态保护红线水源涵养功能评价数据表

名称	类型	分辨率	数据来源及参考
生态系统类型数据集	矢量	-	全国生态状况遥感调查与评估成果
气象数据集	文本	-	中国气象科学数据共享服务网
蒸散发数据集	栅格	1km	国家生态系统观测研究网络科技资源服 务系统网站
建设单位库容的工程成本	文本	-	森林生态系统服务功能评估规范

5.8.2 水土保持功能

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。水土保持是生态系统（如森林、草地等）通过其结构与过程减少由于水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。水土保持功能主要与气候、土壤、地形和植被有关。

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。

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。

水土保持功能的评估方法采用较为常用的修正通用水土流失方程（RUSLE）的水土保持服务模型。以水土保持量，即潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值，反映生态保护红线的水土保持功能状况。

水土保持量计算公式为：

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

式中： A_c ——水土保持量， $t/hm^2 \cdot a$ ；

A_p ——潜在土壤侵蚀量， $t/hm^2 \cdot a$ ；

A_r ——实际土壤侵蚀量， $t/hm^2 \cdot a$ ；

R ——降水侵蚀力因子， $MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$ ；

K ——土壤可侵蚀性因子， $t \cdot hm^2 \cdot h/hm^2 \cdot MJ \cdot mm$ ；

L ——坡长因子；

S ——坡度因子；

C ——植被覆盖因子。

其中，降雨侵蚀力因子 R 为降雨引发土壤侵蚀的潜在能力，通过多年平均年降雨侵蚀力因子反映。计算公式：

$$R = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k}$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{1.7265})$$

式中： R ——多年平均年降雨侵蚀力， $MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$ ；

$\bar{R}_{\text{半月}k}$ ——第 k 个半月的降雨侵蚀力， $MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h \cdot a$ ；

k ——一年的 24 个半月， $k=1,2,\dots,24$ ；

i ——所用降雨资料的年份， $i=1,2,\dots,n$ ；

j ——第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨日的天数， $j=1,2,\dots,m$ ；

$P_{i,j,k}$ ——第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量， mm ，可以根据全国范围内气象站点多年的逐日降雨量资料，通过插值获得；或者直接采用国家气象局的逐日降雨量数据产品；

α ——参数，暖季时 $\alpha=0.3937$ ，冷季时 $\alpha=0.3101$ 。

土壤可蚀性因子 K 为土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度，主要与土壤

质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关。计算公式：

$$K = (-0.01383 + 0.51575K_{EPIC}) \times 0.1317$$

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256m_s(1 - m_{silt}/100)] \right\} \times [m_{silt} / (m_c + m_{silt})]^{0.3} \\ \times \left\{ 1 - 0.25orgC / [orgC + \exp(3.72 - 2.95orgC)] \right\} \\ \times \left\{ 1 - 0.7(1 - m_s/100) / \{(1 - m_s/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\} \right\}$$

式中： K_{EPIC} ——修正前的土壤可蚀性因子；

K ——修正后的土壤可蚀性因子；

m_c 、 m_{silt} 、 m_s 、 $orgC$ ——分别为粘粒（ <0.002 mm）、粉粒（ 0.002 mm~ 0.05 mm）、砂粒（ 0.05 mm~ 2 mm）和有机碳的百分比含量（%），数据来源于中国 1:100 万土壤数据库。

在 Excel 表格中，利用上述公式计算 K 值，然后以土壤类型图作为工作底图，在 ArcGIS 中将 K 值连接（Join）到底图上。利用 Conversion Tools 中矢量转栅格工具，转换成空间分辨率为 250 m 的土壤可蚀性因子栅格图。

地形因子 L 表示坡长因子， S 表示坡度因子，是反映地形对土壤侵蚀影响的两个因子。在评估中，可以应用地形起伏度，即地面一定距离范围内最大高差，作为区域土壤侵蚀评估的地形指标。选择高程数据集，在 Spatial Analyst 下使用 Neighborhood Statistics，设置 Statistic Type 为最大值和最小值，即得到高程数据集的最大值和最小值，然后在 Spatial Analyst 下使用栅格计算器 Raster Calculator，公式为 [最大值-最小值]，获取地形起伏度，即地形因子栅格图。

