

# 大尺度生态质量遥感评价方法构建及应用

高吉喜, 万华伟, 王永财, 侯鹏, 施佩荣, 孙晨曦

生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

**摘要:** 生态系统是人类生存和经济社会可持续发展的基础, 开展生态质量评价可为制定生态保护修复政策和服务于生态文明建设提供科学依据。本文从国家尺度生态质量评价年度业务化运行需求出发, 以生态学理论为基础, 构建一套表征“功能—稳定—胁迫”3个维度的生态质量评价体系, 并利用植被参量和土地利用等遥感数据, 对2000年—2018年陆地区域生态质量进行了监测和评价。结果表明: 2018年全国生态质量整体状况良好, 生态质量中等以上比例达到了36.98%, 差等生态质量仅占4.33%。其中, 福建、海南、广西等地生态质量最优; 2000年—2018年全国53.97%的区域生态质量呈改善趋势, 其中, 2011年之后改善趋势更为明显; 全国部分地区生态质量形势仍然严峻, 生态系统功能低、生态系统稳定度差, 生态系统胁迫处于较高水平。综上, 从全国生态质量评价的应用结果来看, 构建的生态质量评价体系方法科学、简单快速、经济可行, 能满足区域或国家生态系统质量快速评估的需求。

**关键词:** 生态质量评价, 遥感, 生态功能, 生态稳定, 生态胁迫

**中图分类号:** TP701/P2

**引用格式:** 高吉喜, 万华伟, 王永财, 侯鹏, 施佩荣, 孙晨曦. 2023. 大尺度生态质量遥感评价方法构建及应用. 遥感学报, 27(12): 2860–2872

Gao J X, Wan H W, Wang Y C, Hou P, Shi P R and Sun C X. 2023. New framework for large-scale ecological quality evaluation and application research using remote sensing data. National Remote Sensing Bulletin, 27(12): 2860–2872[DOI:10.11834/jrs.20221186]

## 1 引言

生态系统质量指在一定时间、空间范围内生态系统的整体或部分的健康状况和整体质量(王文杰等, 2001; Martinez-Haro等, 2015; 陈强等, 2015; 潘竟虎和董磊磊, 2016)。生态质量评价是根据特定目的, 对区域内生态质量的优劣程度进行定性或定量的分析或判别(Paetzold等, 2010; 田佳良, 2013; Ding等, 2020)。在当前中国大力推进生态文明建设的背景下, 生态质量评价是掌握生态状况、治理生态的基础, 也是一项系统性、综合性的研究工作。定期开展生态质量评价可及时了解区域生态变化情况并发现存在的问题, 为科学制定生态保护和修复政策提供科学依据。

目前, 国内外在不同的空间尺度上开展生态质量评价的研究较多, 生态质量评价已成为地理学、

生态学研究热点(潘竟虎和潘发俊, 2018)。在框架体系方面, 较为成熟的有联合国环境规划署和经济合作与发展组织部门发展的压力—状态—响应(PSR)模型, 该模型是反映可持续发展机理的概念框架, 具有非常清晰的因果关系(Das等, 2020)。也有学者认为生态系统质量评价的目标就是实现生态健康。Costanza(1992)提出的活力—组织—恢复力模型(VOR)考虑结构组织和活力, 以反映生态系统结构和功能, 而恢复能力对于反映从扰动中恢复的能力, 在不同区域尺度的生态健康评价中得到广泛应用(Li等, 2013; Lu等, 2015; Xiao等, 2019)。在综合多指标评价方法方面, 应用较多的有主成分分析、模糊评判法、层次分析法、综合指数法等方法(李崧等, 2006; 厉彦玲, 2007; Wang等, 2018), 这些方法为不同区域类型的生态质量评价提供了更多思路。

收稿日期: 2021-04-06; 预印本: 2022-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFB3901102)

第一作者简介: 高吉喜, 研究方向为区域生态学。E-mail: gix@nies.org

遥感技术作为一种对地观测手段,在描述宏观生态状况方面,具有客观、直观、一致性等优势。充分利用遥感观测的指标对生态系统进行监测和评价,对于提高评价结果质量具有重要意义。在2003年联合国启动的“千年生态系统评估”项目(Moushani等,2021),以及美国、欧盟、日本等发布的国家尺度生态系统质量评估(Palmer和Filoso,2009;Jackson等,2016;Schröter等,2016)等工作中,遥感技术均提供了土地利用/土地覆盖等重要的监测指标。中国开展的生态环境状况调查评估工作主要包括全国生态环境监测与评价(EI)(国家环境保护总局,2006)、中国西部/中东部生态状况遥感调查(王桥等,2003)、全国生态环境十年变化(2000年—2010年)遥感调查与评估中(欧阳志云等,2014),构建了以遥感数据为主体的生态系统综合调查和评估技术体系。同时,随着定量遥感技术的不断发展,遥感参数提取的精度和规范性也在逐步加强,国内外相关产品日渐增多(Wang等,2010;Kuenzer等,2014;梁顺林等,2016;吴炳方和张森,2017;Pettorelli等,2018)。已有研究提出了基于定量遥感参数的新型遥感生态指数(RSEI)(徐涵秋,2013)。国家气象局利用植被覆盖度和净初级生产力构建了气象植被质量指数,对全国、重要生态系统及重点生态工程和建设区域的植被生态质量进行评价(中国气象局,2017)。上述应用显示了定量遥感产品在区域生态环境质量评价中的巨大潜力。

因此,国内外研究面对不同需求,已建立大量生态质量评估技术体系。随着定量遥感技术和产品精度的不断提高,定量遥感参数在生态质量评价中发挥着越来越重要的作用。但目前生态质量评价指标相对复杂,缺乏快速简单且能在宏观尺度上应用的生态质量评价技术体系。本研究拟充分发挥定量遥感数据优势,基于目前已比较成熟的土地利用和植被参量遥感数据产品,构建一套表征“功能—稳定—胁迫”3个维度的生态质量遥感评价体系,并对2000年—2018年中国陆地区域(不含港澳台)生态质量进行了监测和评价,以期为区域或国家尺度生态质量评估和科学管理提供参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 生态质量遥感指数构建思路

#### 2.1.1 评价指标选择

生态系统质量反映了一定时间、空间范围内生态系统的整体或部分组分的健康状况和整体质量,具体表现在生态系统功能大小、生态系统稳定性状况、受到外界干扰后的演化,以及对人类的生存和经济社会的持续发展所造成的影响(王文杰等,2001;陈强等,2015;潘竟虎和董磊磊,2016)。生态系统功能指的是生态系统是通过物种之间、物种与环境之间,实现正常运转的能力,生态系统的功能包括能量流动、物质循环和信息传递,生产功能是生态系统基本功能,是维持生态系统自身稳定和生态系统服务的基础(冯剑丰等,2009)。因此,生产能力可反映生态系统功能。生态系统稳定性指生态系统所具有的保持或恢复自身结构和功能相对稳定的能力,主要包括抵抗力稳定性和恢复力稳定性(柳新伟等,2004)。生态胁迫是指人类活动对自然资源和生态环境构成的压力,是影响生态质量的主要因素(苗鸿等,2001)。

目前生态质量评价多以植被状况、水网密度等自然指标为主,中国优等生态区域多分布在南部地区,这虽然符合生态系统的实际状况,但更多衡量的是自然禀赋,难以反映各地保护生态的贡献。生态系统是一个整体,各地生态系统有其本身的功能,如阿拉善地区,虽然植被生产力很低,但该区域有独特的生物多样性,因此不能仅考虑生态系统功能指标,还需要考虑是否保持原有生态系统稳定性,这对于评价一个地区生态质量及保护行为或投入也极为重要。此外,生态功能和稳定性来表征生态质量有一定的滞后性,为了更早的对生态质量进行预警,所以还需要了解生态胁迫的状况。

