

2000 年来中国生态状况时空变化格局

何盈利^{1,2}, 尤南山^{1,2}, 崔耀平³, 肖桐⁴, 郝媛媛⁵, 董金玮¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 4. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 5. 蒙草生态大数据研究院, 呼和浩特 010000)

摘要: 21 世纪以来, 我国在经济快速发展的同时高度重视生态环境保护, 一系列生态修复工程和空间管控措施使生态状况发生了巨大变化; 然而目前对于全国生态状况宏观格局的认识仍十分有限。借助 Google Earth Engine(GEE)遥感云计算平台, 采用主成分分析方法和 MODIS 数据构建的绿色 *NDVI*、热度 *LST*、湿度 *WET* 和干度 *NDSI* 四个指标, 生成时间序列的遥感生态指数 *RSEI* 数据集, 完整刻画了中国 2000 年来生态状况的时空连续变化格局。研究发现: 在空间格局上, 东南沿海地区生态状况优于西北地区; 变化趋势上, 全国生态状况除上海、西藏和澳门之外均显著改善, *RSEI* 增长最多的三个省份为山西、陕西和河北。进一步采用遥感云计算定量评价了 2000 年来生态状况变化的宏观格局, 以期为国土空间管控和生态保护提供科学支持。

关键词: 生态状况; 遥感生态指数 *RSEI*; 遥感云计算; MODIS; GEE; 时空分析

1998 年以来, 我国实施了一系列生态环境保护政策与工程 (例如退耕还林还草工程和三北防护林工程), 对治理水土流失、保护森林与生物多样性、增加农林产量以及缓解乡村贫困等产生了积极影响。这一系列生态修复工程和空间管控措施使得生态状况发生了巨大变化^[1]。然而, 目前对于全国生态状况宏观格局的认识仍十分有限。建立科学、客观的生态评价模型, 对于认识我国生态状况变化的时空格局和生态文明建设具有重要的理论和现实意义。

生态状况是指在某一具体的时间和空间范围内, 生态系统的总体或部分生态因子的组合体对人类的生存及社会经济持续发展的适宜程度^[2]。前期学者多采用层次分析法、压力—状态—响应 (PSR) 模型相关分析法、综合评价法和绝对指标法 (或相对指标法) 等研究方法进行生态评价。如傅伯杰^[3]建立了区域生态状况综合评价的指标体系, 并应用这一指标体系通过层次分析和综合评价方法对我国各省区的生态状况做了定量评价与分析; 厉彦玲等^[4]通过指数评价法对区域生态实现了环境质量的评价。2006 年国家环境保护部以行业标准的形式颁发了《生态环境状况评价技术规范》政策, 提出了生态指数 (Ecological Index, EI) 的生态评价指标, 随后被广泛应用于各省份和地区的生态状况评价工作中。然而, 此类方法受专家经验知识影响较大, 且评价指标体系部分涉及的指标难以有效获取及定量, 因此难以对生态状况进行有效评价。

收稿日期: 2020-05-11; 修订日期: 2021-01-14

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19040301)

作者简介: 何盈利 (1997-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向为全球变化遥感。E-mail: hey1.19b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 董金玮 (1982-), 男, 山东潍坊人, 博士, 研究员, 研究方向为土地利用与全球变化遥感。

E-mail: dongjw@igsnr.ac.cn

卫星遥感以其宏观、快速、实时的优点在生态环境领域得到越来越广泛的应用。生态环境部采用以遥感为主的技术体系系统开展了2000—2015年五年一期的全国生态状况变化遥感调查评估；徐涵秋等^[5]提出一个综合反映生态状况的纯遥感驱动的遥感生态指数(Remote Sensing based Ecological Index, RSEI)，从绿度 $NDVI$ 、热度 LST 、湿度 WET 和干度 $NDSI$ 四个方面进行归一化处理 and 主成分分析，实现遥感生态状况评价；随后多位学者在西藏、三江源和锡林郭勒盟等典型区域进行了实践研究^[6-12]。尽管这一方法在不同区域得到了成功应用，但目前尚没有全国尺度的遥感生态评价研究，主要原因是该指标的计算对海量遥感数据处理能力有较高的要求。当前遥感云计算平台的出现为处理海量遥感数据提供了强有力的支持，使得国家尺度的生态监测和评价成为可能。