植被覆盖因子 C 反映了生态系统对土壤侵蚀的影响，是控制土壤侵蚀的积极因素。水田、湿地、城镇和荒漠参照 N-SPECT 的参数分别赋值为 0、0、0.01 和 0.7，旱地按植被覆盖度换算。计算公式：

$$C_{旱} = 0.221 - 0.595 \log c_1$$

式中： $C_{旱}$ ——旱地的植被覆盖因子；

c_1 ——小数形式的植被覆盖度；

其余生态系统类型按不同植被覆盖度进行赋值，如表 5-3 所示。

表 5-3 不同生态系统类型植被覆盖因子赋值

生态系统类型	植被覆盖度					
	<10	10-30	30-50	50-70	70-90	>90
森林	0.1	0.08	0.06	0.02	0.004	0.001
灌丛	0.4	0.22	0.14	0.085	0.04	0.011
草地	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043	0.011
乔木园地	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
灌木园地	0.4	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011

将各因子统一成 250 m 分辨率的栅格数据，通过地理信息系统软件的栅格计算器（Spatial Analyst→Raster Calculator）工具，根据公式计算得到生态系统水土保持量。

土壤侵蚀的危害主要表现在以下方面：一是大量土壤资源被蚕食和破坏，土层变薄，大面积土地被切割得支离破碎，人类赖以生存的肥沃土层减少；二是增加河流输沙量，影响下游地区的灌溉、污水处理和水库使用；三是造成局地水土流失、土壤肥力下降，影响粮食安全。因此采用替代成本法，从减少土地废弃、减少泥沙淤积、保持土壤肥力（周夏飞等，2016；杨渺等，2019；钱大文等，2020）等三个方面计算生态系统土壤保持功能价值。

水土保持总价值为：

$$V_S = V_{S_1} + V_{S_2} + V_{S_3}$$

式中： V_S ——水土保持总价值，元；

V_{S_1} ——减少土地废弃的经济价值，元；

V_{S_2} ——减少泥沙淤积的价值，元；

V_{S_3} ——保持土壤肥力的价值，元；

其中减少土地废弃的价值为：

$$V_{S_1} = A_c \times P_1 \times \rho \times h$$

式中： P_1 ——土地废弃的机会成本，元/m²；

ρ ——土壤容重，t/m³，通常取 1.25 t/m³；

h ——土层厚度，m；

减少泥沙淤积的价值为：

$$V_{S_2} = per \times A_c \times P_2 \div \rho$$

式中： per ——泥沙淤积系数，通常取 24%；

P_2 ——水库工程清淤费用，元/m³。

保持土壤肥力的价值为：

$$V_{S_3} = \sum A_c \times C_i \times R_i \times P_{3i}$$

式中： i ——氮、磷、钾、土壤有机质及相应肥料尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质；

C_i ——土壤中氮、磷、钾及有机质的纯含量，%；

R_i ——氮、磷、钾转换成相应肥料尿素、过磷酸钙、氯化钾的比率，分别取 2.17、8.33 和 2.22；

P_{3i} ——尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质价格，元/t。

得到每个栅格单元（250 m×250 m）的水土保持价值量数值后，采用空间统计分析，计算县域范围内水土保持主导生态功能的生态保护红线斑块的水土保持价值总和，即水土保持功能价值指数（ $V_{S_{\text{总}}}$ ），以及县域生态保护红线的水土保持价值总量。

表 5-4 生态保护红线水土保持功能评价数据表

名称	类型	分辨率	数据来源及参考
高程数据集	栅格	30m	地理空间数据云网站
气象数据集	文本	-	中国气象科学数据共享服务网
土壤数据集	矢量/Excel	-	全国生态环境调查数据库 中国 1:100 万土壤数据库
水库工程清淤费用	文本	-	森林生态系统服务功能评估规范
化肥价格	文本	-	全国化肥网

5.8.3 防风固沙功能

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，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估指标。

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 于 1990 年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，相继提出了通用风蚀方程（WEQ）、基于风速廓线发育的德克萨斯侵蚀分析模型（TEAM）、涉及人类活动因素的 Bocharov 模型、修正风蚀方程模型（RWEQ）以及以过程为基础的风蚀预报系统（WEPS）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估。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估中，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。

