

DOI: 10.5846/stxb202106081518

张梦宇, 张黎, 何洪林, 任小丽, 牛忠恩, 吕妍, 徐茜, 常青青, 刘卫华, 李攀. 基于参照系的中国陆地生态系统质量变化研究. 生态学报, 2021, 41(18): 7100-7113.

Zhang M Y, Zhang L, He H L, Ren X L, Niu Z E, Lü Y, Xu Q, Chang Q Q, Liu W H, Li P. Quality changes of China's terrestrial ecosystem based on reference system. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7100-7113.

基于参照系的中国陆地生态系统质量变化研究

张梦宇^{1, 2, 3}, 张黎^{1, 2, 4, *}, 何洪林^{1, 2, 4}, 任小丽^{1, 2}, 牛忠恩^{1, 2, 3}, 吕妍^{1, 2, 3},
徐茜^{1, 2, 3}, 常青青^{1, 2, 3}, 刘卫华^{1, 2, 3}, 李攀⁵

1 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 国家生态科学数据中心, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

5 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

摘要:提升生态系统质量(ESQ)是国家生态文明建设的重大需求和生态治理工程的最终目标。目前有关生态系统功能、健康和质量的评估以受气候主导的现实值为主,不同地区之间评价结果的可比性较低,难以满足国家生态系统管理的需求。采用基于参照系的生态系统质量评估框架,按照由中国生态地理分区和植被类型划分出的 168 个评估单元,以国家自然保护区核心区、中国生态系统研究网络(CERN)永久观测样地以及生产力主要受气候影响的区域等较少受人类活动干扰且生态系统结构和功能优良的生态系统作为参照系,评估了 1990—2015 年基于参照系的中国陆地生态系统质量(ESQ')及其变化情况。结果表明:与参照生态系统相比,中国陆地生态系统质量指数平均值总体偏低 28%。1990—2000 年和 2000—2015 年 ESQ' 全国平均值分别下降 1.2% 和上升 3.69%。ESQ' 转变比较明显的区域集中分布在“陕-甘-宁”的黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区、长白山地区和西南石漠化治理工程县域。在这些区域实施的退耕还林还草、防护林和石漠化治理工程等措施对提升生态系统结构、功能和稳定性发挥了重要作用,从而促使生态系统质量的改善。基于参照系的生态系统质量评估方法可以在一定程度上消除不同区域气候波动差异对质量评估的影响,为量化人类活动对生态系统的影响提供了一种可行的新途径,可为我国的生态系统和土地利用管理提供参考。建议未来加强全国不同区域、不同类型的参照生态系统联网观测,并重点关注未来气候变化及生态系统功能权衡关系对生态系统质量的影响。

关键词:参照系;生态系统质量;生态治理工程;土地利用变化;气候变化

Quality changes of China's terrestrial ecosystem based on reference system

ZHANG Mengyu^{1, 2, 3}, ZHANG Li^{1, 2, 4, *}, HE Honglin^{1, 2, 4}, REN Xiaoli^{1, 2}, NIU Zhong'en^{1, 2, 3}, LÜ Yan^{1, 2, 3},
XU Qian^{1, 2, 3}, CHANG Qingqing^{1, 2, 3}, LIU Weihua^{1, 2, 3}, LI Pan⁵

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

5 School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Improving the ecosystem quality (ESQ) is a major requirement for national ecological civilization construction

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0500204)

收稿日期:2021-06-08; 修订日期:2021-08-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: li.zhang@igsrr.ac.cn

and the ultimate goal of the ecological restoration project. However, the assessment of ecosystem function, health and quality was based on actual values of the ecological indicators dominated by climate in previous studies, and the comparability of evaluation results between different regions was too low to meet the needs of national ecosystem management. In this paper, based on a reference system-based ecosystem quality assessment framework and 168 assessment units divided by China's eco-geographical zones and vegetation types, we used ecosystems that were less disturbed by human activities and had excellent ecosystem structure and functions, such as the core area of the National Nature Reserve, the permanent observation plots of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN), and areas where productivity was mainly affected by climate as reference benchmarks, and estimated China's terrestrial ecosystem quality based on reference system (ESQ') and its changes during 1990—2015. The results show that the average value of China's terrestrial ecosystem quality index was 28% lower than that of the reference ecosystem. China's ESQ' decreased by 1.2% during 1990—2000 and increased by 3.69% during 2000—2015, respectively. The regions with obvious transformations were mainly distributed in the Shaan-Gan-Ning loess plateau hilly and gully water and soil conservation ecological function zone, Changbai Mountain and counties in the southwest of the rocky desertification control project. Ecological restoration projects such as the Grain for Green Project, shelter forests and comprehensive control of rocky desertification in these regions have played an important role in improving the structure, function and stability of the ecosystem, thereby promoting the improvement of ecosystem quality. The method of ecosystem quality assessment based on reference system can eliminate the impact of differences in climate conditions on the quality assessment between different regions to a certain extent, provide a feasible new way to quantify the impact of human activities on the ecosystem, and provide references for China's ecosystem management and land use management. We suggest that the government should strengthen the networked observations of reference ecosystems in different ecological geographic regions and different vegetation types of China in the future, and focus on the impact of future climate change and the trade-off relationship between ecosystem functions on ecosystem quality.

Key Words: reference system; ecosystem quality; ecological restoration project; land use change; climate change

生态系统质量是诊断生态系统是否健康的指标,是指在一个具体的时间和空间范围内生态系统的总体或部分生命组分的质量,主要表现在其生产能力、自我维持能力、受到外界干扰后的抗干扰能力以及对人类的生存及社会经济持续发展的影响^[1-4]。一个高质量的生态系统能够在压力下维持自身组织结构和稳定,具有自我恢复的能力^[1]。改革开放后中国人口与经济快速增长,耕地不断扩张^[5],森林和草地等生态系统发生了退化^[6-7],带来自然栖息地破坏和生态系统功能下降等生态问题^[8-10]。但自 1999 年以来中国实施了草地保护、天然林保护、退耕还林以及石漠化综合治理等工程,退化的生态系统得到一定的恢复^[11-14]。党中央在十九大报告中将生态文明提升到战略地位,要通过加大生态系统保护力度,实施重要生态系统保护和修复重大工程,以提升生态系统质量和稳定性。在当前我国土地利用需求不断增加和生态工程大规模实施的背景下,迫切需要对我国生态系统质量状况进行评估,为土地利用和生态系统可持续管理提供参考^[15]。

我国已开展一系列与生态系统质量有关的评估工作,主要包括生态系统功能评估^[16-17]、生态系统健康评估^[18]和生态环境质量评估^[19]等方面,为国家和地方生态保护政策的制定提供了科学依据。在全国层面,根据“全国生态环境十年变化(2000—2010 年)调查评估”项目研究结果,2000—2010 年间食物生产、水源涵养、土壤保持、防风固沙、洪水调蓄、固碳这 6 项生态系统服务得到明显改善,而生物多样性维护功能有所下降^[17];中国生态系统健康水平呈现从西北到东南上升的格局,水分指数和土地利用强度的贡献分别为 24.5% 和 20.7%^[18]。我国生态环境部依据生态环境状况评价技术规范(HJ 192—2015),定期发布《全国生态环境质量报告》,公布全国省域和县域生态环境状况及变化评估结果。此外,国内学者也开展了一些典型区域的生态系统质量评价方法和应用研究。对于自然生态系统,主要从生产能力、功能稳定性和人口压力^[20],植被覆盖度和叶面积指数^[21],生态系统生产能力、稳定性和承载力^[22-23]等方面评估生态系统质量。对于城市生态系