本文基于Google Earth Engine遥感云计算平台以及MODIS数据生成了中国范围内长时间序列的 $RSEI$ 数据集，并基于该数据对我国2000年以来的生态状况时空变化过程进行系统研究，分析了20年间中国生态状况空间分异、变化趋势和省际差异规律。通过遥感云计算平台和 $RSEI$ 这一纯遥感驱动的更为客观的生态指标，以刻画我国宏观生态状况的时空变化格局，为生态文明建设和生态保护政策制定提供科学支持。

1 研究方法 with 数据来源

本文以中国为研究区探索2000—2019年的生态状况变化。基于20年的 $RSEI$ 数据统计不同地区的变化趋势，并选取2000年、2005年、2010年、2015年和2019年5个关键节点着重分析我国的生态状况。

1.1 数据来源与预处理

研究所采用的遥感数据包括MOD09A1 V6和MOD11A2 V6数据集。其中，MOD09A1 V6数据集是Terra MODIS传感器1~7波段的地表反射率数据，其空间分辨率为500 m，时间分辨率为8天；MD11A2 V6数据为地表温度数据，空间分辨率为1000 m，时间分辨率为8天。

研究首先利用质量控制波段(QA)对2000—2019年地表反射率数据进行去云和去云影预处理，得到高质量的时间序列MODIS地表反射率数据集。对于温度数据集MD11A2 V6，本文采用白天的地表温度，利用质量控制图层(QC Day Bitmask)去除无效的温度观测值，然后重采样至500 m，使其空间分辨率与地表反射率数据保持一致。此外，研究利用MCD12Q1 V6地表覆盖数据去除了每年各指标图层的永久水体。

然后，对2000—2019年每年生长季内(5-10月)的4个指标进行年合成，其中 $NDVI$ 、 Wet 和 $NDSI$ 采用中值合成，而 LST 采用均值合成。为了增加数据可用性，避免中国南方多云多雨区域数据缺失的问题，每个目标年份的数据采用相邻三年生长季内的有效观测合成得到。

1.2 遥感指标构建和预处理

参考徐涵秋^[5]提出的 $RSEI$ ，利用 $NDVI$ ^[13]、 Wet ^[14]、 LST 和 $NDSI$ 四个遥感指标评价生态状况，其中 $NDSI$ 由 SI ^[15]和 IBI ^[16]两个指数生成，各指标公式如下：

$$RESI = f(NDVI, Wet, NDSI, LST) \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2)$$

$$Wet = 0.10839\rho_1 + 0.0912\rho_2 + 0.5065\rho_3 + 0.4040\rho_4 - 0.2410\rho_5 - 0.4658\rho_6 - 0.5306\rho_7 \quad (3)$$

$$NDSI = \frac{SI + IBI}{2} \quad (4)$$

$$SI = \frac{(\rho_6 + \rho_1) - (\rho_2 + \rho_3)}{(\rho_6 + \rho_1) + (\rho_2 + \rho_3)} \quad (5)$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_6}{\rho_6 + \rho_2} - \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_4}{\rho_4 + \rho_6} \right)}{\frac{2\rho_6}{\rho_6 + \rho_2} + \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_4}{\rho_4 + \rho_6} \right)} \quad (6)$$