因此,本文提出了基于“功能—稳定—胁迫”3个维度的生态质量综合指标体系。具体如下:首先,生态功能是基础,质量的好坏归根结底要对生态功能进行评价;其次,对于生态功能较低的区域,并不代表质量一定差,应考虑其稳定性;最后,对生态质量的评价应考虑人类的影响,有

助于及时采取保护修复措施。

### 2.1.2 评价指数构建

基于上述思路,本文构建的3个主要生态质量指数如下:生态功能指数,全面反映区域生态功能状况;生态稳定指数,反映生态系统变化的状况;生态胁迫指数,反映区域人类活动所带来的压力状况,具有预警意义。在计算生态质量指数前,对3个分指数利用方差膨胀系数(VIF)进行共线性分析,结果表明3个分指数VIF均 $<5$ ,不存在明显共线性。生态质量指数EQI计算公式如下:

$$EQI = W_1 \times EFI + W_2 \times ESI + (1 - W_3 \times ETI) \quad (1)$$

式中,EFI为生态系统功能指数, $W_1$ 为生态系统功能指数权重;ESI为生态系统稳定指数, $W_2$ 为生态系统稳定指数权重;ETI为生态系统胁迫指数, $W_3$ 为生态系统胁迫指数权重。生态功能、生态稳定和生态胁迫是决定生态质量的3个重要方面。根据专家建议,式中 $W_1$ 、 $W_2$ 和 $W_3$ 均设为1/3。

基于遥感数据计算生态质量指数时,可逐像元进行计算,并按照不同的统计单元进行统计分析。当逐年开展生态质量评价时,生态干扰指数主要用2000年、2010年和2018年3期土地利用数据,且逐年计算用相近年份替代,比如:2000年—2006年用2000年土地利用数据;2007年—2012年用2010年土地利用数据;2013年—2018年用2018年的土地利用数据。

## 2.2 各指标计算方法与遥感数据源选取

### 2.2.1 生态功能指数

目前有多个常用来反映植被生长状况的遥感指标,如归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)、叶面积指数(LAI)、光合有效辐射比例(FPAR)、净初级生产力(NPP)、总初级生产力(GPP)等。结合指标物理意义及数据可获取性,选取FVC、LAI和GPP的年均值作为指标,值的大小分别代表植被水平方向、垂直方向的长势和光合作用的强弱。

考虑到不同区域、不同生态系统类型的生产力差异带来的影响,本文采取分区分生态系统类型选取参照值的方法构建生态系统功能指数,分区内参照值一定程度代表该分区内生态系统顶级群落的参数值。分区以242个生态功能区作为边

界,详见图1。该分区来自2015年环境保护部和中国科学院联合发布的《全国生态功能区划(修编版)》,共分为3大类、9个类型和242个生态功能区(图1)。根据生态重要性评估,在全国范围内确定了63个重点生态功能区,占陆地总面积的49.4%(侯鹏等,2017)。

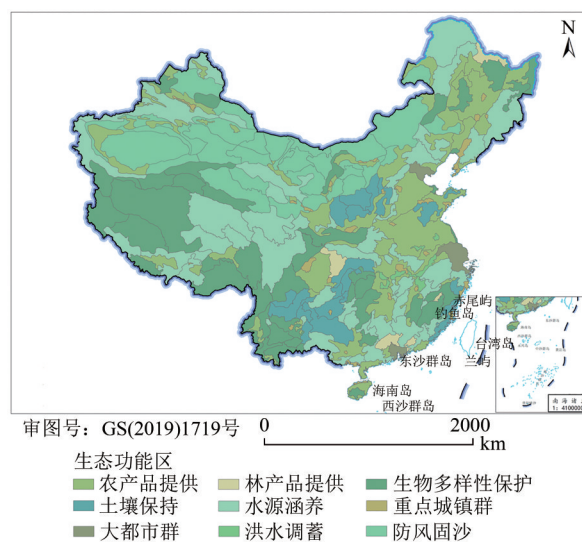


图1 全国242个生态功能区

Fig. 1 Nationwide 242 ecologically functional zones

参照值以每个分区内每个植被生态系统类型的生态参数顶级值(10%)的均值作为参照值,通过计算其他值与参照值得到的比值,值域0—1,越接近1代表该像元生态参数越接近参照值。依照此方法,对FVC、LAI和GPP分区分类型选取参照值进行计算。第*i*年份第*j*像元的生态功能指数(EFI)计算公式如下:

$$EFI_{i,j} = \frac{1}{3} \frac{FVC_{i,j}}{FVC_R} + \frac{1}{3} \frac{LAI_{i,j}}{LAI_R} + \frac{1}{3} \frac{GPP_{i,j}}{GPP_R} \quad (2)$$

式中, $EFI_{i,j}$ 为第*i*年份第*j*像元的生态系统功能指数, $FVC_{i,j}$ 、 $LAI_{i,j}$ 和 $GPP_{i,j}$ 分别为第*i*年份第*j*像元的FVC、LAI、GPP年均值, $FVC_R$ 、 $LAI_R$ 、 $GPP_R$ 分别为每个分区内每个植被生态系统类型的植被覆盖度(FVC)、叶面积指数(LAI)、总初级生产力(GPP)的参照值。本文的FVC、LAI和GPP参数数据集采用全球陆表特征参量数据产品(GLASS产品)中的2000年—2018年全国500 m叶面积指数数据集(LAI)、植被覆盖度数据集(FVC)、总初级生产力数据集(GPP)。该产品基于多源遥感数据和地面实测数据,反演得到的长时间序列、高精度的全球地表遥感产品(Liang等,

2013; 向阳等, 2014; 马培培等, 2019), 该数据产品由北京师范大学全球变化处理与分析中心发布。

### 2.2.2 生态稳定指数

系统稳定度可通过测量偏离平均态的程度来反映 (De Keersmaecker等, 2014; Lu等, 2019)。可用生态系统某个变量的变异程度来反映生态系统稳定程度, 也可通过设定系统相对稳定状态作为参照状态, 测量其他状态偏离稳定状态程度来反映系统稳定性。本文以1982年—1986年为参照值选取时间范围, 主要考虑到这个时期我国生态系统受到干扰相对较少, 生态系统相对稳定, 且为遥感最早可获取生态系统参量的时期。故本文的稳定性指数以1982年—1986年平均GPP作为参照值, 2000年—2018年GPP均值分别与参照值相减, 偏离值越大则稳定性越差。第*i*年份第*j*像元的生态稳定指数计算公式如下:

$$ESI_{i,j} = 1 - A_{i,j} \times (GPP_{i,j} - GPP_R) \quad (3)$$

式中,  $ESI_{i,j}$ 为第*i*年份第*j*像元的生态稳定指数,  $A_{i,j}$ 为归一化系数, 将结果归一化值0—1范围内,  $GPP_{i,j}$ 为第*i*年份第*j*像元的GPP值;  $GPP_R$ 为GPP参照值。

### 2.2.3 生态胁迫指数

人类对各种生态系统的利用程度不同, 对生态系统产生扰动程度不同, 因此采用遥感所得到的不同土地利用类型来计算生态胁迫指数。具体计算如下:

$$ETI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{TA} \quad (4)$$

式中,  $ETI$ 为生态胁迫指数,  $n$ 为土地利用类型的数量,  $A_i$ 为第*i*种土地利用面积,  $P_i$ 为第*i*种土地利用生态胁迫系数,  $TA$ 为总面积。关于土地利用生态胁迫系数参照已有研究的Lohani清单法、Leopold矩阵法、Delphi法 (陈浮等, 2001; 荣益等, 2017; 刘世梁等, 2018), 将以上方法确定的系数求平均值作为本文不同土地利用类型对应的生态胁迫系数, 如表1所示。采用的2000年、2010年和2018年3期土地利用数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所的全国范围陆地区域多时期土地利用数据集, 该数据集空间分辨率为30 m, 将全国土地利用划分为6个一级类、25个二