统,重点从经济、自然和社会环境质量^[24],结构、功能和胁迫^[25]等角度进行评估。对于干旱区流域水文生态系统,综合植被覆盖度、垦区土壤盐渍化率、沙漠化面积比率、水土流失强度和生态用水比率等因素建立生态系统质量框架^[26]。计算生态系统质量或健康综合指数的方法主要包括求积法^[27-28]、PSR 模型^[2, 29]、主成分分析法^[30]、层次分析法^[31]等。然而,以往有关生态系统功能、健康和质量的评估往往聚焦于生态系统指标的现实值,其数值大小在很大程度上受气候因子(如降水、温度、总辐射)和地理本底条件的差异主导^[32-33],导致不同地区评价结果的可比性较低,并且对于全国范围生态系统质量及其变化的认识仍较为缺乏,尚不足以满足国家生态系统管理的需求^[15]。

根据生态系统完整性^[4, 34-36]和稳定性^[37]理论,生态系统质量评估不仅应综合考虑一定时间、空间范围内生态系统结构、功能、稳定性特征,以及人类胁迫或干扰状况,从而反映生态系统的整体质量状态;还应分区、分类型地开展评估参照生态系统(简称参照系)的设定,使得评估结果在不同时间和空间上具有较好的可比性^[15]。由于现实世界中很难找到完全不受人类影响的理想参照系,将与待评估生态系统具有相似植被、土壤、气候条件且受人类活动影响相对较小的自然生态系统作为参照系具有较好的合理性与可行性。参照生态系统主要包括:(1)极小干扰参照状态,生态系统最大程度地保留了完整性,几乎没有人类活动;(2)历史条件参照状态,在人类干扰之前的生态系统状态;(3)最佳可达状态,在某一特定地理和气候本底条件下,生态系统所能达到的最佳状态,可以根据分位数法选取同一条件区域内一组参照点作为参照系^[38-40]。针对我国陆地生态系统特点和数据可获取性状况,将我国自然保护区核心区、中国生态系统研究网络(CERN)野外观测台站永久观测样地等较少受人类活动干扰且状态优良的生态系统作为参照系,是当前我国陆地生态系统质量评估的一种新思路^[15]。

本文利用基于参照系的生态系统质量评估方法,以中国陆地生态系统为研究对象,综合土地覆盖数据,降水、气温、总辐射的年度气候数据和生态系统生产力、固碳、水源涵养和土壤保持四项生态系统功能数据,评估1990、2000、2010、2015年四期生态系统质量,重点分析参照生态系统的的变化特征,基于参照系的中国陆地生态系统质量的空间格局,以及生态工程大规模实施前后的两个时段(即1990—2000年和2000—2015年)中国陆地生态系统质量变化特征及其归因,以期为我国生态工程的成效评估提供依据,为土地利用和生态系统管理提供支撑。

1 数据和方法

1.1 数据

1.1.1 土地覆盖数据

采用1990年、2000年、2010年、2015年空间分辨率为1 km的土地覆盖数据(ChinaCover)^[41]计算生态系统结构指数。该数据是基于国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美国陆地卫星(Landsat OLI)数据,采用面向对象的多尺度分割与变化检测的分类方法进行制图,一级地类的精度达94%。

1.1.2 环境要素数据

采用1990—2015年1 km分辨率的气候要素(年均温、年降水、年总辐射)数据分析气候因子对生态系统质量变化的影响。其中,气温和降水数据基于中国地面气候日值数据集和全球历史气候网格数据集采用ANUSPLIN软件插值计算生成^[42],总辐射数据由日照时数计算生成^[43]。根据《1:1000000 中国植被图集》和中国生态地理分区生成168个评估单元,数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

1.1.3 生态系统功能数据

1990—2015年生态系统功能指标数据由生态系统过程模型(Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and Atmosphere—Ecosystem services, CEVSA-ES^[44])模拟得到。CEVSA-ES模型模拟的NPP、NEP、土壤含水量和土壤保持量与观测数据具有较好的一致性,二者线性拟合的决定系数分别为0.96、0.81、0.47、0.52^[44]。

模拟结果的空间分辨率为 0.05°。

1.1.4 其他数据

1990—2015 年 GLASS LAI 数据^[45-46]用于分析植被生长状况,数据源自在国家地球系统科学数据中心,其空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d。本文将其计算为年最大 LAI(LAI_{max})。国家自然保护区空间分布数据(截至 2013 年 9 月)用于选取参照系,数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。CERN 野外观测台站地理位置数据从国家生态科学数据中心(http://rs.cern.ac.cn/data/initDRsearch?cid=STA_DP2011)获取。采用 1990—2015 年 1 km 分辨率的植被覆盖度数据计算生态系统结构指数,该数据是以基于 MODIS NDVI 数据,利用像元二分模型计算得到,在计算过程中利用 ChinaCover 产品对纯土壤、植被像元的 NDVI 进行了改进^[41]。

1.2 基于参照系的国家生态系统质量评价方法

根据生态系统完整性和稳定性理论^[4, 34-37],本文从生态系统结构、功能、稳定性和人类胁迫四个方面构建生态系统质量评价指标(表 1),将生态系统质量指数(Ecosystem quality Index, ESQI)表示为生态系结构指数、功能指数、稳定性指数和胁迫指数的加权和(公式 1)。ESQI 高表示人类胁迫小,生态系统景观结构优良,并具有良好且稳定的功能。

表 1 国家生态系统质量指标体系

Table 1 Indicator framework for national ecosystem quality			
一级指标 First-level indicators	二级指标 Second-level indicators	表征指标 Characterization indicators	计算方法 Calculation method
结构 Structure	生态系统结构	生态系统结构指数	(公式 2)
功能 Function	生产力	NPP 标准化指数	CEVSA-ES 模型
	固碳	NEP 标准化指数	
	水源涵养	土壤含水量标准化指数	
	土壤保持	土壤保持量标准化指数	
稳定性 Stability	功能稳定性	NPP 稳定性标准化指数	(公式 3)
胁迫 Stress	人类胁迫	人类干扰标准化指数	(公式 4)

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity; NEP: 净生态系统生产力 Net ecosystem productivity

$$ESQI = \sum_{i=1}^4 x_i \omega_i \quad (1)$$

式中, x_i 为一级指标,包括标准化结构指数、标准化功能指数、标准化稳定性指数和标准化胁迫指数。 ω_i 为对应的权重,根据熵权法计算^[47-48],分别为 0.299、0.335、0.317 和 0.048。

生态系统结构指标用生态系统结构指数(Ecosystem Structure Index, EStrI)表示,由不同土地覆盖类型覆盖率的加权和表示,参照生态环境部 2015 年发布的生态环境状况评价技术规范,森林、草地、水域湿地、耕地、建设用地、未利用地的权重分别设为 0.35、0.21、0.28、0.11、0.04 和 0.01。

$$ESTrI = \sum_{lc=1}^n f_{lc} \omega_{lc} \quad (2)$$

式中, f_{lc} 为土地覆盖类型 lc 的覆盖率, ω_{lc} 为单位面积的土地覆盖类型 lc 的权重。

生态系统功能指标由生态系统功能指数(Ecosystem Function Index, EFunI)表示,设定为四项重要生态系统功能(包括物质生产、固碳、水源涵养和土壤保持功能)指标的加权和。分别采用净初级生产力(Net primary productivity, NPP)、净生态系统生产力(Net ecosystem productivity, NEP)、土壤含水量及土壤保持量表征物质生产、固碳、水源涵养和土壤保持功能。NPP、NEP 和土壤含水量采用 min—max 标准化到 0—1 之间。由于土壤保持量呈现明显的右偏态分布,本文对其数值取对数后再采用 min—max 标准化到 0—1 之间。最后利用熵权法确定四个功能指标的权重。