式中： ρ_{1-7} 代表Terra MODIS第1~7波段的地表反射率； Wet 是对MODIS数据进行缨帽变换得到的湿度主成分数据^[14]。

由于 $NDVI$ 、 Wet 、 LST 和 $NDSI$ 四个指标量纲不统一，需要对每个指标进行归一化处理，使其位于0~1之间，公式如下：

$$NI = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (7)$$

式中： I 为原始指标； NI 为归一化指标； I_{\max} 和 I_{\min} 分别为指标 I 的最小值和最大值。

为了使不同年份不同区域具有统一的 I_{\max} 和 I_{\min} ，首先生成各个指标的多年均值，然后统计出该均值图层的最大和最小值。为了消除异常值的影响，采用多年均值图层的99分位（P99）和1分位（P1）值作为全局的最大与最小值，保证所用数据范围内的有效性。

1.3 生态指标构建和预处理

已有研究多针对某一景影像或某一年份的数据进行主成分分析， $RSEI$ 不同区域或不同年份在数值上没有可比性。为使多年 $RSEI$ 数值在时间和空间上均具有可比性，本文提出了时空统一的主成分分析方法，即将多年数据融合得到全局统一的因子权重矩阵，并将该权重运用于每一年份：（1）在每年影像上随机获取5000个样本，共计100000个样本构成样本集；（2）对该样本集进行中心化处理，构建协方差矩阵，进而求解特征值和特征向量，并将最大特征值对应的特征向量作为最终的因子权重矩阵；（3）利用样本集的均值对所有影像进行中心化处理，并基于因子权重矩阵计算所有影像所有像元的第一主成分分值（PC1）；（4）剔除PC1位于1分位（P1，-1）和99分位（P99，2）之外的异常值，仅保留[P1，P99]区间内的有效数值。通过上述步骤，每年每个像元的 $RSEI$ 则具有相同的权重系数，故可形成时空可比的 $RSEI$ 数据集。

1.4 基于RSEI的生态状况和生态变化分级

为了方便指标之间的对比和衡量，在对数据分布进行统计以及比较了不同的分级方法后，得到数据分布的最小值（-1）和最大值（2），根据间隔为0.4的等间距分级方法将 $RSEI$ 划分为[-1, -0.3)、[-0.3, 0.1)、[0.1, 0.5)、[0.5, 0.9)和[0.9, 2]五个值域区间，分别表示“差”“较差”“中”“良”和“优”5个等级，得到了不同年份的生态状况分级图，数值越高代表生态状况越好，等级越高。针对前后两个时期的生态状况变化，划分“Ⅰ”（降低两级及以上）、“Ⅱ”（降低一级）、“Ⅲ”（不变）、“Ⅳ”（升高一级）和“Ⅴ”（升高两级及以上）五个级别，分别代表“明显变差”“变差”“不变”“变

好”和“明显变好”五个生态状况变化等级。

2 结果分析

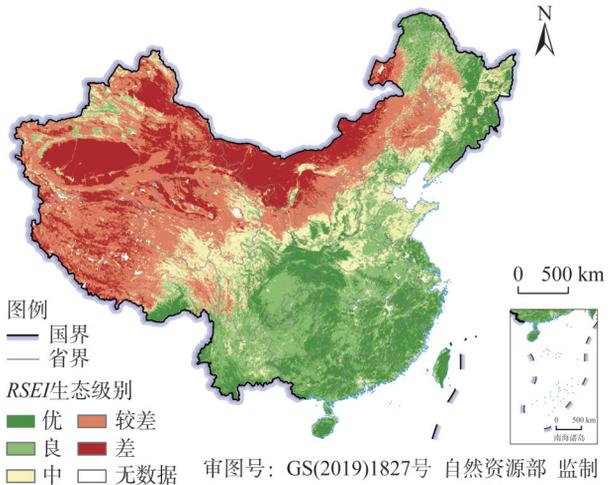
2.1 全国尺度的生态状况空间分异

根据多年平均生态状况图(图1),中国生态状况整体呈现“东南好、西北差”的空间格局。在区域分布上,生态状况优良的地区集中在秦岭山脉、东南沿海、长江中下游平原、东北平原以及大兴安岭等地势平坦、海拔较低、水热条件优越与降雨丰沛的平原及山地地区;生态状况较差的区域主要位于内蒙古高原、青藏高原、塔里木盆地和准格尔盆地等干旱及海拔较高的内陆地区。这种东西差异主要由自然禀赋的差异造成。