防风固沙量计算公式为：

$$SR = S_{L潜} - S_L$$

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

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

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

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

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

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

式中：SR——固沙量，t/km²·a；

$S_{L潜}$ ——潜在风力侵蚀量，t/km²·a；

S_L ——实际风力侵蚀量，t/km²·a；

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。

其中，气候因子 WF 计算公式为：

$$WF = Wf \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD$$

式中： WF ——气候因子，kg/m，12个月 WF 总和得到多年年均 WF ；

Wf ——各月多年平均风力因子；在 Excel 中计算出区域所有气象站点的多年平均风力，将这些值根据相同的站点名与地理信息系统中的站点（点图层）数据相连接（Join）。在 Spatial Analyst 工具中选择 Interpolate to Raster 选项，选择相应的插值方法得到各月多年平均风力因子栅格图；

ρ ——空气密度，kg/m³；

g ——重力加速度，m/s²；

SW ——各月多年平均土壤湿度因子，无量纲；

SD ——雪盖因子，无量纲。

土壤可蚀因子 EF 计算公式为：

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa / cl) - 2.59OM - 0.95Caco_3}{100}$$

式中： sa ——土壤粗砂含量（0.2 mm~2 mm），%；

si ——土壤粉砂含量，%；

cl ——土壤粘粒含量，%；

OM ——土壤有机质含量，%；

$CaCO_3$ ——碳酸钙含量，%，可不予考虑。

土壤结皮因子 SCF 计算公式为：

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(cl)^2 + 0.021(OM)^2}$$

式中： cl ——土壤粘粒含量，%；

OM ——土壤有机质含量，%。

植被覆盖因子 C ：不同植被类型的防风固沙效果不同，研究将植被分为林地、灌丛、草地、农田、裸地和沙漠六个植被类型，根据不同的系数计算各植被覆盖因子 C 值。计算公式：

$$C = e^{a_i(SC)}$$

式中： SC ——植被覆盖度；

a_i ——不同植被类型的系数，分别为：林地 0.1535，草地 0.1151，灌丛 0.0921，裸地 0.0768，沙地 0.0658，农田 0.0438。

地表糙度因子 K' 计算公式为：

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127Crr)}$$

$$K_r = 0.2 \cdot \frac{(\Delta H)^2}{L}$$

式中： K_r ——土垄糙度，以 Smith-Carson 方程加以计算，cm；

Crr ——随机糙度因子，取 0，cm；

L ——地势起伏参数；

ΔH ——距离 L 范围内的海拔高程差，在地理信息系统软件中使用 Neighborhood statistics 工具计算 DEM 数据相邻单元格地形起伏差值获得。

将各因子统一成 250 m 分辨率的栅格数据，通过地理信息系统软件的栅格计算器（Spatial Analyst→Raster Calculator）工具，根据公式计算得到生态系统防风固沙量。

防风固沙主要表现为植被降低风沙流动从而减少在农业、工业和交通等方面的风沙损害。采用恢复成本法和替代成本法，从治理沙化土壤的成本（莫宏伟等，2006；朱玉伟等，2015）和减少风蚀土壤肥力损失（莫丰瑞等，2017）2 个方面评估防风固沙价值量（程磊磊等，2013）。除此之外，有一些研究在计

算防风固沙价值量时考虑了减少泥沙淤积灾害价值和减少交通运输经济损失价值（高君亮等，2013），还有些地区的防风固沙价值以沙荒地恢复成农用地的平均成本、农田防护林保持的农地价值或农田增加的农作物价值来计算（李晶和任志远，2011）。

防风固沙价值量为：

$$V_F = V_{F_1} + V_{F_2}$$

式中： V_F ——防风固沙总价值，元；

V_{F_1} ——治理沙化土壤的价值，元；

V_{F_2} ——减少风蚀土壤肥力损失的价值，元。

沙化土壤的治理成本为：

$$V_{F_1} = [SR \times A / (\rho \cdot h)] \times P$$

式中： A ——生态系统面积， m^2 ；

ρ ——砂砾堆积密度， t/m^3 ；

h ——土壤沙化标准覆沙厚度， m ；

P ——治沙工程的平均成本，元/ m^2 。

减少风蚀土壤肥力损失为：

$$V_{F_2} = \sum SR \times C_i \times R_i \times P_{3i}$$

式中： i ——氮、磷、钾、土壤有机质及相应肥料尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质；

C_i ——土壤中氮、磷、钾及有机质的纯含量，%；

R_i ——氮、磷、钾、土壤有机质转换成相应肥料尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质的比率；