生态系统稳定性指数(Ecosystem Stability Index, EStI)用待评估时间点的前十年 NPP 的时间稳定性指数

表示。该指数假设生态系统越接近长时间序列的平均状态就越稳定,能较好地综合反映生态系统的抵抗力和恢复力^[49]。考虑到中国大规模实施了生态工程并具有城市扩张的背景,生态系统具有一定的恢复或退化的趋势,本研究采用去除时间趋势后的生产力时间稳定性(公式 3)来表征中国生态系统的稳定性指数,并采用 min—max 方法将其标准化到 0—1 之间。

$$E_{staI} = \frac{\text{mean}_{\text{fun}}}{\text{std}_{\text{detrend_fun}}} \quad (3)$$

式中, mean_{fun} 为生态系统功能的多年平均值, $\text{std}_{\text{detrend_fun}}$ 为去趋势后生态系统功能的标准差。

人类胁迫指标用人类干扰指数(Human Interference Index, HII)表示,考虑每种土地覆盖类型的面积(覆盖率)及其对生态系统的干扰强度^[50-51],同时考虑周围土地类型对其干扰的距离效应^[52]。采用 min—max 标准化方法将其负向标准化到 0—1 之间。

$$HII = \sum_{i,j=0}^{10} \frac{10\sqrt{2} - D_{i,j}}{10\sqrt{2}} \times (IC_{i,j}^{\min} + (1 - LAI_{i,j}^{\text{std}}) \times (IC_{i,j}^{\max} - IC_{i,j}^{\min})) \times \begin{cases} FVC_{i,j} & \text{植被} \\ (1 - FVC_{i,j}) & \text{非植被} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $D_{i,j}$ 为待评估像元离周围第 (i,j) 个像元的距离, $IC_{i,j}^{\min}$ 和 $IC_{i,j}^{\max}$ 分别为第 (i,j) 个像元的最小和最大干扰度,参照^[51-52]进行细化调整,各土地覆盖类型的干扰度范围如下表所示。 $LAI_{i,j}^{\text{std}}$ 为标准化 LAI 指数,由年最大 LAI 采用 min—max 标准化后缩放到 0—1 之间,对于同一土地覆盖类型,当标准化 LAI 指数越大表明人类的干扰度越小。 $FVC_{i,j}$ 为植被覆盖度,当像元的土地类型为植被(如农田)时,该像元农田的覆盖率用植被覆盖度表示;当像元为非植被(如城市)时,该像元城市的覆盖度用 $(1 - \text{植被覆盖度})$ 表示。

表 2 土地覆盖类型的人类干扰度范围

Table 2 The range of human interference index of different land cover types

土地覆盖类型 Land cover type	最小干扰度 The minimum interference index	最大干扰度 The maximum interference index
交通用地、建设用地 Transportation land, Settlement	0.8	1.0
采矿场 Mining field	0.5	0.9
耕地、园地 Croplands, Orchard	0.4	0.6
绿地、人工水面 Garden, Artificial water surface	0.2	0.4
林地、温带草地、自然水面 Forest lands, Temperate grassland	0.0	0.2
高寒草原、高寒草甸 Alpine steppe, Alpine meadow	0.0	0.1
冰川、永久积雪、裸地 Permanent ice, Permanent snow, Bare soil	0.0	0.0

为尽可能消除评价结果空间不可比问题,依据每个评估单元内较少受人类活动明显干扰且优良的参照系,计算基于参照系的生态系统质量指数(ESQI';公式 5)。

$$ESQI' = ESQI / ESQI_{\text{ref}} \quad (5)$$

$ESQI_{\text{ref}}$ 为生态系统质量的参照值, $ESQI$ 为生态系统质量的现实值。当 $ESQI' \geq 1$ 时,表示生态系统质量优于参照系;反之生态系统质量劣于参照系。根据分位数将 $ESQI'$ 划分为优良(80%—100%)、较好(60%—80%)、中等(40%—60%)、较差(20%—40%)、很差(0%—20%)五个等级。生态系统质量的参照值是指某一时期某个评估单元内的参照系的质量的平均值。本研究中针对每个具有相似地理和气候条件的评估单元,按照下面方法的优先次序筛选出评估单元内适合作为参照生态系统的备选区域:(1)具有 CERN 野外观测台站或国家自然保护区核心区等较少受人类影响的生态系统;(2)净初级生产力主要受气候因子控制的生态系统;(3)评估单元内生态系统质量指数为优良的生态系统。在这些备选区域内选择未发生土地利用变化且生态系统质量相对优良的区域作为参照系,下文分别简称为 CERN 参照、国家自然保护区参照、最受气候影响区参照和评估单元参照。

2 结果

2.1 参照系的生态系统质量变化特征

对 1990 年、2000 年、2010 年、2015 年不同类型参照系的生态系统质量指标参照值进行统计,其占评估单元总体的分位数平均值如表 3 所示。总体上,参照系的生态系统质量指数数值位于评估单元 89%分位数,其中胁迫标准化指数、结构标准化指数、功能标准化指数、稳定性标准化指数四个分量的参照值分别位于 76%、80%、75%和 69%。按照不同类型的参照系来看,以国家自然保护区为参照的评估单元数最多,参照系的人类干扰标准化指数位于评估单元的 90.8%分位数,在四类参照系中的受干扰程度最低。以 CERN 永久样地为基准的参照生态系统具有相对较好的结构、功能和稳定性,均位于评估单元分位数的 60%以上。对于最受气候影响的参照系,其结构指数所处于评估单元的分位数水平(77%)>功能指数(69.7%)>稳定性指数(68.3%)。以评估单元优良值为基准的参照生态系统的质量位于评估单元的 91.6%分位数。可以看出,在具有相似气候和地理条件的评估单元内,参照系具有较低的人类胁迫和良好的生态系统结构、功能和稳定性,说明本研究根据 CERN 生态系统永久样地、国家自然保护区核心区、最受气候影响区来选取受人类干扰较少且优良的生态系统作为参照系是合理可行的。

表 3 不同类型参照系的质量参照值位于相应评估单元分位数的平均值

Table 3 The average of quantile of the reference value of different indicator in the corresponding assessment unit for different reference system

指标 Indicators	CERN 参照 CERN reference system	国家自然 保护区参照 National nature reserve reference system	最受气候 影响区参照 Most climate- affected area reference system	评估单元参照 Assessment unit reference system	全部参照系 All reference system
评估单元数目* Number of assessment units	11	88	24	45	168
生态系统质量 Ecosystem quality	0.760	0.910	0.802	0.916	0.889
人类干扰标准化指数 Standardized human interference index	0.501	0.908	0.572	0.660	0.768
生态系统结构标准化指数 Standardized ecosystem structure index	0.655	0.821	0.770	0.810	0.801
生态系统功能标准化指数 Standardized ecosystem function index	0.645	0.769	0.697	0.754	0.748
生态系统稳定性标准化指数 Standardized ecosystem stability index	0.610	0.691	0.683	0.721	0.694

* 评估单元数目为以某一备选参照生态系统作为参照系的评估单元的数目;CERN: 中国生态系统研究网络 Chinese ecosystem research network

ESQ_{ref} 的四期平均值总体上呈现东南高(0.9)、西北低(0.07),湿润区高(0.62 以上)、干旱区低(0.35 以下)的格局(图 2)。全国参照生态系统的质量平均值在生态工程大规模实施前后的两个时段(即 1990—2000 年和 2000—2015 年)分别呈下降和上升的趋势(图 1)。1990—2000 年全国生态系统质量的参照值下降了 0.0013,ESQ_{ref} 下降的参照系主要集中在两个区域,一是在暖温带亚湿润地区、中温带半干旱地区、北亚热带湿润地区以及中国中部多种生态地理分区的交界处(图 1),该区域年降水量减少 123 mm,ESQ_{ref} 平均下降了 0.06;二是中温带亚湿润地区和寒温带湿润地区,该区域年降水量下降 162.40 mm,年平均气温下降 1.20℃,ESQ_{ref} 平均下降 0.013。而 ESQ 增加的区域主要分布于三个区域,其中中亚热带湿润地区年降水量平均增加 212 mm,总辐射平均增加 35.03 MJ/m²,ESQ_{ref} 平均增加 0.053;青藏高原温带干旱地区和青藏高原亚寒带半干旱地区的东部地区年降水量增加 46 mm,年平均气温上升 0.57℃,ESQ_{ref} 平均增加了 0.018;而暖温带干旱地区和中温带干旱地区的西部区域受年降水量增加(+22 mm)影响,ESQ_{ref} 平均增加 0.021(图 1)。