2000—2019年,中国不同生态状况级别面积发生了不同程度的变化(图2)。结果表明:(1)生态状况为“良”“优”的面积占比稳定在40.5%左右,其中生态状况为“优”的面积变化最大,由2000年占比16.7%增加至2019年的23.3%,而生态状况为“较差及以下”的面积均小于50%且持续减少,其中2013年达到最小比例(44.5%),相比2000年减少了5%;(2)生态状况“优”的面积占比在2016年发生明显转折,在此之前呈现增长趋势,之后呈现下降趋势。

2.2 省际尺度的生态状况变化

逐年计算中国34个省(市、自治区)生态指数的均值发现:(1)20年间各省(市、自治区)生态状况均未出现“差”的级别,每年均为“较差”级别的省(自治区)为6个,分别是新疆、宁夏、内蒙古、青海、甘肃和西藏。6个省(自治区)中除西藏外的5个省(自治区)*RSEI*均呈现增加趋势,表明生态状况均在改善,其中宁夏和青海实现了*RSEI*由负转正。(2)生态状况为“良及以上”的省(市、自治区)从2000年的21个增长到2019年的26个,然而生态状况级别为“中”的级别个数在不断减少,这说明生态状况一般的省(市、自治区)生态状况得到改善,跻身到“良及以上”的级别。(3)2000年生态状况级别为“优”的省(市、自治区)有7个,而*RSEI*大于1的只有台湾地区;2019年生态状况级别为“优”的省(市、自治区)有12个,其中福建、台湾、广西等8个省(自治区)*RSEI*指数均大于1。(4)20年间,除了上海、西藏



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统网站下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 2000—2019年中国*RSEI*均值空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of *RSEI* mean in China from 2000 to 2019

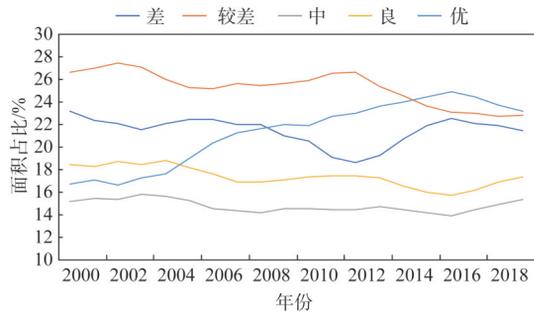


图2 2000—2019年中国不同生态状况级别年际变化
Fig. 2 Interannual changes of different ecological conditions in China from 2000 to 2019

和澳门 *RSEI* 数值减小之外, 其他省(市、自治区) *RSEI* 均呈现增长趋势; 其中增长变化最大的三个省份分别为山西、陕西和河北, 分别增长 0.29、0.25 和 0.19, 减少最多的三个省(市、区) 分别为上海、澳门和西藏(表 1)。

表 1 20 年间 *RSEI* 增加最多和减少最多的前三省(市、区)

Table 1 The three provinces with the fastest increase and decrease change of *RSEI* in China from 2000 to 2019

省(市、区)	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年	20年间差值
山西	0.20	0.34	0.41	0.50	0.50	0.29
河北	0.33	0.43	0.48	0.55	0.52	0.19
甘肃	-0.06	-0.02	0.01	0.02	0.06	0.12
西藏	-0.05	-0.05	-0.05	-0.08	-0.06	-0.01
澳门	0.40	0.37	0.45	0.47	0.38	-0.02
上海	0.83	0.68	0.65	0.66	0.68	-0.14