P_{3i} ——尿素、过磷酸钙、氯化钾、有机质价格，元/ t 。

得到每个栅格单元（250 m×250 m）的防风固沙价值量数值后，采用空间统计分析，计算县域范围内防风固沙主导生态功能的生态保护红线斑块的防风固沙价值总和，即防风固沙功能价值指数（ $V_{F_{\text{总}}}$ ），以及县域生态保护红线的防风固沙价值总量。

表 5-5 生态保护红线防风固沙功能评价数据表

名称	类型	分辨率	数据来源及参考
遥感数据集	栅格	250m	美国国家航空航天局 (NASA) 网站或地理空间数据云网站
高程数据集	栅格	30m	地理空间数据云网站
气象数据集	文本	-	中国气象科学数据共享服务网
土壤数据集	矢量/Excel	-	全国生态环境调查数据库 中国 1:100 万土壤数据库
中国地区 Modis 雪盖产品数据集	栅格	0.05 度	寒区旱区科学数据中心
化肥价格	文本	-	全国化肥网

5.8.4 生物多样性维护功能

生物多样性是生物及其环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的综合，与珍稀濒危和特有动植物的分布丰富程度密切相关。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。

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。

目前，生态系统服务功能采用的评估方法主要有模型评估法和净初级生产力（NPP）定量指标评估法。其中，模型评估法所需参数较多，对数据需求量较大，准确度较高；定量指标法以 NPP 数据为主，参数较少，操作较为简单，但其适用范围具有地域性。考虑到生物多样性维护功能采用模型评估法时参数获取、数据收集、技术力量支持等方面都存在一定困难，因此，采用 NPP 定量指标，计算生物多样性维护功能指数：

$$S_{bio} = NPP_{mean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt})$$

式中： S_{bio} ——生物多样性维护服务能力指数；

NPP_{mean} ——多年植被净初级生产力平均值；

F_{pre} ——多年平均降水量，mm；

F_{tem} ——多年平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ；

F_{alt} ——海拔因子；

其中，多年平均气温因子 F_{tem} 为区域所有气象站点的多年平均气温，在 Excel 中计算出，将这些值根据相同的站点名与 ArcGIS 中的站点（点图层）数据相连接（Join）。在 Spatial Analyst 工具中选择 Interpolate to Raster 选项，选择相应的插值方法得到多年平均气温栅格图。

已有研究中，大部分通过发放调查问卷，统计分析人们的支付意愿来表征生物多样性维护价值（魏强等，2015；徐婷等，2015；崔丽娟等，2016；谢世林等，2018），但这样的统计方法受调查总人数、被调查人的收入和学历等因素影响较大，计算愿意支付人口总数时也不同研究之间也差异较大，难以确定统一的调查规范。因而，也有一些研究采用珍稀濒危物种或特有物种的保育价值作为代替（刘永杰等，2014）。

生物多样性维护价值或者野生动物物种保育价值与各地的生境质量情况紧密相关，由此，假设一个地方的生境质量越好，那么该地的物种保育价值也就越高。采用保护价值法评估生物多样性维护功能价值，以生物多样性维护服务能力指数为计算基础，选取珍稀濒危或特有物种等能够反映该区域生物多样性状况的旗舰物种分布数量和保育价值，通过空间分析，将总的物种保育价值进

行空间化处理和叠加分析,获取每个栅格单元的物种保育价值的计算公式如下:

$$V_B = \frac{S_{bio}}{\sum S_{bio}} \times P$$

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i \times A_i)$$

式中: V_B ——生物多样性维护功能价值, 元;

P ——区域物种保育总价值, 元。

P_i ——某一类物种的保护价格(国际拍卖或狩猎价格), 元/只;