2000—2015 年全国参照生态系统的质量值平均增加了 0.0306,ESQ_{ref} 增加的参照系集中分布在中温带亚

湿润地区、中温带湿润地区,中温带半干旱地区、暖温带亚湿润地区以及北亚热带湿润地区(图1)。受气温上升影响,中温带亚湿润地区和中温带湿润地区的 ESQ_{ref} 增加了 0.117;中温带半干旱地区和暖温带亚湿润地区 ESQ_{ref} 平均增加 0.136。而北亚热带湿润地区 ESQ_{ref} 的增加 (+0.123) 主要与该区域年降水量增加 (+380 mm) 有关。该时段青藏高原亚寒带半干旱地区东部地区受年降水量下降 (-293 mm) 影响, ESQ_{ref} 平均下降 0.003 (图1)。

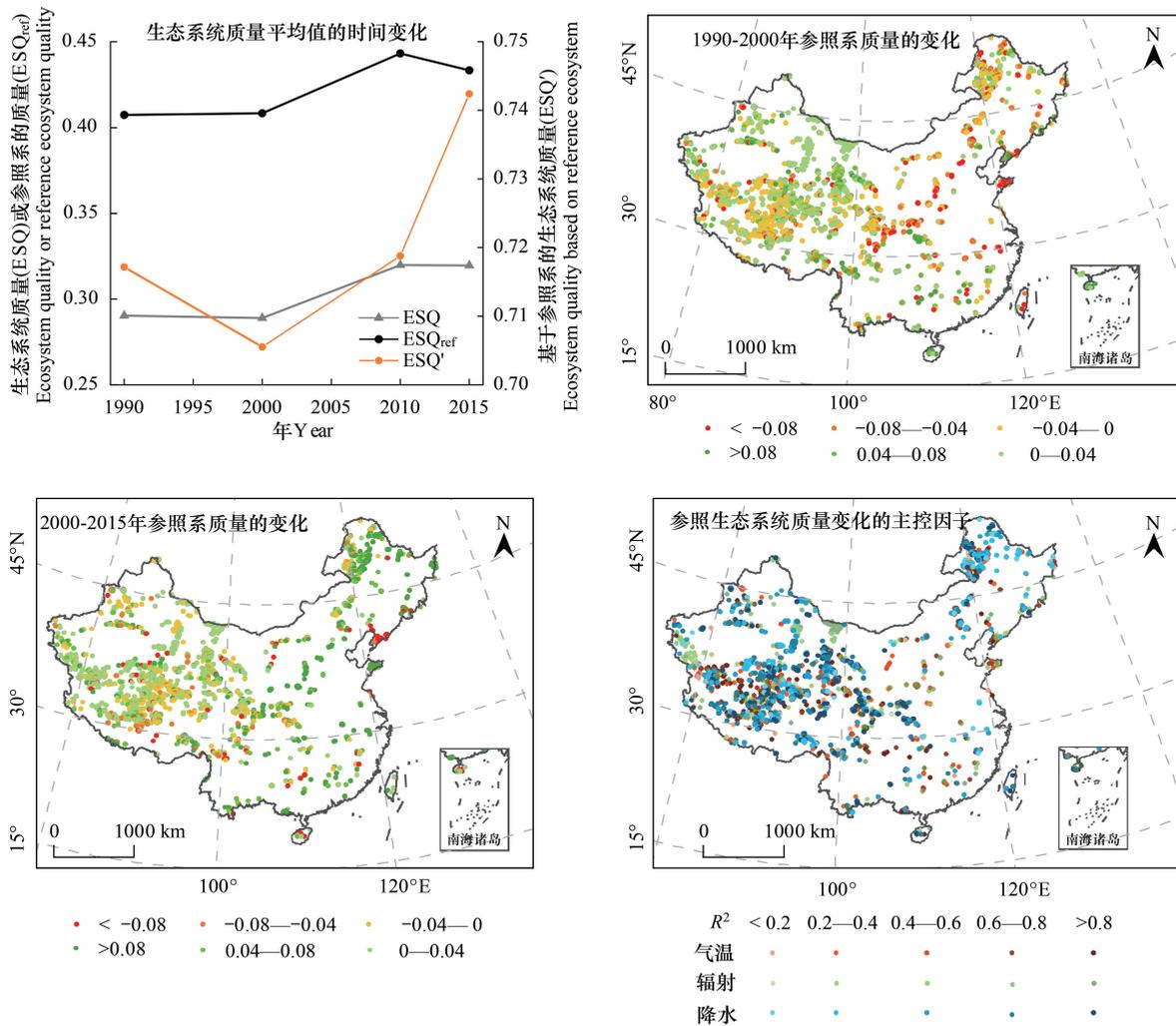


图1 参照生态系统的的变化及其主要气候影响因子

Fig.1 Changes in the quality of reference ecosystems and their main climate influencing factors

2.2 基于参照系的中国陆地生态系统质量的空间分布特征

生态系统质量现实值(ESQ)和基于参照系的生态系统质量(ESQ')四期均值的空间分布如图2所示。 ESQ 的全国平均值为0.305,与 ESQ_{ref} 具有一致的空间分异规律。 ESQ' 平均值为0.72,表明在全国水平上,生态系统质量现实值与参照值的平均差距为28%。 ESQ' 优良的地区主要分布在青藏高原亚寒带、温度半干旱地区、亚寒带亚湿润地区草地生态系统,暖温带、中温带干旱地区森林生态系统,南亚热带、中亚热带、北亚热带湿润地区森林生态系统的东部和北部,中温带、寒温带湿润地区和中温带亚湿润地区的森林生态系统。以西北地区为例,生态系统质量现实值评估结果“较好”和“良好”水平的区域仅占17.72%,而基于参照系的生态系统质量评估结果中,二者比例占41.16%(图2)。例如,三江源草原草甸湿地生态功能区虽然生态系统质量现实值较低,但该地区的生态系统功能指数优于参照系(生态系统功能指数现实值/参照系=1.25)且生态

系统稳定性指数接近参照系(生态系统稳定性指数现实值/参照系=0.92),因此 ESQ 接近参照系的质量。这表明基于参照系的生态系统质量在一定程度上克服了质量好坏受气候、自然地理条件主导的问题。