级类 (徐新良等, 2014)。

表1 不同土地利用类型的生态胁迫系数  
Table 1 Ecological stress coefficients for different land use types

土地利用类型	耕地	林地	园地	草地	湿地	建设用地	盐碱地	裸地	其他用地
生态胁迫指数	0.61	0.1	0.12	0.09	0.12	0.94	0.1	0.08	0.03

### 2.3 生态质量分级和变化趋势分析方法

根据生态质量指数计算结果, 采用等间距法将生态质量分为优(0.8—1.0)、良(0.6—0.8)、中(0.4—0.6)、低(0.2—0.4)、差(0.0—0.2)等5个等级。

趋势分析采用泰尔森 (Theil-Sen Median) 趋势分析方法和曼—肯德尔 (Mann-Kendall) 检验方法。由于通过线性回归计算趋势度是要求时间序列数据符合正态分布, 且容易受噪音干扰, 而sen趋势度可以很好的减少噪音的干扰, 并结合Mann-Kendall检验能很好的判断长时间序列数据的变化趋势。Sen趋势度的计算方法如下:

$$\beta = \text{mean} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (5)$$

式中,  $x_j$ 和 $x_i$ 为时间序列数据。 $\beta > 0$ 表示时间序列呈现上升趋势;  $\beta < 0$ 表示时间序列呈现下降趋势,  $\beta = 0$ 表示较为稳定。

Mann-Kendall是一种非参数检验方法, 无需样本服从一定的分布, 也不易受异常值的干扰, 在长时间序列数据趋势显著检验中得到十分广泛的应用。对于序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 检验统计量 $S$ 计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

当 $n > 10$ 时,  $S$ 近似正态分布, 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ , 使用检验统计量 $Z$ 进行趋势检验,  $Z$ 值计算如下:

$$Z = \begin{cases} S/\sqrt{\text{Var}(S)} & (S > 0) \\ 0 & (S) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (8)$$

采用双边检验, 在给定的显著性水平下,  $Z_{1-\alpha/2}$  为临界值, 当  $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$  时, 接受原假设, 即趋势不显著; 若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时, 则拒绝原假设, 即认为趋势显著。

本文中逐像元计算 sen 趋势度并采用检验统计量  $Z$  来进行趋势检验, 检验中显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。当  $\beta > 0$  且  $|Z| > 1.96$  则表明序列呈显著增加, 当  $\beta > 0$  且  $|Z| \leq 1.96$  则表明序列增加但不显著, 为轻微增加; 当  $\beta < 0$  且  $|Z| > 1.96$  则表明序列呈显著减少, 当  $\beta < 0$  且  $|Z| \leq 1.96$  则表明序列减少但不显著, 为轻微减少; 当  $\beta = 0$

则表明序列较为稳定。

### 3 全国生态质量评价应用

#### 3.1 生态质量状况

生态质量指数反映了生态系统整体质量状况, 2018年全国生态质量指数为0.63 (图2(a)), 全国生态质量以中低级为主, 其中全国优等生态质量所占比例为17.65%, 良级生态质量所占比例为19.24%, 中级生态质量所占比例为29.55%, 低级生态质量所占比例为29.23%, 差级生态质量所占比例为4.33% (图2(b))。

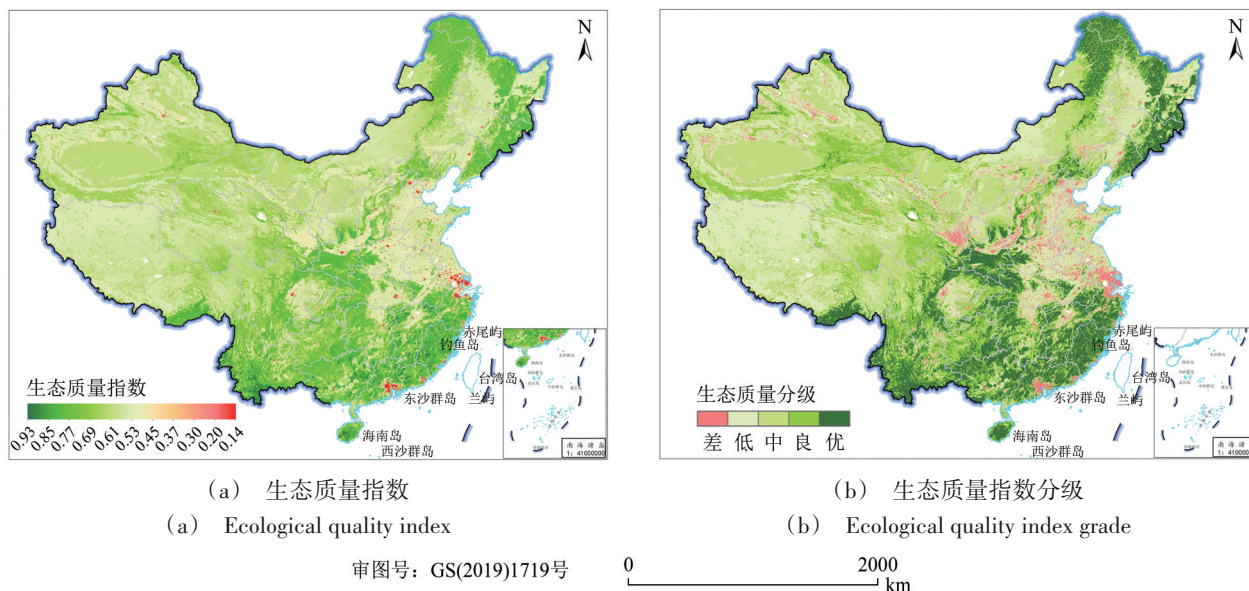


图2 2018年全国生态质量指数及分级

Fig.2 National ecological quality index and grade in 2018

生态质量高值(优级)主要分布在大小兴安岭、长白山、秦岭、六盘山—子午岭、南方丘陵地区、云南和西藏南部部分地区。从生态功能、生态稳定和系统胁迫来看(图3), 生态质量高值区生态功能较高, 生态质量指数与生态功能指数、生态稳定指数为正相关关系, 相关系数为0.64和0.44, 和生态胁迫指数为负相关, 相关系数为0.70。生态质量高值区大多为国森林生态系统主要分布区且大部分为重要生态屏障区, 是维护国家生态安全的关键区域, 因此, 在这些区域需持续开展生态保护修复, 保持生态功能稳定, 减少人类活动干扰, 提高生态质量。

生态质量低值(差级)区域主要分布在华北、华东、关中、兰州—西宁、珠江三角洲以及新疆

北部城镇集中区域(图2), 平均生态质量指数为0.12, 这些区域生态系统生产力较低, 生态功能指数仅为0.12, 生态胁迫程度较高, 胁迫指数达到了0.79, 生态系统稳定性较差, 为0.42(图3)。生态质量低值区域基本上与中国主要城市群分布基本一致, 城镇化发展挤占生态空间, 生态质量相对较低, 因此这些区域要维持生态质量稳定提升, 要合理管控国土空间开发, 防止城镇化无序扩张, 提升人居环境。

生态质量中级主要分布在中国干旱、半干旱区, 处于农牧、林牧、农林等复合交错带(图2(b)), 为中国主要生态脆弱区, 这些区域受自然环境限制, 为生态功能相对较低, 为0.52, 生态系统稳定性较差, 对环境变化反应相对敏感, 容易受到