2.3 中国生态状况变化的时空格局

统计 2000—2019 年期间每 5 年生态状况等级变化的面积(表 2、表 3), 得到生态状况总体呈现出“先稳步增长后波动维稳”的趋势。分析 4 个阶段不同变化类型的面积发现: (1) 生态状况“不变”的面积占最大比例, 均在 70% 之上; (2) “明显变差”和“变差”的面积占比较小, 分别小于 0.13% 和 7.38%; (3) 由生态状况相对较差级别转到相对较好级别的面积要多于逆向转移趋势, 因此生态状况变好面积增加。进一步逐像元分析 *RSEI* 多年变化趋势, 发现 *RSEI* 变化在空间上东西分异明显(图 3), 中部和东北部呈现生态明显变好的趋势, 而西南和西北地区受制于自然环境呈现了不明显的生态状况改善。具体来看, 20 年间生态状况变好区域分布在东北平原、黄土高原、华北平原南部和北部以及长江中下游平原的北部地区。生态状况变差区域分布在天山山脉、青藏高原中部、华北平原中部以及长江三角洲等地区。

表 2 2000—2019 年每五年生态状况变化面积及占比

Table 2 Change area and proportion of *RSEI* in China in every five years from 2000 to 2019

级别	2000—2005年		2005—2010年		2010—2015年		2015—2019年	
	面积/万 hm ²	百分比/%						
I	69	0	23	0	92	0	1	0
II	5184	6	4146	4	5431	6	69	7
III	76117	81	77861	83	67253	72	782	84
IV	11960	13	11289	12	19216	21	82	9
V	107	0	181	0	1466	2	1	0

注: I、II、III、IV 和 V 表示生态状况的变化级别分别为明显变差、变差、不变、变好和明显变好。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文借助 GEE 平台快速合成了 2000—2019 年无云 MODIS 遥感影像数据, 基于平台强大的云计算能力计算四个反映生态的遥感指标 *NDVI*、*Wet*、*LST* 和 *NDSI*, 经过主成分分析法生成纯遥感驱动的 *RSEI*, 对 20 年来中国生态状况变化的宏观格局进行分析发现:

表3 2000—2019年每五年生态状况变化面积转移矩阵

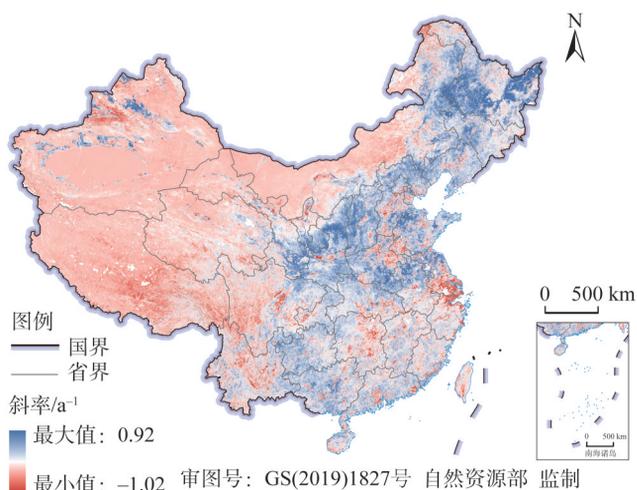
Table 3 Transition matrix of the *RSEI* in China in every five years from 2000 to 2019(万 hm^2)

时段/年	生态级别	差	较差	中	良	优
2000—2005	差	17709	1199	3	0	0
	较差	1768	18673	1043	21	2
	中	10	2862	9085	1242	38
	良	0	63	3005	11996	1374
	优	0	1	25	3569	13844
2005—2010	差	16641	680	2	0	0
	较差	2264	18872	933	8	0
	中	5	1866	9593	1072	11
	良	1	86	2659	11597	1199
	优	0	7	72	3787	16239
2010—2015	差	16509	2084	2	0	0
	较差	794	17746	1824	14	1
	中	18	2114	8463	1530	19
	良	2	127	2195	10627	1269
	优	0	8	70	3383	18823
2015—2019	差	17062	1059	3	1	0
	较差	1526	16757	1147	58	1
	中	6	2507	8916	1767	53
	良	0	52	2041	10776	2488
	优	0	1	21	1607	19739