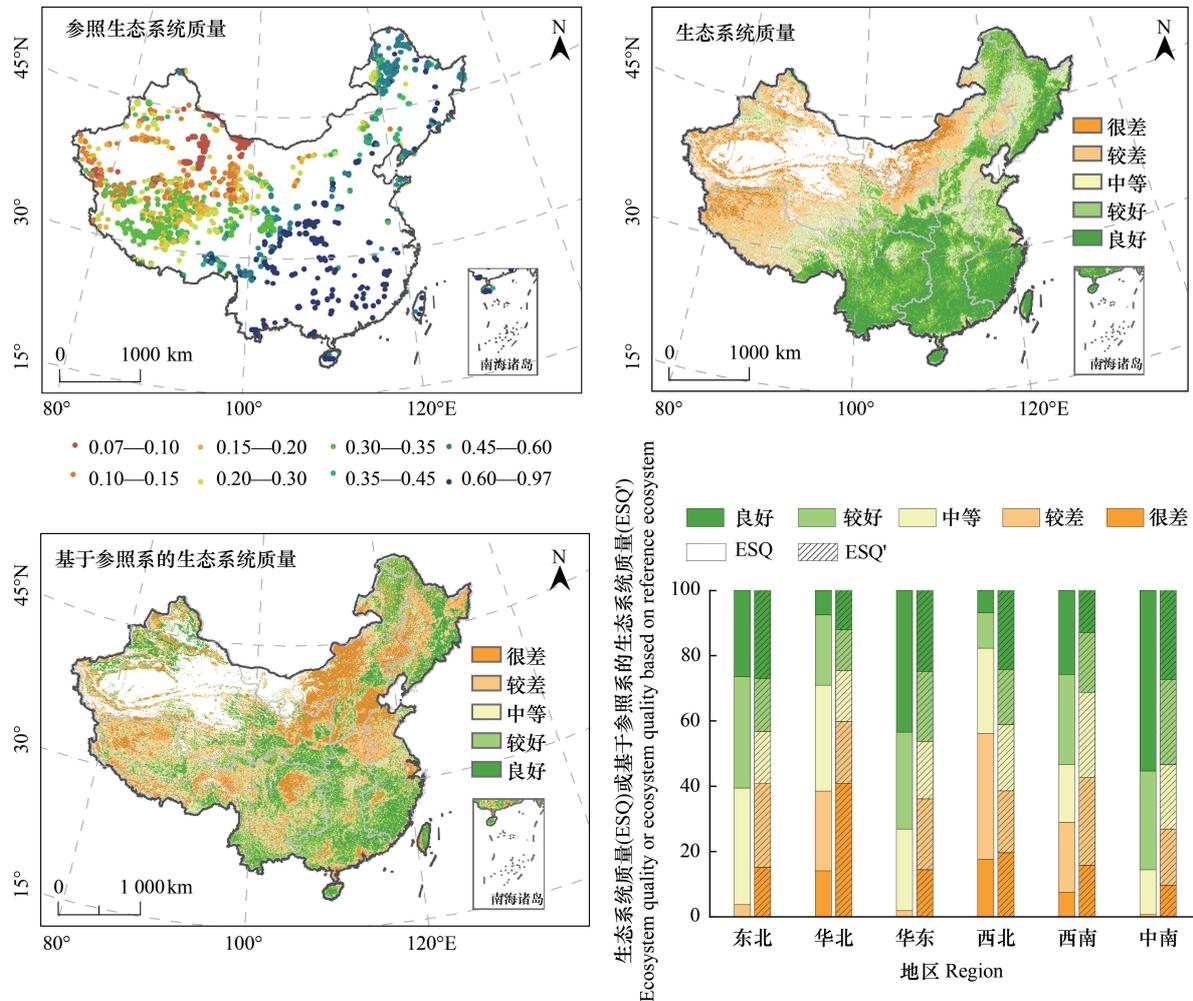


图 2 生态系统质量的空间分布和分区统计

Fig.2 Spatial distribution and regional statistics of ecosystem quality

2.3 中国陆地生态系统质量变化原因分析

图 3 为 1990—2000 年和 2000—2015 年两个时段 ESQ'变化的空间分布。相对于参照系 ESQ(ESQ_{ref})的变化而言,1990—2000 年中国陆地生态系统质量总体下降了 1.2%,而 2000—2015 年生态系统质量上升了 3.69%。其中,ESQ'转变比较明显的区域主要分布在陕西-甘肃-宁夏(简称陕-甘-宁)、东北和西南石漠化治理工程区。

对于陕-甘-宁地区,1990—2000 年因总辐射量增加(+101.74 MJ/m²)会提升生态系统功能,参照值相应增加 0.01,而农田扩张导致该区域受人类干扰加剧,生态系统结构指数下降,同时引起叶面积指数下降(-0.13)和生态系统稳定性的下降(-0.11),从而引起该区域质量变化偏离参照系质量变化。2000—2015 年该区域 ESQ'平均增加 0.133,特别是黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区(+0.203)。在 ESQ_{ref}平均增加 0.041 的背景下,退耕还林还草工程的大规模实施增加了该地区的林草地比例,这促使生态系统结构得以改善(生态系统结构指数增加 0.089;LAI 增加 0.429),生态系统功能指数和生态系统稳定性指数分别增加了 0.139 和 0.186,以致生态系统质量指数的增加量反而大于参照生态系统的的变化(表 5)。

对于中国东北地区,1990—2000 年东北平原的 ESQ'下降受 NPP(-60.89 gC m⁻² a⁻¹)、NEP(-139.63 gC m⁻² a⁻¹)

和水源涵养功能下降(-49.59 mm)主导,可能与降水的减少(-210.34 mm)、温度的下降(-0.79℃)和土地利用变化有关;而长白山地区受年均温显著下降(-1.25℃)影响,参照系质量下降0.004,而该区域由6750 km²森林转为农田引起的稳定性下降(-0.16)则主导了整个区域质量下降(表4)。2000—2015年,虽然气候变化的不利影响导致东北地区参照值下降了0.051,但长白山森林生态功能区和大小兴安岭森林生态功能区表现出大面积的质量恢复,ESQ'增加主要由生态系统功能和稳定性增加引起,这在很大程度上与三北防护林工程^[53]有关,该时段有6450 km²农田转换为森林。

对于西南石漠化治理工程实施的县域,1990—2000年ESQ'增加的幅度低于参照值变化。而2000—2015年该地区降水和总辐射分别增加了92.77 mm和195.33 MJ/m²,参照生态系统的质量提升了0.004;这期间由于石漠化综合治理工程的实施,该地区分别有13375 km²和5150 km²的农田转为森林和草地,同时又有5800 km²的草地转换成森林,生态系统结构指数、生态系统功能指数和生态系统稳定性指数分别增加了0.043、0.027和0.090,尤其是生产力和固碳功能分别增加了150.03 gC m⁻² a⁻¹和62.19 gC m⁻² a⁻¹,最终促使整个区域ESQ'的增幅(+0.051)远高于参照系。