A_i ——某一类动物的数量, 只;

n ——区域内物种种类;

计算得到每个栅格单元(250 m×250 m)的生物多样性维护价值量数值后,采用空间统计分析,获取县域范围内生物多样性维护主导功能的生态保护红线斑块的生物多样性价值总和,即生物多样性维护功能价值指数($V_{B_{总}}$),以及县域生态保护红线的生物多样性维护价值总量。

表 5-6 生态保护红线生物多样性维护功能评价数据表

名称	类型	分辨率	数据来源及参考
NPP 数据集	栅格	250m	全国生态状况遥感调查与评估成果
高程数据集	栅格	30m	地理空间数据云网站
气象数据集	文本	-	中国气象科学数据共享服务网
物种数量	文本	-	相关调查报告
物种价格	文本	-	参考市场价格、国家狩猎权拍卖参考价、美国狩猎价格等

5.8.5 生态功能综合价值

在单项生态功能评价的基础上,计算县域生态保护红线的生态功能综合价值量,用生态保护红线生态功能综合价值($ECRV_{county}$)表示,反映生态保护红线各单项生态功能的价值总和。具体计算公式如下:

$$ECRV_{ij} = V_W + V_F + V_B + V_S$$

$$ECRV_{county} = \sum ECRV_{ij}$$

式中： $ECRV_{ij}$ ——生态保护红线区域内栅格 ij 的生态功能综合价值，元；

$ECRV_{county}$ ——县域范围内生态保护红线的生态功能综合价值，元；

5.8.6 综合指数计算与分级

通过构建综合指数，能够直观地反映县域或区域的生态保护红线生态功能的综合状况。为更清晰地描述和比较县域范围内生态保护红线生态功能的空间差异，并进行结果分级，将各栅格单元（250 m×250 m）的生态功能价值量数值进行标准化，获得生态保护红线生态功能综合指数。

$$Z_{ij} = \frac{ECRV_{ij} - ECRV_{min}}{ECRV_{max} - ECRV_{min}}$$

式中： Z_{ij} ——生态保护红线生态功能综合指数，即生态保护红线范围内栅格 ij 的生态功能综合价值标准化后的数值，值域范围为 0-1；

$ECRV_{min}$ ——县域范围内生态保护红线生态功能综合价值量的最小值，元；

$ECRV_{max}$ ——县域范围内生态保护红线生态功能综合价值量的最大值，元；

根据生态保护红线生态功能综合指数栅格图层的属性值，即每一个栅格单元表示生态功能综合指数的数值，将生态功能综合指数按从高到低的顺序排列，县域生态保护红线的生态功能等级划分为四级，分别为优秀、良好、一般和较差，具体分值和分级详见下表（表 5-7）。生态功能综合指数为标准化处理后的数值，主要反映的是空间差异，没有绝对值的概念。

表 5-7 生态保护红线生态功能综合指数分级

等级	优秀	良好	一般	较差
评价结果	$Z_{ij} \geq 0.7$	$0.5 \leq Z_{ij} < 0.7$	$0.3 \leq Z_{ij} < 0.5$	$Z_{ij} < 0.3$

5.9 结果分析与报告编制

5.9.1 评价结果分析

根据评价结果，及时提出水源涵养、水土保持、生物多样性维护和防风固

沙等单项生态功能的基本状况、主要空间差异，以及生态功能综合评价总体情况。

评价结果分析包括两个层次：一是生态保护红线的主导生态功能状况分析。针对县域生态保护红线的水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护等单项生态功能，以水源涵养量、水土保持量、防风固沙量和生物多样性维护功能指数评价结果为依据，分析生态保护红线的不同主导生态功能的物质量和价值量评价结果的空间分布差异，分析主要原因，基于此，还可进行不同年度的评价结果对比分析，提出相应的保护修复对策建议。二是生态保护红线生态功能综合状况分析。评价结果以县级行政区划为单位，掌握生态保护红线的生态功能综合价值以及空间差异状况，分析主要原因，提出相应的对策建议，提升生态功能。