(1) 技术层面上, GEE 平台能够为海量遥感数据在生态评估中的应用提供强有力的支持, 实现中国在 2000—2019 年生态状况变化的监测。该平台能够实现数据近实时处理, 为生态状况快速监测提高效率。

(2) 空间格局上, 基于多年平均 *RSEI* 指数得出中国生态状况整体呈现“东南优、西北差”的空间格局, 与我国自然格局相对应。*RSEI* 指数的四个组分中 *NDVI*、*Wet* 与指数呈现正相关^[1], 因此植被和水分条件在生态环境质量评价中占据重要地位。沿海包

括台湾、广东、福建、广西、海南等省(自治区), 处于水热条件优越的亚热带地区, 具有适宜植物生长的气候, 因此得到的 *RSEI* 数值高; 而新疆西南部、内蒙古西北部、青海西部、甘肃与宁夏等海拔较高的内陆干旱、半干旱地区, 气候寒冷干燥, 生态状况脆

图3 2000—2019年中国生态状况 *RSEI* 变化率的空间分布Fig. 3 Spatial distribution of the slope of China's *RSEI* from 2000 to 2010

弱,不利于植被生长, *RSEI*指数偏低甚至为负。

(3) 时间变化上, *RSEI*整体呈稳健增长趋势,表明中国生态状况整体呈现变好。在东北华北平原、黄土高原、华北平原南部和北部以及长江中下游平原北部地区、西北荒漠区的准噶尔盆地南部等区域 *RSEI*上升明显,而天山山脉、青藏高原西南部、华北平原中部以及长江三角洲等地区 *RSEI*有所下降。

3.2 讨论

3.2.1 生态状况变化的驱动力

影响生态状况变化的因素有很多,大量研究结果表明,生态环境变化往往受自然和人文等因素的多重机制驱动。气候条件的变化、人类的生产生活和部分地区的生态保护工程等共同作用影响了区域生态状况的变化。

多年平均生态状况呈现的“东南好、西北差”的空间格局主要与自然因素有关,其中,温度和降水是影响生态状态变化的重要自然因素。如生态状况较差的天山山脉和青藏高原东部等地区位于我国内陆的干旱和高寒地区,极端的温度、海拔和降水条件造成了较弱的生态本底。而云贵高原、东南丘陵以及长江中下游平原地区,由于其丰沛的降水、较低的海拔和适宜的气候为植被生长提供了先天有利的条件。

此外,生态状况的变化易受人类活动影响,人口增长、城镇化发展、能源消耗结构调整、退耕还林还牧和农业结构调整等都会对区域生态状况产生影响。一方面,人类活动强度和范围逐渐扩大,包括华北平原中部、安徽、江苏北部地区和长江中游地区人类活动影响力呈现持续增强的态势^[17,18],说明人类经济活动一定程度上破坏了生态环境,起到负面效应;另一方面,退耕还林工程和三北防护林建设^[19]等国家生态保护政策对于区域性的生态状况改善起到了重要作用,如黄土高原地区自1999年启动的退耕还林还草工程使区域生态状况得到明显改善^[20,21];草原生态保护补助奖励的政策以及三江源自然保护区生态保护和建设工程等工程措施也使得内蒙古、甘肃和青海等地区生态状况呈现改善态势^[22-26]。