外界干扰发生退化演替, 而且生态系统自我修复能力较弱, 生态恢复时间较长, 因此需要以生态脆弱区资源禀赋和生态环境承载力为基础, 因地

制宜, 科学规划, 采取合适的保育措施, 加强生态保护监督管理, 减少人为活动无序扩张对生态系统干扰, 稳固提升生态质量。

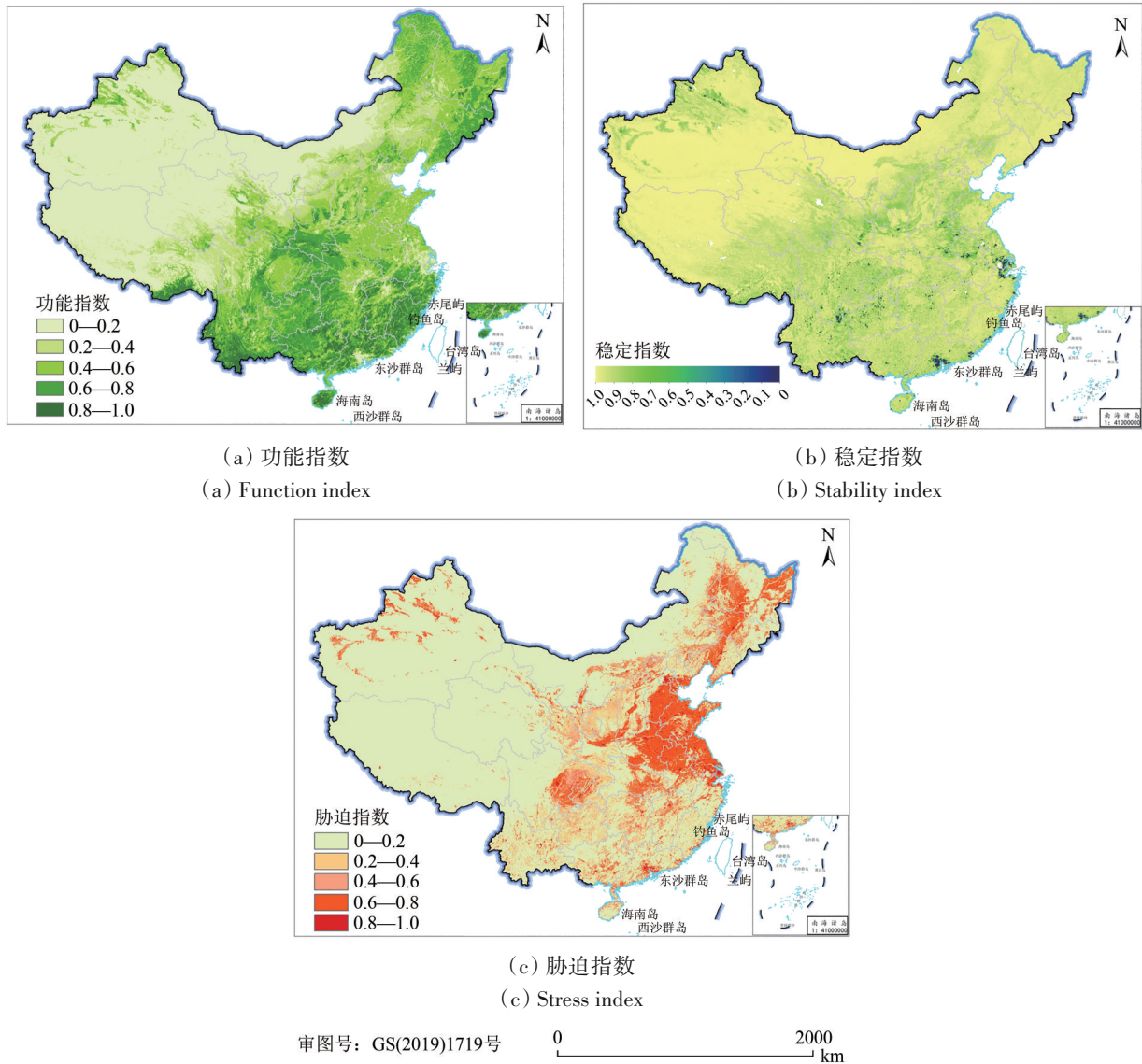


图3 2018年生态空间分布  
Fig. 3 Distribution of ecological in 2018

从全国各省生态质量状况来看(图4(a)), 生态质量指数排名前5位的省(市)主要分布中国长江以南地区, 分别为福建、海南、广西、云南和江西, 生态质量指数均在0.7以上, 生态功能指数在0.6以上(图4(b)), 生态稳定指数在0.7以上(图4(c)), 生态胁迫指数低于0.3(图4(d)), 由此可见, 这几个省生态系统功能稳定、生态系统所受人类活动影响较小, 生态质量整体为优。生态质量指数排名靠后的5个省(市)为上海、天津、江苏、山东和宁夏(图4(a)), 生态质量指数

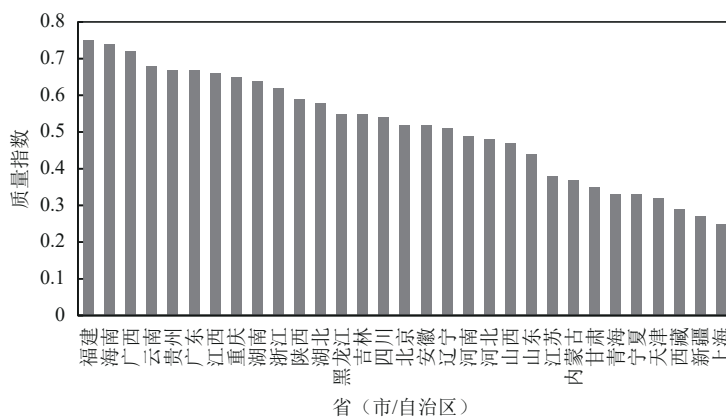
分别为0.44、0.51、0.52、0.56、0.56, 生态系统功能指数低于0.45(图4(b)), 生态胁迫指数除宁夏外, 均高于0.5(图4(d))。

### 3.2 生态质量变化

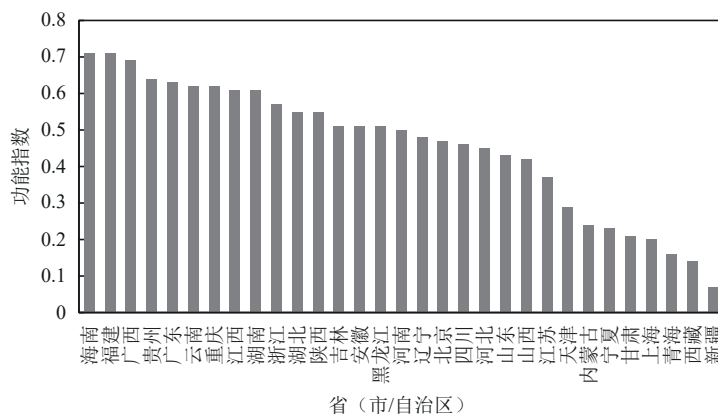
从2000年—2018年全国生态质量变化来看(图5(a)), 全国生态质量指数呈明显波动上升趋势, 2000年—2011年生态质量指数变化较为平缓, 2011年之后生态质量指数呈明显上升趋势。全国53.97%的区域生态质量呈增加趋势, 其中25.65%

区域生态质量呈明显上升趋势，主要分布在黄土高原、青海东部和甘肃河西、河北张家口和承德、云贵高原等地区（图5(b)）。全国28.12%区域生态质量呈退化趋势，主要分布在华东、华中城市群、东北等地区（图5(b)）。从2000年—2018年各省份生态质量变化趋势来看（表2），生态质量呈上升趋势所占比例超过70%的省（市/自治区）