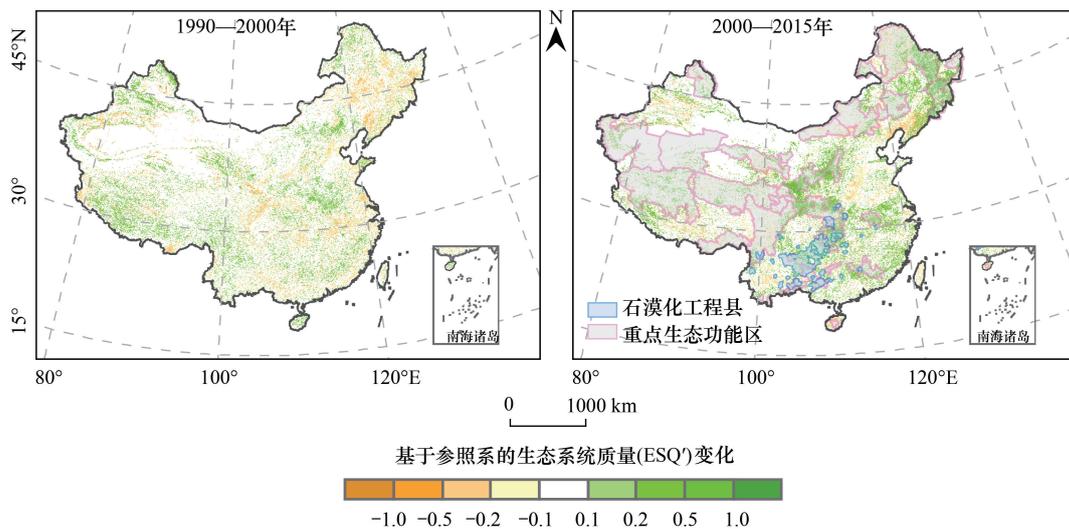


图3 基于参照系的生态系统质量(ESQ')的变化

Fig.3 Changes in ecosystem quality based on reference system

3 讨论

2000年前后中国实施了天然林资源保护、退耕还林还草、京津风沙源治理等一系列重大生态建设工程,这些大规模的土地利用管理引领了全球陆地变绿,2000—2017年中国植被叶面积的增加达到全球绿化面积增加的25%^[13]。在气候变化和人类活动的共同作用下,2000—2010年中国多项生态系统服务(包括食物生产、水源涵养、土壤保持、防风固沙、洪水调蓄、固碳)得到明显改善^[17]。本研究基于参照系的生态系统质量(ESQ')评估结果进一步表明,因人类活动引起的生态系统质量变化在2000—2015年间增加了3.69%,尤其在黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区、青海省东部、长白山地区质量增加明显,这与Ouyang等研究中2000—2010年多项生态系统服务增加的区域一致^[17]。同时,本研究还表明西南石漠化工程治理县域和长白山地区这两个LAI“变绿”明显的区域^[13],ESQ'也存在明显增加。统计结果表明,这两个地区实施了大量的造林工程(退耕还林工程^[5, 54],三北防护林工程^[53]),2000—2015年分别有13375 km²和6450 km²的农田转为森林(表5)。此外,在中国西南喀斯特区域,随着退耕还林还草、石漠化综合治理等工程的实施,2000—2015年贵州和广西省的ESQ'增加明显,这与Tong等NDVI变化(2000—2011年与1982—2000年NDVI变化趋势之差)的空间格局一致^[55]。

表 4 1990—2000 年 ESQ'转变明显区域的生态系统质量、气候因子和 LAI 的变化的平均值,以及主要的土地利用变化

Table 4 The average value of changes in ecosystem quality, climate factors and LAI, as well as main land-use changes during 1990—2000 in the regions with obvious ESQ' transformations

区域 Regions	生态系统质量 Ecosystem quality	参照值 Reference conditions	人类胁迫 指数 HII_std	生态系统 结构指数 EStr_std	生态系统 功能指数 Efun_std	生态系统 稳定性指数 ESStl_std	净初级 生产力 NPP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	净生态系 统生产力 NEP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	土壤 含水量 WC/ mm	土壤 保持量 SC/ (t/km ²)	年降水 Annual precipitation/ mm	年均温 Average annual temperature/ °C	年总辐射 Annual radiation/ (MJ/m ²)	主要土地 利用变化 The main LUCCs	叶面积指数 LAI
“陕-甘-宁”地区 “Shaan-Gan-Ning” area	-0.041	0.010	0.001	0.005	-0.02	-0.11	25.10	-24.54	-11.61	-8.41	-119.63	0.27	101.74	—	-0.13
东北平原 Northeast China Region	-0.041	-0.010	-0.012	0.018	-0.07	-0.08	-60.89	-139.63	-49.59	-4.30	-210.34	-0.79	275.28	森林、草地、水体分别转 农田 575 km ² 、4750 km ² 、1725 km ²	-0.04
长白山地区 Changbai Mountain and its surrounding areas	-0.053	-0.004	-0.009	0.021	-0.03	-0.16	18.70	-65.45	-13.82	-7.17	-77.89	-1.25	141.20	森林转农田:6750 km ²	0.01
西南石漠化治理工程县 Counties where rocky desertification control projects are implemented in Southwest China	0.023	0.036	0.000	0.061	0.047	-0.035	30.82	35.24	-1.19	14.83	69.44	-0.47	-236.93	农田转草地:3675 km ²	0.199

* HII_std; Standardized human interference index, EStr_std; Ecosystem structure index, Efun_std; Ecosystem function index, ESStl_std; Ecosystem stability index; NPP; Net primary productivity, NEP; Net ecosystem productivity, SC; Soil conservation, WC; Water conservation, LUCCs; Land use and land cover changes, LAI; Leaf area index

表 5 2000—2015 年 ESQ'转变明显区域的生态系统质量、气候因子和 LAI 的变化的平均值,以及主要的土地利用变化

Table 5 The average value of changes in ecosystem quality, climate factors and LAI, as well as main land-use changes during 2000—2015 in the regions with obvious ESQ' transformations

区域 Regions	生态系统质量 Ecosystem quality	参照值 Reference conditions	人类胁迫 指数 HII_std	生态系统 结构指数 EStr_std	生态系统 功能指数 Efun_std	生态系统 稳定性指数 ESStl_std	净初级 生产力 NPP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	净生态系 统生产力 NEP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	土壤 含水量 WC/ mm	土壤 保持量 SC/ (t/km ²)	年降水 Annual precipitation/ mm	年均温 Average annual temperature/ °C	年总辐射 Annual radiation/ (MJ/m ²)	主要土地 利用变化 The main LUCCs	叶面积指数 LAI
“陕-甘-宁”地区 “Shaan-Gan-Ning” area	0.133	0.041	0.012	0.089	0.139	0.186	170.23	135.63	10.34	40.75	-38.89	0.56	-149.68	农田转森林:5675 km ² ; 农田转草地:13175 km ²	0.429
长白山地区 Changbai Mountain and its surrounding areas	0.110	-0.051	0.000	0.006	0.103	0.232	33.40	43.59	44.14	23.36	-70.15	1.01	-300.76	农田转森林:6450 km ² 农田转草地:13375 km ²	0.101
西南石漠化治理工程县 Counties where rocky desertification control projects are implemented in Southwest China	0.051	0.004	0.005	0.043	0.027	0.090	150.03	62.19	-12.64	2.05	92.77	1.11	195.33	农田转森林:5800 km ² 草地转森林:5800 km ²	0.063

本研究是从人类胁迫、生态系统结构、功能和稳定性四个方面评估生态系统质量。造林工程能直接增加植被覆盖率,改善生态系统结构^[56],而退耕还林还草工程能促使生态系统由农田的高人类胁迫转为草地或森林的低人类胁迫^[52]。由于森林的抗旱能力高于农田^[57],退耕还林工程同时也会增加生态系统的稳定性。生态工程对生态系统功能的综合效益因气候背景而异,在降水充足的地区,造林无疑会增加生态系统多项功能,如在西南喀斯特地区生态系统功能之间的关系以协同为主^[58];然而,在降水限制区生态工程对生态系统功能的影响还存在较大争议,如三北防护林工程京津风沙源治理工程增加了半干旱地区防风固沙和土壤保持功能,但减少了地表径流和加速了地下水的消耗^[59]。综合这些研究可以看出,生态工程在短期内会通过减小人类胁迫、改善生态系统结构、功能,提升稳定性来增加生态系统质量。此外,人工林会随时间变化生长而导致需水量增加,由此而产生的与生产力、固碳和土壤保持的权衡关系的增强(尤其是在半干旱区和干旱区)在长期内如何影响生态系统质量还需要进一步的考量。