3.2.2 不确定性

本文完成了2000年以来中国时空全覆盖的*RSEI*计算和分析,揭示了生态状况变化的宏观格局,但*RSEI*指数仅是基于遥感绿度、热度、干度和湿度生成的快速、自动的评价指标,诸多环节仍有待改进。例如,目前考虑的四个指标一定程度上反映了生态系统的结构和功能,但不能完全覆盖和捕捉生态状况的优劣,如灌木入侵草场可能伴随着绿度的提高,而*RSEI*指标无法对由于生态退化带来的变绿与生态改善的变绿进行有效区分;再如东北地区水稻和玉米等作物的大规模种植带来了*RSEI*的增加^[27],但耕地、水田的扩张除带来变绿和降温外,也带来水资源等其他压力,而目前对这些生态压力的影响难以体现。目前的理论分析多是以人类福祉为目标考量生态状况,正如LUCC嵌入到生态系统服务的研究中^[28],如何权衡不同生态状况影响因子,采用更全面和综合的指标来客观量化生态状况的变化值得进一步探讨。本文仅简要定性地分析了影响生态状况空间格局和时间变化的主要因素,但综合考虑不同因子的权衡分析仍有待展开。

致谢:感谢江东研究员在论文撰写和修改过程中提供的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] BRYAN B A, GAO L, YE Y Q, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [2] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究. *环境科学研究*, 2000, (3): 33-36. [YE Y P, LIU L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China. *Research of Environmental Science*, 2000, (3): 33-36.]
- [3] 傅伯杰. 中国各省区生态环境质量评价与排序. *中国人口·资源与环境*, 1992, 2(2): 48-54. [FU B J. The elevation of eco-environmental qualities in China. *China Population, Resources and Environment*, 1992, 2(2): 48-54.]
- [4] 厉彦玲, 朱宝林, 王亮, 等. 基于综合指数法的生态环境质量综合评价系统的设计与应用. *测绘科学*, 2005, (1): 89-91. [LI Y L, ZHU B L, WANG L, et al. Designing and application of comprehensive index method based ecological environment quality comprehensive evaluation system. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, (1): 89-91.]
- [5] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897. [XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897.]
- [6] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析. *地球信息科学学报*, 2019, 21(9): 1382-1391. [CHEN W, HUANG H P, TIAN Y C, et al. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan Region based on Google Earth engine. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1382-1391.]
- [7] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1438-1449. [WU Y J, ZHAO X S, XI Y, et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1438-1449.]
- [8] 吴全, 范海娇, 徐艳红. 锡林郭勒盟生态状况等级区划分研究. *内蒙古师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2015, 44(4): 147-151. [WU Q, FAN H J, XU Y H. A study on the grading of ecological situations in Xilinguole League. *Journal of Inner Mongolia Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2015, 44(4): 147-151.]
- [9] HU X S, XU H Q. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess regional ecological change. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5381-5393.
- [10] WEI W, GUO Z C, XIE B B, et al. Spatiotemporal evolution of environment based on integrated remote sensing indexes in arid inland river basin in Northwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(13): 13062-13084.
- [11] JING Y Q, ZHANG F, HE Y F, et al. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105874, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105874>.
- [12] WU J J, WANG X, ZHONG B, et al. Ecological environment assessment for Greater Mekong Subregion based on Pressure-State-Response framework by remote sensing. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106521, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106521>.
- [13] GOWARD S N, XUE Y K, CZAJKOWSKI K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 225-242.
- [14] ZHANG X Y, SCHAAF C B, FRIEDL M A, et al. MODIS tasseled cap transformation and its utility. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002: 1063-1065.
- [15] ROY P, RIKIMARU A, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 2002, 43: 39-47.
- [16] XU H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29: 4269-4276.
- [17] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592. [A D, ZHAO W J, GONG Z N, et al. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north china plain from 1981 to 2013. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 576-592.]
- [18] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-