5.9.2 结果应用

指南提出生态保护红线生态功能评价的模型和方法，计算生态保护红线单项生态功能以及生态功能综合状况，为开展生态保护红线监测、保护成效评估、定期评估和监管等工作提供基础。按照“生态功能不降低”的要求，为生态保护红线生态修复治理和绩效考核提供支撑，为开展生态保护红线的生态补偿提供参考依据。

5.9.3 报告编制

编制县域生态保护红线生态功能评价报告，包括县域生态保护红线的主导功能类型、空间分布区域、生态系统基本状况及存在的主要问题、生态功能评价模型和方法选取、评价结果及原因分析、提出有关对策建议等。

6 对实施本标准的建议

本标准由县级以上人民政府生态环境主管部门负责实施。

本标准为首次制定，随着生态保护红线监管要求的不断提高，生态功能评

价工作的不断深入，本标准在实际应用过程中也需要不断丰富和完善，适时进行修订。

本标准是实施生态保护红线生态功能评价的重要依据，为保证本标准的有效实施，建议生态环境部门加强生态保护红线生态功能评价技术和方法的培训，保证地方遵循一致的评价标准对本辖区生态保护红线生态功能进行评价，为生态保护红线监管提供有效支撑。

7 主要参考文献

- 1) 白玛卓嘎,肖邁,欧阳志云,王莉雁.甘孜藏族自治州生态系统生产总值核算研究[J].生态学报,2017,37(19):6302-6312.
- 2) 白杨,欧阳志云,郑华,徐卫华,江波,方瑜.海河流域森林生态系统服务功能评估[J].生态学报,2011,31(07):2029-2039.
- 3) 博文静,王莉雁,操建华,王效科,肖燚,欧阳志云.中国森林生态资产价值评估[J].生态学报,2017,37(12):4182-4190.
- 4) 陈仲新,张新时.中国生态系统效益的价值[J].科学通报,2000(01):17-22+113.
- 5) 程皓,李霞,侯平,裴玉亮.塔里木河下游不同覆盖度灌木防风固沙功能野外观测研究[J].中国沙漠,2007(06):1022-1026.
- 6) 程磊磊,郭浩,卢琦.荒漠生态系统服务价值评估研究进展[J].中国沙漠,2013,33(01):281-287.
- 7) 褚丽妹.辽宁省水土保持功能评价与定位研究[J].中国水土保持,2017(05):18-22.
- 8) 崔丽娟,庞丙亮,李伟,马牧源,孙宝娣,张亚琼.扎龙湿地生态系统服务价值评价[J].生态学报,2016,36(03):828-836.
- 9) 董天,张路,肖燚,郑华,黄斌斌,欧阳志云.鄂尔多斯市生态资产和生态系统生产总值评估[J].生态学报,2019,39(09):3062-3074.
- 10) 董治宝.建立小流域风蚀量统计模型初探[J].水土保持通报,1998(05):56-63.
- 11) 范亚宁.秦岭北麓及周边生态系统水源涵养与水质净化功能评估[D].西北大学,2017.
- 12) 高吉喜.探索我国生态保护红线划定与监管[J].生物多样性,2015,23(6):705-707.
- 13) 高君亮,郝玉光,丁国栋,刘芳,辛智鸣,徐军,张景波,赵英铭.乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估[J].干旱区资源与环境,2013,27(12):41-46.
- 14) 高清竹,何立环,黄晓霞,江源.海河上游农牧交错地区生态系统服务价值的变化[J].自然资源学报,2002(06):706-712.