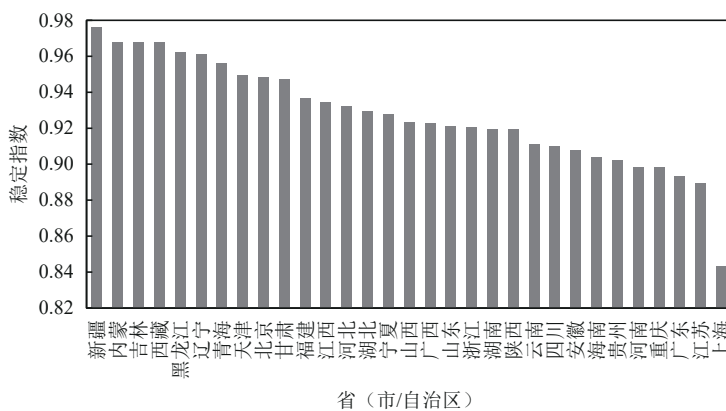
为海南、云南、广西、广东、福建、贵州、江西、重庆、山西，其中海南、云南、广西上升趋势所占比例超过80%，说明这些省份生态质量改善趋势明显；江苏、上海、天津、吉林生态质量呈下降趋势比例超过50%，其中江苏生态质量呈下降趋势比例超过60%。



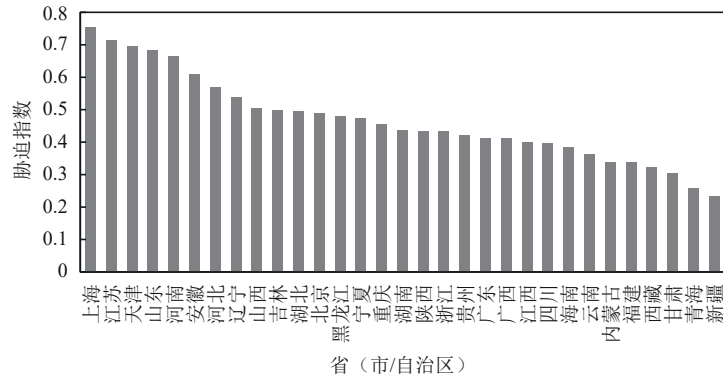
(a) 生态质量指数  
(a) Ecological quality index



(b) 生态功能指数  
(b) Ecological function index



(c) 生态稳定指数  
(c) Ecological stability index

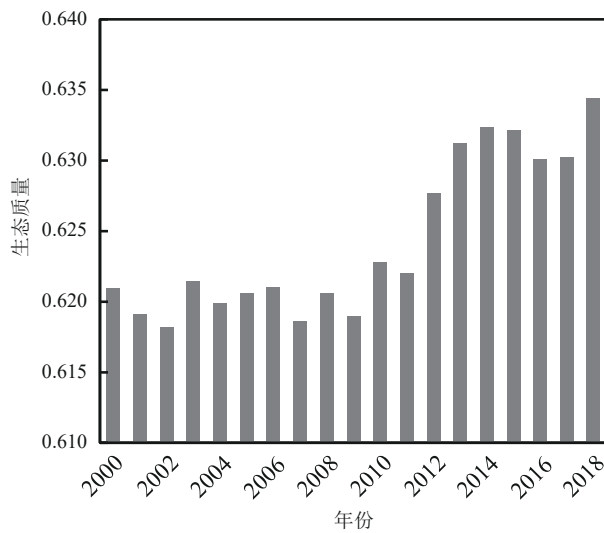


(d) 生态胁迫指数

(d) Ecological stress index

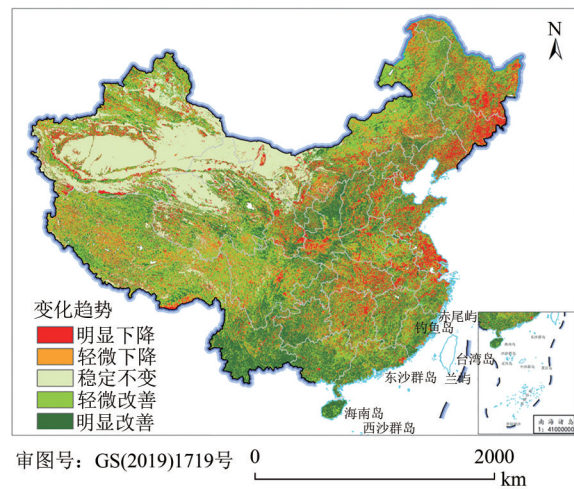
图4 2018年全国各省(市)生态质量指数、生态功能指数、生态稳定指数和生态胁迫指数

Fig.4 Ecological quality index, ecological function index, ecological stability index and ecological stress index in provincial-level administrative regions of China in 2018



(a) 生态质量

(a) Ecological quality index



(b) 生态质量指数变化趋势

(b) Spatial patterns of trends in ecological quality index

图5 2000年—2018年全国生态质量指数变化

Fig.5 Changes in the national ecological quality index from 2000 to 2018

表2 2000年—2018年各省生态质量不同变化趋势等级所占比例

Table 2 Proportion of ecological quality change trend grades in each province from 2000 to 2018

省份	不同变化趋势等级所占比例/%				
	明显下降	轻微下降	稳定不变	轻微升高	明显升高
安徽省	16.71	26.34	0.07	33.16	23.73
北京市	14.32	22.47	0.20	29.60	33.42
福建省	6.94	16.25	0.12	37.48	39.20
甘肃省	9.01	12.59	39.79	16.45	22.16
广东省	6.55	14.44	0.74	34.30	43.97
贵州省	5.85	17.79	0.04	24.56	51.76



续表

省份	不同变化趋势等级所占比例/%				
	明显下降	轻微下降	稳定不变	轻微升高	明显升高
河南省	11.47	25.01	0.03	35.81	27.68
湖北省	19.30	29.59	0.02	27.64	23.44
湖南省	14.08	27.73	0.32	33.63	24.22
吉林省	26.63	26.57	1.02	24.09	21.70
江苏省	35.42	27.79	0.12	21.28	15.40
江西省	7.96	17.31	0.92	35.96	37.85
辽宁省	24.43	25.28	0.20	24.25	25.84
宁夏回族自治区	16.72	18.84	10.55	20.57	33.31
青海省	7.44	13.28	33.16	24.69	21.43
山东省	18.63	22.13	0.57	27.24	31.43
山西省	10.13	18.28	0.53	22.50	48.56
陕西省	10.20	19.16	1.30	20.83	48.52
上海市	25.36	34.50	0.06	26.05	14.03
四川省	5.21	22.42	3.18	42.20	26.98
浙江省	16.15	19.88	0.10	34.87	29.00
重庆市	7.55	20.73	0.04	31.93	39.75
海南省	1.63	3.58	0.52	20.05	74.21
天津市	27.06	27.08	1.43	23.79	20.65
内蒙古自治区	8.57	18.99	21.86	31.05	19.53
新疆维吾尔自治区	6.91	10.71	54.22	17.32	10.84
西藏自治区	6.38	23.64	9.90	39.59	20.48
云南省	3.87	11.73	0.50	24.74	59.17
广西壮族自治区	4.20	13.17	0.30	31.67	50.66
黑龙江省	16.88	26.93	0.27	31.27	24.65
河北省	15.58	23.02	0.30	29.54	31.57

从生态功能指数变化来看(图6(a)), 2000年—2018年全国生态系统功能呈现改善趋势, 明显改善的地区主要为华中地区和西南地区, 明显退化的地区主要为华东地区、华中地区以及东北地区。其中, 功能明显改善的区域占19.76%, 轻微改善的区域占29.37%, 稳定不变的区域占21.59%, 轻微退化的区域占21.30%, 明显退化的区域占7.98%。