根据《西部地区重点生态区综合治理规划纲要(2012-2020年)》,在西北草原荒漠化防治区、黄土高原水土保持区、青藏高原江河水源涵养区、西南石漠化防治区、重要森林生态功能区等五大重点生态区,退耕还林、退牧还草、自然保护区建设和水土流失治理等生态治理区域面积到2020年将分别达到 $151.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $27.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $88 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $26.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $106.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的面积。同时,根据石漠化综合治理工程“十三五”规划,到2020年岩溶土地和石漠化土地治理面积分别达到 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,建设和保护林草植被 $195 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[60]。我国的森林覆盖率从1998年的13.92%提升至2015年的21.63%^[61],预期到2025年将增加至24.1%^[62]。我国《十四五规划和2035年远景目标纲要》指出,要坚持山水林田湖草治理,通过在重点生态功能区、国家级自然保护区等地实施生态系统保护和修复工程,改善生态系统质量。这些工程将布局在“三生态区-四森林带”,预期在青藏高原生态屏障区(如三江源、祁连山)治理退化草原 $320 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在黄河重点生态区(如黄土高原、秦岭)治理水土流失和沙地 $280 \times 10^4 \text{ hm}^2$,保护林草地 $80 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在长江重点生态区造林 $110 \times 10^4 \text{ hm}^2$,治理水土流失和石漠化面积共 $600 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。同时将在东北森林带、北方防沙带和南方丘陵带造林约 $300 \times 10^4 \text{ hm}^2$,并且预期将在北方防沙带治理沙化土地 $750 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。这些积极的生态保护工程预估将进一步增强生态脆弱区和重点生态功能区的生态系统结构与稳定性,提升生态系统功能和质量。受全球变暖影响,预计未来三十年(2021—2050)中国大部分地区将遭受更严重、更频繁和持续时间更长的干旱,尤其在西北地区^[63],而2040年后中国降水整体呈增加趋势(集中在北方地区)^[64]。因此未来几十年降水能否承载起生态工程导致的森林增加和生长的需求是个很大的挑战,未来我国半干旱半湿润区的生态工程的布设应关注具有变湿趋势的地区。

本研究通过考虑参照系的生态系统质量变化,在一定程度上消除不同区域气候波动差异对质量评估的影响,为量化保护、治理等生态工程对生态系统的影响提供了一种新途径。例如长白山参照系无土地利用变化,其ESQ可能会随气候限制因子的消极变化而下降(-0.051),而整个区域的ESQ能抵消气候变化的不利影响进而使生态系统质量有较大的提升(+0.110)。ESQ'在量化生态工程等人为影响方面具有较大潜力,可以作为政府部门绩效评估的依据之一,也能为生态系统和土地利用管理提供参考。

参照系的合理选取是评价生态系统质量变化的重要前提。本研究中大部分评估单元的参照系符合优良生态系统的假设,然而受到数据获取的限制,参照系选取主要基于CERN定位观测台站永久样地和国家自然保护区核心区,尚不能充分利用国家林草局、国家气象局、生态环境部、高校等其他部门野外观测台站的永久样地数据。因此,仅考虑极小干扰参照系很难覆盖全部的评估单元,本文根据数据的可获取性选择最受气候影响区和评估单元优良值基准作为剩余评估单元的参照系,基于多种基准参照系的基础上对国家尺度的生态系统质量进行评估;同时由于数据观测和处理、模型模拟过程中存在的随机误差和系统误差^[65-67],导致部分评估单元的参照系并不完全符合优良生态系统的假设,一些功能处于评估单元内的中等水平。未来国家不同部门野外观测研究站网规模的扩大和数据共享,以及中国生态保护红线地面观测网络的建立,形成一体化、长期、连续的生态系统质量监测体系,将为我国生态系统质量评估提供更多可靠的参照系数据、模型验证和校准

数据,使基于参照系的生态系统质量评估结果更具可比性和科学性,从而更好地服务于我国生态文明建设、重点生态区综合治理、石漠化综合治理、“山水林田湖草”等工程的治理成效评估和绩效考核。

4 结论

本文基于 1990—2015 年中国土地覆盖、植被覆盖度、生态系统功能和气候等数据,计算了生态系统结构、功能、稳定性和人类胁迫指数;根据生态地理分区和植被类型划分的评估单元,基于 CERN 台站、国家自然保护区和最受气候影响区等参照生态系统,结合生态系统质量评估模型,评估了基于参照系的中国陆地生态系统质量及其变化情况。主要研究结论如下:

(1) 本研究选用的生态系统质量评估参照系具有较低的人类胁迫和良好的生态系统功能和稳定性,参照系的生态系统质量指数总体位于评估单元 89% 分位数。1990—2000 年和 2000—2015 年参照系 ESQI 的全国平均值分别呈下降和上升趋势。与参照系相比,中国陆地生态系统质量指数的平均值偏低 28%。

(2) 1990—2000 年和 2000—2015 年 ESQ' 分别下降 1.2% 和上升 3.69%。ESQ' 转变比较明显的区域主要分布在“陕-甘-宁”地区、长白山地区和西南石漠化治理工程实施县域,在这些区域实施的退耕还林还草工程、三北防护林工程和石漠化综合治理工程发挥了重要作用。未来我国计划进一步实施生态保护和修复工程,加强山水林田湖草沙治理,这些措施将进一步提升我国生态系统质量。同时需要关注未来气候变化以及生态系统功能之间的权衡关系对生态系统质量的影响。

(3) 针对传统评估方法因包含了地理、气候本底条件差异而存在评估结果在空间上不可比的问题,基于参照系的生态系统质量评估方法通过考虑参照系的生态系统质量变化,可以在一定程度上消除不同区域气候波动差异对质量评估的影响,为科学量化保护、治理等生态工程对生态系统的影响提供了一种新途径。未来应加强全国不同区域、不同类型的参照生态系统联网观测,为提升我国生态系统质量评估能力提供科学数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402.
- [2] Liu D L, Hao S L. Ecosystem health assessment at county-scale using the pressure-state-response framework on the loess plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(1): 2.
- [3] Sun B D, Tang J C, Yu D H, Song Z W, Wang P G. Ecosystem health assessment: a PSR analysis combining AHP and FCE methods for Jiaozhou Bay, China. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 168: 41-50.
- [4] Roche P K, Campagne C S. From ecosystem integrity to ecosystem condition: a continuity of concepts supporting different aspects of ecosystem sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 29: 63-68.
- [5] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.
- [6] Ren H, Shen W J, Lu H F, Wen X Y, Jian S G. Degraded ecosystems in China: status, causes, and restoration efforts. *Landscape and Ecological Engineering*, 2007, 3(1): 1-13.
- [7] Li W H. Degradation and restoration of forest ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201(1): 33-41.
- [8] 邹雅林. 加强野生动物栖息地的保护和建设. *国土绿化*, 2002, (11): 20-20.
- [9] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. *地理学报*, 2007, 62(2): 171-180.
- [10] 卞鸿雁, 庞奖励, 任志远, 徐茜. 基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态——以黄土高原南部为例. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2391-2396.
- [11] Zheng J, Wei X H, Liu Y Q, Liu G H, Wang W F, Liu W F. Review of regional carbon counting methods for the Chinese major ecological engineering programs. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(4): 727-738.
- [12] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [13] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.