- 15) 巩国丽,刘纪远,邵全琴.基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J].地理科学进展,2014,33(06):825-834.
- 16) 郭中伟,李典谟,于丹.生态系统调节水量的价值评估——兴山实例[J].自然资源学报,1998(03):50-56.
- 17) 韩维栋,高秀梅,卢昌义.红树林生态系统及其生态价值[J].福建林业科技,2000(02):9-13.
- 18) 韩永伟,拓学森,高吉喜,刘成程,高馨婷.黑河下游重要生态功能区植被防风固沙功能及其价值初步评估[J].自然资源学报,2011,26(01):58-65.
- 19) 何浩,潘耀忠,朱文泉,刘旭拢,张晴,朱秀芳.中国陆地生态系统服务价值测量[J].应用生态学报,2005(06):1122-1127.
- 20) 何立环, 刘海江, 李宝林, 等. 国家重点生态功能区县域生态环境质量考核评价指标体系设计与应用实践[J]. 环境保护, 2014, 42(12).
- 21) 侯鹏, 王桥, 杨旻, 等. 2018. 生态保护红线成效评估框架与指标方法[J]. 地理研究, 37(10): 1927-1937.
- 22) 侯元兆,王琦.中国森林资源核算研究[J].世界林业研究,1995(03):51-56.
- 23) 黄从红, 杨军, 张文娟, 生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志, 2013, 32(12) : 3360—3367
- 24) 赖敏,吴绍洪,戴尔阜,尹云鹤,赵东升.三江源区生态系统服务间接使用价值评估[J].自然资源学报,2013,28(01):38-50.
- 25) 李嘉力, 姜代炜, 黎宁, 等. 2018. 多源专题数据在国家重点生态功能区生态环境状况评价中的应用[J].中国环境监测, 34(05): 75-80.
- 26) 李晶,任志远.陕北黄土高原土地利用防风固沙功能价值时空研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(07):183-187.
- 27) 李敏. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能评价研究[D].北京林业大学,2016.
- 28) 李双成,郑度,张懿铨.青藏高原生态资产地域划分中的 SOFM 网络技术[J].自然资源学报,2002(06):750-756.

- 29) 李屹峰,罗跃初,刘纲,欧阳志云,郑华.土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(03):726-736.
- 30) 刘慧明,高吉喜,刘晓,张海燕,徐新良.国家重点生态功能区 2010—2015 年生态系统服务价值变化评估[J].生态学报,2020,40(06):1865-1876.
- 31) 刘菊,傅斌,张成虎,胡治鹏,王玉宽.基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J].长江流域资源与环境,2019,28(03):577-585.
- 32) 刘璐璐,曹巍,吴丹,等.2018.国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征[J].地理科学,38(09):1508-1515.
- 33) 刘世梁,赵爽,成方妍,等.2018.市域尺度两种生态系统服务评价方法对比研究[J].中国生态农业学报,26(09):1315-1323.
- 34) 刘永杰,王世畅,彭皓,李镇清.神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估[J].应用生态学报,2014,25(05):1431-1438.
- 35) 满卫东,刘明月,李晓燕,等.2018.1990-2015年三江平原生态功能区生态功能状况评估[J].干旱区资源与环境,32(02):136-141.
- 36) 闵庆文,谢高地,胡聃,沈镭,严茂超.青海草地生态系统服务功能的价值评估[J].资源科学,2004(03):56-60.
- 37) 莫丰瑞,楚新正,马晓飞,马倩.景观格局变化下艾比湖湿地防风固沙功能及其价值评估[J].生态科学,2017,36(06):195-206.
- 38) 莫宏伟,任志远,王欣.植被生态系统防风固沙功能价值动态变化研究——以榆阳区为例[J].干旱区研究,2006(01):56-59.
- 39) 牟雪洁,王夏晖,张箫,饶胜,朱振肖.北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化[J].水土保持研究,2020,27(01):265-274+282.
- 40) 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999(05):19-25.
- 41) 欧阳志云,赵同谦,王效科,苗鸿.水生态服务功能分析及其间接价值评价[J].生态学报,2004(10):2091-2099.
- 42) 欧阳志云,朱春全,杨广斌,徐卫华,郑华,张琰,肖焱.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J].生态学报,2013,33(21):6747-6761.