从生态稳定指数变化来看(图6(b)), 全国65%的区域生态系统稳定在增强, 其中13%的区域显著增强, 稳定增强区域主要分布在南方热带亚热带森林区、东北温带落叶阔叶林区和华北地区农田区, 生态系统稳定减弱区域主要分布在黄土高原、

北方农牧交错带和城镇化水平较高的区域。从各省稳定指数变化来看, 稳定指数增强所占比例较高的省(市/自治区)为河南、浙江、福建、安徽和黑龙江, 这些省份稳定性增强比例超过70%, 稳定性减弱趋势所占比例较高的省(市/自治区)为宁夏、北京、山西、陕西甘肃, 减弱趋势所占比例超过50%。

从生态胁迫变化来看(图7), 2000年、2010年全国生态系统胁迫指数为0.205、0.208, 相比2018年生态系统胁迫指数呈轻微增加。全国13个省(市/自治区)生态系统胁迫呈增长趋势, 增长最为明显为城市化进程较快的上海、江苏、天津和山东等省(市/自治区), 而广大西部地区生态系统胁迫指数相对稳定。

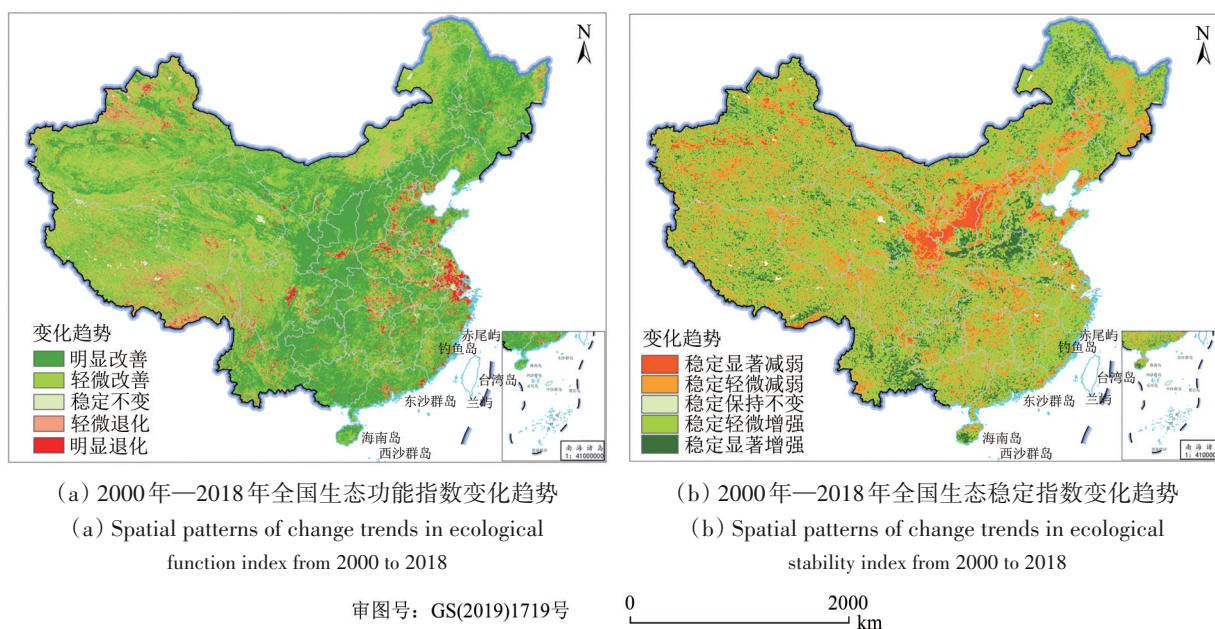


图6 2000年—2018年生态功能指数和稳定指数变化趋势

Fig.6 Spatial patterns of change trends in ecological function index and stability index from 2000 to 2018

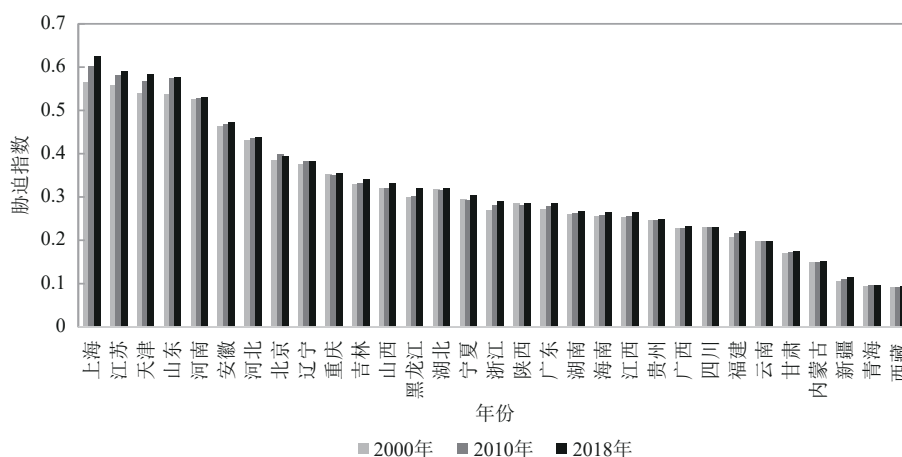


图7 2000年、2010年、2018年全国各省生态系统胁迫指数

Fig. 7 Changes in ecological stress index in 2000, 2010 and 2018

## 4 结论

本文从大尺度生态质量快速评价的需求出发, 构建了以遥感数据为主要数据源的生态质量评价体系, 并应用该指标体系对中国陆地区域(不含港澳台)生态质量进行了评价。结果表明: (1) 该指标体系依据生态学理论, 从生态系统功能、稳定、胁迫3个维度对生态系统质量进行评价, 并且利用目前成熟的植被遥感参量和土地利用数据, 计算方法相对简单易操作, 可实现国家和区域尺度生态质量的快速评价; (2) 2018年全国生态质量整体状况良好, 生态质量中等以上比例达到了

36.98%, 差等生态质量仅占4.33%; (3) 2000年—2018年全国53.97%的区域生态质量呈改善趋势, 2011年之后改善趋势更为明显, 28.12%区域生态质量呈下降趋势。2000年—2018年全国60.25%区域生态功能指数呈增加趋势, 65%的区域生态系统稳定性在增强, 生态系统胁迫指数整体呈增强趋势, 部分区域有所下降。

本文提出的生态质量遥感评价体系可服务于面向业务化运行的国家尺度生态质量遥感评价。但是, 该评价指标体系涉及的指标均为基于遥感数据获取的指标, 也存在一些不足, 主要体现在以下5个方面: (1) 反映生态系统功能指标只用了

植被方面的指标,并未考虑生态系统其他相关指标,如生态系统环境相关指标,未来可根据评价需求,进一步补充生态系统调节功能的指标;(2)从生态学的角度来看,生态系统稳定性是一个多维概念,它反映生态系统稳定状态和从环境干扰中恢复的能力。目前生态系统稳定性通常从生态系统阻力、弹性和变异3个方面测度,本文稳定性方法只考虑生态系统变异性,还需进一步完善生态系统稳定测量的指标和方法;(3)生态系统功能指数采取分区生态系统类型选取参照值的方法,目前参照值基于遥感数据而来,随着地面数据收集和积累,可联合地面观测数据选取分区更具有代表的顶级群落值作为生态系统功能评估的参照值;(4)生态干扰指数目前主要为人为干扰,对于自然干扰考虑不是很足,为更全面反映生态系统受到干扰,在数据和方法成熟条件下两方面均应在评价体系中考考虑;(5)生态系统功能、稳定和胁迫共同决定生态系统质量的高低,3个在生态质量中的贡献大小目前还没有定论,本文根据专家建议,认为3个方面对生态质量同等重要,随着后续相关理论和技术发展,3个指数的构成及权重可进一步优化。