337. [CHEN W X, LI J F, ZHU Z J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem service value in the Middle Yangtze River region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337.]
- [19] 道日娜. 气候与土地利用变化对三北地区植被NDVI的影响研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019. [DAO R N. Effect of climate and land use change on vegetation NDVI in the Three North Region. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2019.]
- [20] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近30 a黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293, 400. [ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982-2009. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 287-293, 400.]
- [21] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1748-1758. [ZHANG W Q, SUN C J, LI X G. Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi province based on remote sensing image. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1748-1758.]
- [22] 胡振通. 中国草原生态补偿机制: 基于内蒙甘肃两省(区)的实证研究. 北京: 中国农业大学, 2016. [HU Z T. China grassland eco-compensation mechanism: Empirical research in Inner Mongolia and Gansu. Beijing: China Agricultural University, 2016.]
- [23] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20. [SHAO Q Q, FAN J W, LIU J Y, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan Region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 3-20.]
- [24] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005—2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656. [SHAO Q Q, LIU J Y, HUANG L, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1645-1656.]
- [25] 李付杰, 孙倩莹, 王世曦, 等. 2000—2015年三江源区生态系统服务评估. *环境工程技术学报*, 2020, 10(5): 786-797. [LI F J, SUN Q Y, WANG S X, et al. Valuation of ecosystem services in Three-River Headwaters Region from 2000 to 2015. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(5): 786-797.]
- [26] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376. [LIU J Y, XU X L, SHAO Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364-376.]
- [27] 李汝资, 宋玉祥, 李雨婷, 等. 近10 a来东北地区生态环境演变及其特征研究. *地理科学*, 2013, 33(8): 935-941. [LI R Z, SONG Y X, LI Y D, et al. The eco-environmental evolution and the character of Northeast China in recent 10 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(8): 935-941.]
- [28] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1172-1189. [ZHANG Y S, WU D T, LYU X. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1172-1189.]

Spatio-temporal changes in remote sensing-based ecological index in China since 2000

HE Ying-li^{1,2}, YOU Nan-shan^{1,2}, CUI Yao-ping³, XIAO Tong⁴, HAO Yuan-yuan⁵, DONG Jin-wei¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 4. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 5. Big Data Research Institute of Mongolian Grassland Ecology, Hohhot 010000, China)

Abstract: Since the beginning of the 21st century, China has responded to a national land-system sustainability emergency via an integrated portfolio of large-scale programmes. A series of ecological restoration projects and land regulating and planning policies have been implemented for sustainable development, which substantially improved the security status of the country's ecology. However, comprehensive assessments of the ecological status based on objective data and framework are still limited. Remote sensing-based ecological index (RSEI) has been proposed as an objective and effective approach for assessing ecological security on a regional scale. However, a national scale application has not been conducted yet. Here we generated the annual *RSEI* products from 2000 to 2019 by using four indicators (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Soil Index (NDSI), Wetness Index (Wet), and Land Surface Temperature (LST) based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data as well as the Google Earth Engine (GEE)- a cloud computing platform. The results showed that the multi-year average *RSEI* showed higher values in the southeast coastal regions compared with the northwestern regions, the regions with superior hydrothermal conditions have high *RSEI* values, while the arid and semi-arid inland areas with higher elevations and cold-dry climates have low *RSEI* values and fragile ecological conditions. In general, the whole country experienced a significant improvement of *RSEI*, and all the provincial-level regions in China, except Shanghai, Tibet, and Macao, have shown an increasing *RSEI*. The three provinces with the fastest growing rates were Shanxi, Shaanxi, and Hebei, with increases of 0.29, 0.25, and 0.19, respectively. The *RSEI* increased significantly in the Northeast China Plain, Loess Plateau, south and north of the North China Plain, the north of the middle and lower reaches of the Yangtze River Plain, and the south of the Junggar Basin in the northwest desert region, while the *RSEI* decreased in the Tianshan Mountain range, the southwest of the Qinghai-Tibet Plateau, the central part of the North China Plain and the Yangtze River Delta. This study quantitatively evaluated the macro patterns of *RSEI* changes based on GEE since 2000, and expects to support decision making on land use management and ecological protection.

Keywords: ecological status; remote sensing-based ecological index (RSEI); remote sensing cloud computing; MODIS; Google Earth Engine (GEE); spatio-temporal analysis