- 43) 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 2004. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量. 中国科学(D辑:地球科学), 04: 375-384.
- 44) 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 李茜, 郭小伟. 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2020, 40(04): 1392-1404.
- 45) 钱贞兵, 戴晓峰, 陈超, 等. 2018. 安徽省生态区生态环境状况的评价研究[J]. 生物学杂志, 35(04): 72-75.
- 46) 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 2016. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报, 71(01): 3-20.
- 47) 宋昌素, 肖焱, 博文静, 肖洋, 邹梓颖, 欧阳志云. 生态资产评估方法研究——以青海省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(01): 9-23.
- 48) 魏强, 佟连军, 杨丽花, 吕宪国, 张慧敏. 三江平原湿地生态系统生物多样性保护价值[J]. 生态学报, 2015, 35(04): 935-943.
- 49) 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, 47(02): 145-153.
- 50) 王莉雁, 肖焱, 欧阳志云, 韦勤, 博文静, 张健, 任苓. 国家级重点生态功能区县生态系统生产总值核算研究——以阿尔山市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(03): 146-154.
- 51) 王丽霞, 邹长新, 王燕, 林乃峰, 吴丹, 姜宏, 徐德琳. 基于 GIS 识别生态保护红线边界的方法——以北京市昌平区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6176-6185.
- 52) 王彦芳, 裴宏伟, 2018. 1980—2015 年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J]. 生态经济, 34(01): 186-190+236.
- 53) 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000(04): 481-484.
- 54) 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003(02): 189-196.
- 55) 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001(01): 47-53.

- 56) 谢世林,史雪威,彭文佳,肖慧,欧阳志云,肖焱.我国重点保护动植物物种价值评估[J].生态学报,2018,38(21):7565-7571.
- 57) 辛琨,肖笃宁.盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J].生态学报,2002(08):1345-1349.
- 58) 熊善高,秦昌波,于雷,路路,关杨,万军,李新.基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例[J].生态学报,2018,38(22):7899-7911.
- 59) 徐婷,徐跃,江波,张玲,宋文彬,周德民.贵州草海湿地生态系统服务价值评估[J].生态学报,2015,35(13):4295-4303.
- 60) 许中旗,李文华,闵庆文,许晴.锡林河流域生态系统服务价值变化研究[J].自然资源学报,2005(01):99-104.
- 61) 杨渺,肖焱,欧阳志云,叶宏,邓懋涛,艾蕾.四川省生态系统生产总值(GEP)的调节服务价值核算[J].西南民族大学学报(自然科学版),2019,45(03):221-232.
- 62) 姚作芳,刘兴土,李秀军,杨飞,孙丽,文波龙.基于能值理论的吉林省农业生态系统分析[J].生态学杂志,2009,28(10):2076-2081
- 63) 喻建华,高中贵,张露,彭补拙.昆山市生态系统服务价值变化研究[J].长江流域资源与环境,2005(02):213-217.
- 64) 余新晓,鲁绍伟,靳芳,陈丽华,饶良懿,陆贵巧.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005(08):2096-2102.
- 65) 余新晓,周彬,吕锡芝,杨之歌.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.
- 66) 张超,王治国,凌峰,纪强,孟繁斌.水土保持功能评价及其在水土保持区划中的应用[J].中国水土保持科学,2016,14(05):90-99.
- 67) 张沛,徐海量,杜清,等.2017.基于RS和GIS的塔里木河干流生态环境状况评价[J].干旱区研究,34(02):416-422.
- 68) 张镔铨,胡忠俊,祁威,等.2015.基于NPP数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析[J].地理学报,70(07):1027-1040.

- 69) 张紫萍,唐文家,张志军,宋国富,张莉.青海省生态服务功能评价研究[J].测绘与空间地理信息,2018,41(07):34-38.
- 70) 赵晟,李自珍.甘肃省生态经济系统的能值分析[J].西北植物学报,2004(03):464-470.
- 71) 赵宇豪. 基于 InVEST 模型的流域生态系统服务功能评价[D].兰州大学,2017.
- 72) 周夏飞,朱文泉,马国霞,张东海,郑周涛.江西省赣州市稀土矿开采导致的水土保持价值损失评估[J].自然资源学报,2016,31(06):982-993.
- 73) 朱玉伟,桑巴叶,王永红,刘康,陈启民,褚奋飞.新疆农田防护林防风固沙服务功能价值核算[J].中国农学通报,2015,31(22):7-12.
- 74) Costanza R, Arge R D, de Groot R, *et al.*, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253-260.
- 75) de Groot R, Brander L, van der Ploeg S, *et al.*, 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, **1**:50-61.
- 76) Li G, Fang C, 2014. Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green GDP' accounting. *Ecological Indicators* **46**: 293-314.
- 77) Xie G, Zhang C, Zhen L, Zhang L, *et al.*, 2017. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem Services*, **26**: 146-154.