随着遥感数据产品的发展,未来将陆续将成熟的遥感产品应用于生态质量的评价,进一步加强天地协同,开展基于大数据的生态质量评价,服务于生态文明建设。

## 参考文献(References)

- Chen F, Ge X P, Chen G and Peng B Z. 2001. Spatial different analysis of landscape change and human impact in urban fringe. *Scientia Geographica Sinica*, 21(3): 210-216 (陈浮,葛小平,陈刚,彭补拙. 2001. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究. *地理科学*, 21(3): 210-216) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2001.03.004]
- Chen Q, Chen Y H, Wang M J, Jiang W G, Hou P and Li Y. 2015. Ecosystem quality comprehensive evaluation and change analysis of Dongting Lake in 2001-2010 based on remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 35(13): 4347-4356 (陈强,陈云浩,王萌杰,蒋卫国,侯鹏,李营. 2015. 2001年—2010年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析. *生态学报*, 35(13): 4347-4356) [DOI: 10.5846/stxb201403250557]
- China Meteorological Administration. 2017. GB/T 34815—2017 Meteorological evaluating index of vegetation ecological quality. Beijing: Standards Press of China (中国气象局. 2017. GB/T 34815—2017 植被生态质量气象评价指数. 北京: 中国标准出版社)
- Costanza R. 1992. Toward an operational definition of ecosystem health//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington: Island Press: 239-259
- Pan J H, Pan F J. 2018. *Regional Ecosystem Quality and Ecosystem Service Assessment—A Case Study of Gansu Province*. Beijing: Science Press (潘竟虎,潘发俊. 2018. 区域生态系统质量与生态系统服务评估——以甘肃省为例. 北京:科学出版社)
- Das S, Pradhan B, Shit P K and Alamri A M. 2020. Assessment of wetland ecosystem health using the pressure-State-Response (PSR) model: a case study of Mursidabad District of West Bengal (India). *Sustainability*, 12(15): 5932 [DOI: 10.3390/su12155932]
- De Keersmaecker W, Lhermitte S, Honnay O, Farifteh J, Somers B and Coppin P. 2014. How to measure ecosystem stability? An evaluation of the reliability of stability metrics based on remote sensing time series across the major global ecosystems. *Global Change Biology*, 20(7): 2149-2161 [DOI: 10.1111/gcb.12495]
- Ding Q, Wang L, Fu M C and Huang N. 2020. An integrated system for rapid assessment of ecological quality based on remote sensing data. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26): 32779-32795 [DOI: 10.1007/s11356-020-09424-6]
- Feng J F, Li Y, Zhu L. 2009. Discrimination of concepts of ecosystem functions and ecosystem services. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(4): 1599-1603 (冯剑丰,李宇,朱琳. 2009. 生态系统功能与生态系统服务的概念辨析. *生态环境学报*, 18(4): 1599-1603) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2009.04.066]
- Hou P, Yang M, Zhai J, Liu X M, Wan H W, Li J, Cai M Y, Liu H M. 2017. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern. *Geographical Research*, 36(3): 420-428 (侯鹏,杨旻,翟俊,刘晓曼,万华伟,李静,蔡明勇,刘慧明. 2017. 论自然保护区与国家生态安全格局构建. *地理研究*, 36(3): 420-428) [DOI:10.11821/dlxy201703002]
- Jackson S T, Duke C S, Hampton S E, Jacobs K L, Joppa L N, Kassam K A S, Mooney H A, Ogden L A, Ruckelshaus M and Shogren J F. 2016. Toward a national, sustained U.S. ecosystem assessment. *Science*, 354(6314): 838-839 [DOI: 10.1126/science.aah5750]
- Kuenzer C, Ottinger M, Wegmann M, Guo H D, Wang C L, Zhang J Z, Dech S and Wikelski M. 2014. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks. *International Journal of Remote Sensing*, 35(18): 6599-6647 [DOI: 10.1080/01431161.2014.964349]
- Li S, Qiu W, Zhao Q L and Liu Z M. 2006. Applying analytical hierarchy process to assess eco-environment quality of Heilongjiang province. *Environmental Science*, 27(5): 1031-1034 (李崧,邱微,赵庆良,刘正茂. 2006. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究. *环境科学*, 27(5): 1031-1034) [DOI: 10.13227/j.hjxk.2006.05.039]
- Li Y L. 2007. Ecological environment quality comprehensive evaluation model based on grey clustering. *Science of Surveying and Mapping*, 32(5): 77-79 (厉彦玲. 2007. 基于灰色聚类分析方法的生态环境质量综合评价模型. *测绘科学*, 32(5): 77-79) [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2007.05.028]
- Li Y Y, Dong S K, Wen L, Wang X X and Wu Y. 2013. Three-dimen-