- [14] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 任小丽, 王军邦, 牛忠恩, 顾峰雪, 何洪林. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因. 生态学报, 2018, 38(24): 8774-8786.
- [15] 何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.
- [16] 刘纪远, 邵全琴, 于秀波, 黄河清. 中国陆地生态系统综合监测与评估. 北京: 科学出版社, 2016.
- [17] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [18] He J H, Pan Z Z, Liu D F, Guo X N. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 553-564.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 2020, 2019 年中国生态环境状况公报.
- [20] 罗海江, 汪文鹏, 白海玲. 基于 VEGETATION 数据区域生态系统质量评价之三——服务功能稳定度指数评价. 中国环境监测, 2010, 26(2): 37-41.
- [21] 孙传谔, 甄霖, 王超, 胡洁, 杜秉贞. 天然林资源保护一期工程生态成效评估——以甘肃小陇山地区为例. 地理科学进展, 2017, 36(6): 732-740.
- [22] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001-2010 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, 2015, 35(13): 4347-4356.
- [23] 潘竞虎, 董磊磊. 2001—2010 年疏勒河流域生态系统质量综合评价. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2907-2915.
- [24] 朱坚, 翁燕波, 张彪, 谢高地, 高占国, 杜宇峰. 基于组合赋权法的宁波市城市生态系统质量评价. 中国环境监测, 2011, 27(1): 64-68.
- [25] 张敏, 王敏, 白杨, 黄沈发. 上海市生态系统质量评价及其演变特征分析研究. 环境污染与防治, 2015, 37(1): 46-51.
- [26] 乔长录, 刘昭. 干旱区流域水文生态系统质量综合评价研究——以新疆自治区玛纳斯河流域为例. 水土保持通报, 2012, 32(2): 215-221.
- [27] Chen Z H, Yin Q, Li L, Xu H. Ecosystem health assessment by using remote sensing derived data: a case study of terrestrial region along the coast in Zhejiang province//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE, 2010: 4526-4529.
- [28] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lü H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health; a case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [29] Li H Y, Peng H C, Nie J L, Wu Y R, Wang B Q. Study on the ecosystem health assessment for wetland in Lianyungang//Proceedings of SPIE 8181, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II. Prague: SPIE, 2011: 818115.
- [30] Yu G M, Yu Q W, Hu L M, Zhang S, Fu T T, Zhou X, He X L, Liu Y A, Wang S, Jia H H. Ecosystem health assessment based on analysis of a land use database. *Applied Geography*, 2013, 44: 154-164.
- [31] Sun T T, Lin W P, Chen G S, Guo P P, Zeng Y. Wetland ecosystem health assessment through integrating remote sensing and inventory data with an assessment model for the Hangzhou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 627-640.
- [32] Li G Y, Han H Y, Du Y, Hui D F, Xia J Y, Niu S L, Li X N, Wan S Q. Effects of warming and increased precipitation on net ecosystem productivity: a long-term manipulative experiment in a semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 359-366.
- [33] Fyllas N M, Bentley L P, Shenkin A, Asner G P, Atkin O K, Diaz S, Enquist B J, Farfan-Rios W, Gloor E, Guerrieri R, Huasco W H, Ishida Y, Martin R E, Meir P, Phillips O, Salinas N, Silman M, Weerasinghe L K, Zaragoza-Castells J, Malhi Y. Solar radiation and functional traits explain the decline of forest primary productivity along a tropical elevation gradient. *Ecology Letters*, 2017, 20(6): 730-740.
- [34] Haase P, Tonkin J D, Stoll S, Burkhard B, Frenzel M, Geizendorfer I R, Häuser C, Klotz S, Kühn I, McDowell W H, Mirtl M, Müller F, Musche M, Penner J, Zacharias S, Schmeller D S. The next generation of site-based long-term ecological monitoring: linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 1376-1384.
- [35] Maloney E M. How do we take the pulse of an aquatic ecosystem? current and historical approaches to measuring ecosystem integrity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, 38(2): 289-301.
- [36] Kandziora M, Burkhard B, Müller F. Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—a theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 54-78.
- [37] De Keersmaecker W, Lhermitte S, Honnay O, Farifteh J, Somers B, Coppin P. 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*, 2014, 20(7): 2149-2161.
- [38] Stoddard J L, Larsen P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. Setting expectations for the ecological condition of running waters: the concept of reference condition. *Ecological Applications*, 2006, 16(4): 1267-1276.
- [39] 李嘉珣, 曹飞飞, 汪铭一, 吴钢. 参照点位法下的参照状态在草原生态系统损害基线判定中的应用分析. 生态学报, 2019, 39(19): 6966-6973.
- [40] 庞博, 崔保山, 蔡燕子, 谢焜, 王青, 宁中华. 我国滨海湿地生态修复参照区选取方法研究. 环境生态学, 2020, 2(1): 1-9, 25-25.
- [41] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.
- [42] 王军邦, 王居午, 叶辉, 刘亚, 何洪林. 2000~2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集. 中国科学数据, 2017, 2(1): 73-80.
- [43] Ren X L, He H L, Zhang L, Yu G R. Global radiation, photosynthetically active radiation, and the diffuse component dataset of China, 1981-

2010. *Earth System Science Data*, 2018, 10(3): 1217-1226.
- [44] Niu Z E, He H L, Peng S S, Ren X L, Zhang L, Gu F X, Zhu G F, Peng C H, Li P, Wang J B, Ge R, Zeng N, Zhu X B, Lv Y, Chang Q Q, Xu Q, Zhang M Y, Liu W H. A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(6): e2020MS002451.
- [45] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [46] Li J, Xiao Z Q. Evaluation of the version 5.0 global land surface satellite (GLASS) leaf area index product derived from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(23): 9140-9160.
- [47] Zhao D F, Li C B, Wang Q Q, Yuan J H. Comprehensive evaluation of national electric power development based on cloud model and entropy method and TOPSIS: a case study in 11 countries. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123190.
- [48] 熊黑钢, 付金花, 王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(10): 1382-1387.
- [49] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruehlheide H, De Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, Van Der Putten W H, Van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526(7574): 574-577.
- [50] 刘慧明, 高吉喜, 张海燕, 马敦良, 徐新良. 2010-2015 年中国生物多样性保护优先区域人类干扰程度评估. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1456-1465.
- [51] 冯志贤, 张继贤, 侯伟, 翟亮. 基于地表覆盖分类的生态环境人为干扰度分析——以北京市为例. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 508-516.
- [52] Chi Y, Shi H H, Zheng W, Sun J K, Fu Z Y. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the Yellow River Delta in the last 30 years. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 880-892.
- [53] Hong S B, Yin G D, Piao S L, Dybzinski R, Cong N, Li X Y, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A P. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 694-700.
- [54] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [55] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [56] 黑哲, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 戈文艳. 退耕还林(草)以来陕北白于山区植被覆盖与土壤侵蚀强度变化. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 39-46.
- [57] Li X Y, Li Y, Chen A P, Gao M D, Slette I J, Piao S L. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269-270: 239-248.
- [58] Liu M, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Zhao C W, Wu L H, Hu Z Y, Ran C, Deng Y H. Monitoring impacts of ecological engineering on ecosystem services with geospatial techniques in karst areas of SW China. *Geocarto International*, 2021, doi: 10.1080/10106049.2021.1903580.
- [59] Li R N, Zheng H, O'Connor P, Xu H S, Li Y K, Lu F, Robinson B E, Ouyang Z Y, Hai Y, Daily G C. Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs. *Science Advances*, 2021, 7(14): eabf8650.
- [60] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2016, 岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划.
- [61] 国家统计局编. 中国统计年鉴 1999, 2016. 北京: 中国统计出版社, 2000, 2017.
- [62] 十三届全国人大四次会议, 2021, 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要.
- [63] Zeng P, Sun F Y, Liu Y Y, Wang Y K, Li G, Che Y. Mapping future droughts under global warming across China: a combined multi-timescale meteorological drought index and SOM-Kmeans approach. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 31: 100304.
- [64] Leng G Y, Tang Q H, Huang M Y, Hong Y, Ruby L L. Projected changes in mean and interannual variability of surface water over continental China. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(5): 739-754.
- [65] Fratini G, Sabbatini S, Ediger K, Riensche B, Burba G, Nicolini G, Vitale D, Papale D. Eddy covariance flux errors due to random and systematic timing errors during data acquisition. *Biogeosciences*, 2018, 15(17): 5473-5487.
- [66] Yang Y K, Xiao P F, Feng X Z, Li H X. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 156-173.
- [67] Meng B P, Ge J, Liang T G, Yang S X, Gao J L, Feng Q S, Cui X, Huang X D, Xie H J. Evaluation of remote sensing inversion error for the above-ground biomass of alpine meadow grassland based on multi-source satellite data. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 372.