- sional framework of vigor, organization, and resilience (VOR) for assessing rangeland health: a case study from the alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *EcoHealth*, 10(4): 423-433 [DOI: 10.1007/s10393-013-0877-8]
- Liang S L, Cheng J, Jia K, Jiang B, Liu Q, Liu S H, Xiao Z Q, Xie X H, Yao W Y J, Yuan W P, Zhang X T and Zhao X. 2016. Recent progress in land surface quantitative remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 875-898 (梁顺林, 程洁, 贾坤, 江波, 刘强, 刘素红, 肖志强, 谢先红, 姚云军, 袁文平, 张晓通, 赵祥. 2016. 陆表定量遥感反演方法的发展新动态. *遥感学报*, 20(5): 875-898) [DOI: 10.11834/jrs.20166258]
- Liang S L, Zhao X, Liu S H, Yuan W P, Cheng X, Xiao Z Q, Zhang X T, Liu Q, Cheng J, Tang H R, Qu Y H, Bo Y C, Qu Y, Ren H Z, Yu K and Townshend J. 2013. A long-term Global Land Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies. *International Journal of Digital Earth*, 6(sup1): 5-33 [DOI: 10.1080/17538947.2013.805262]
- Liu S L, Liu L M, Wu X, Hou X Y, Zhao S and Liu G H. 2018. Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies. *Acta Ecologica Sinica*, 38(19): 6797-6809 (刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 2018. 区域生态效应研究中人类活动强度定量化评价. *生态学报*, 38(19): 6797-6809) [DOI: 10.5846/stxb201711172048]
- Liu X W, Zhou H C, Li P and Peng S L. 2004. A conceptual analysis of ecosystem stability. *Acta Ecologica Sinica*, 24(11): 2635-2640 (柳新伟, 周厚诚, 李萍, 彭少麟. 2004. 生态系统稳定性定义剖析. *生态学报*, 24(11): 2635-2640) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.11.042]
- Liu Q, Zhao D S, Wu S H, Dai E F and Gao J B. 2019. Using the NDVI to analyze trends and stability of grassland vegetation cover in Inner Mongolia. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3): 1629-1640 [DOI: 10.1007/s00704-018-2614-2]
- Lu Y L, Wang R S, Zhang Y Q, Su H Q, Wang P, Jenkins A, Ferrier R C, Bailey M and Squire G. 2015. Ecosystem health towards sustainability. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(1): 1-15. [DOI: 10.1890/EHS14-0013.1]
- Ma P P, Li J, Liu Q H, He B B and Zhao J. 2019. Multisensor synergistic quantitative leaf area index product of China. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1232-1252 (马培培, 李静, 柳钦火, 何彬彬, 赵静. 2019. 中国区域MuSyQ叶面积指数产品验证与分析. *遥感学报*, 23(6): 1232-1252) [DOI: 10.11834/jrs.20198071]
- Martinez-Haro M, Beiras R, Bellas J, Capela R, Coelho J P, Lopes I, Moreira-Santos M, Reis-Henriques A M, Ribeiro R, Santos M M and Marques J C. 2015. A review on the ecological quality status assessment in aquatic systems using community based indicators and ecotoxicological tools: What might be the added value of their combination?. *Ecological Indicators*, 48: 8-16 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.07.024]
- Miao H, Wang X K, Ouyang Z Y. 2001. Study on regionalization of eco-environmental stress process in China. *Acta Ecologica Sinica*, 21(1): 7-13 (苗鸿, 王效科, 欧阳志云. 2001. 中国生态环境胁迫过程区划研究. *生态学报*, 21(1): 7-13) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.01.002]
- Moushani S, Kazemi H, Klug H, Asadi M E and Soltani A. 2021. Ecosystem service mapping in soybean agroecosystems. *Ecological Indicators*, 121: 107061 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107061]
- Ouyang Z Y, Wang Q, Zheng H, Zhang F and Hou P. 2014. National ecosystem survey and assessment of China (2000-2010). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 29(4): 462-466. (欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 2014. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 29(4): 462-466) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.04.009]
- Patzold A, Warren P H and Maltby L L. 2010. A framework for assessing ecological quality based on ecosystem services. *Ecological Complexity*, 7(3): 273-281 [DOI: 10.1016/j.ecocom.2009.11.003]
- Palmer M A and Filoso S. 2009. Restoration of ecosystem services for environmental markets. *Science*, 325(5940): 575-576. [DOI: 10.1126/science.1172976]
- Pan J H and Dong L L. 2016. Comprehensive evaluation of ecosystem quality in the Shule River basin, Northwest China from 2001 to 2010. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(9): 2907-2915 (潘竞虎, 董磊磊. 2016. 2001—2010年疏勒河流域生态系统质量综合评价. *应用生态学报*, 27(9): 2907-2915) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.201609.015]
- Pettorelli N, To Bühne H S, Tulloch A, Dubois G, Macinnis-Ng C, Queirós A M, Keith D A, Wegmann M, Schrodt F, Stellmes M, Sonnenschein R, Geller G N, Roy S, Somers B, Murray N, Bland L, Geijzendorffer I, Kerr J T, Broszeit S, Leitão P J, Duncan C, El Serafy G, He K S, Blanchard J L, Lucas R, Mairota P, Webb T J and Nicholson E. 2018. Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2): 71-93 [DOI: 10.1002/RSE2.59]
- Rong Y, Li C, Xu C and Yan Y. 2017. Ecosystem service values and spatial differentiation changes during urbanization: a case study of Huanghua City. *Chinese Journal of Ecology*, 36(5): 1374-1381 (荣益, 李超, 许策, 严岩. 2017. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异——以黄骅市为例. *生态学杂志*, 36(5): 1374-1381) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201705.001]
- Schröter M, Albert C, Marques A, Tobon W, Lavorel S, Maes J, Brown C, Klotz S and Bonn A. 2016. National ecosystem assessments in Europe: a review. *BioScience*, 66(10): 813-828 [DOI: 10.1093/biosci/biw101]
- State Environmental Protection Administration. 2006. HJ/T 192-2006 Technical criterion for eco-environmental status evaluation. 北京: China Environmental Science Press (国家环境保护总局. 2006. HJ/T 192-2006 (生态环境状况评价技术规范(试行)). 北京: 中国环境科学出版社)
- Tian J L. 2013. Summary of research on regional ecological environment quality evaluation. *Environmental Protection and Circular Economy*, 33(11): 63-66 (田佳良. 2013. 区域生态环境质量评价研究综述. *环境保护与循环经济*, 33(11): 63-66)
- Wang F Q, Yang H, Zhao H and Kang P P. 2018. Ecological effect

- evaluation of water diversion in the Yellow River delta wetland. *Water Policy*, 20(4): 744-757 [DOI: 10.2166/wp.2018.166]
- Wang K, Franklin S E, Guo X L and Cattet M. 2010. Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: a review from the perspective of remote sensing specialists. *Sensors*, 10(11): 9647-9667 [DOI: 10.3390/s101109647]
- Wang Q, Wang W J, Zhen B H, Liu Y P, Zhang L B, Wei B and Shen W M. 2003. The remote sensing investigation of eco-environmental status in Western China. *Journal of Remote Sensing*, 7(6): 490-497 (王桥, 王文杰, 郑丙辉, 刘玉平, 张林波, 魏斌, 申文明). 2003. 中国西部地区生态环境现状遥感调查. *遥感学报*, 7(6): 490-497 [DOI: 10.11834/jrs.20030610]
- Wang W J, Pan Y Z and Li X. 2001. Basic indicator selection framework on regional ecological quality assessment in China. *Environmental Monitoring in China*, 17(5): 17-21 (王文杰, 潘英姿, 李雪). 2001. 区域生态质量评价指标选择基础框架及其实现. *中国环境监测*, 17(5): 17-21 [DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2001.05.007]
- Wu B F and Zhang M. 2017. Remote sensing: observations to data products. *Acta Geographica Sinica*, 72(11): 2093-2111 (吴炳方, 张森). 2017. 从遥感观测数据到数据产品. *地理学报*, 72(11): 2093-2111 [DOI: 10.11821/dlxb201711013]
- Xiang Y, Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D and Song J L. 2014. Validation of global land surface satellite (GLASS) leaf area index product. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 573-596 (向阳, 肖志强, 梁顺林, 王锦地, 宋金玲). 2014. GLASS叶面积指数产品验证. *遥感学报*, 18(3): 573-596 [DOI: 10.11834/jrs.20143117]
- Xiao R, Yu X Y, Shi R X, Zhang Z H, Yu W X, Li Y S, Chen G and Gao J. 2019. Ecosystem health monitoring in the Shanghai-Hangzhou Bay Metropolitan Area: a hidden Markov modeling approach. *Environment International*, 133: 105170 [DOI: 10.1016/j.envint.2019.105170]
- Xu H Q. 2013. A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 33(24): 7853-7862 (徐涵秋). 2013. 城市遥感生态指数的创建及其应用. *生态学报*, 33(24): 7853-7862 [DOI: 10.5846/stxb201208301223]
- Xu X L, Pang Z G and Yu X F. 2014. *Spatial-Temporal Pattern Analysis of Land Use/Cover*. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press (徐新良, 庞志国, 于信芳). 2014. *土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用*. 北京: 科学技术文献出版社

## New framework for large-scale ecological quality evaluation and application research using remote sensing data

GAO Jixi, WAN Huawei, WANG Yongcai, HOU Peng, SHI Peirong, SUN Chenxi

*Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China*

**Abstract:** Ecosystem is the foundation of human survival and sustainable development. Ecological quality evaluation will provide a scientific basis for formulating policies aimed at ecological protection and restoration, which further promote the construction of an ecological civilization.

We constructed a remote sensing evaluation framework for ecological quality. This framework consists of “function-stability-stress” in three dimensions. Then, we used remote sensing data, such as vegetation parameters and land use, to monitor and evaluate the terrestrial ecological quality from 2000 to 2018.

The overall ecological quality of the country was in good condition in 2018, with approximately 36.98% of the ecological quality above average and only 4.33% indicating poor ecological quality. Fujian, Hainan, Guangxi, and other provinces showed the best ecological quality. From 2000 to 2018, 53.97% of the area ecological quality showed an improvement trend, and the improvement trend was more obvious after 2011. The ecological quality situation in some regions nationwide is still severe. These areas have low ecosystem function, poor ecosystem stability, and high ecosystem stress.

By summarizing the results of the national ecological quality assessment, we can observe that the ecological quality evaluation framework is scientific, simple, fast, and economically feasible. Thus, it can meet the requirements of a rapid assessment of regional or national ecosystem quality.

**Key words:** ecosystem quality assessment, remote sensing, ecosystem function, ecosystem stability, ecosystem stress

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3901102)