



生态学杂志
Chinese Journal of Ecology
ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 2000—2017年甘肃省生态环境质量时空演变格局及其影响因素
作者: 宋媛, 石惠春, 谢敏慧, 赵鹏霞
DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.026
收稿日期: 2019-03-26
网络首发日期: 2019-09-11
引用格式: 宋媛, 石惠春, 谢敏慧, 赵鹏霞. 2000—2017年甘肃省生态环境质量时空演变格局及其影响因素. 生态学杂志.
<https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201912.026>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.026

2000—2017年甘肃省生态环境质量时空演变格局及其影响因素

宋媛 石惠春* 谢敏慧 赵鹏霞

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要 以生态环境较为脆弱的甘肃省为研究区, 基于RS和GIS, 从自然因素和人为因素两个方面, 选取11个指标, 运用空间主成分分析法(SPCA)构建生态环境质量指数(EQI), 对甘肃省生态环境质量时空分布特征及其影响因素进行了分析。结果表明: 从甘肃省生态环境质量空间分布特征来看, 2000和2017年的生态环境质量在空间分布上存在一定的两极分化现象, 生态环境质量等级为差、较差等级主要集中在甘肃省西北地区, 而生态环境质量等级为良、优等级主要集中在甘肃省东南地区; 从甘肃省生态环境质量时间演变格局来看, 17年间生态环境质量整体上呈现有所好转的趋势; 从甘肃省生态环境质量影响因素来看, 总体上气候条件、植被覆盖、土地利用方式和土壤基质等因素的影响作用占据主导地位, 而人口经济、地形地貌和水文环境等因素的影响作用较弱。

关键词 生态环境质量; 时空变化; 空间主成分分析; 地理探测器; 甘肃省

Spatiotemporal evolution pattern and influencing factors of eco-environmental quality in Gansu from 2000 to 2017. SONG Yuan, SHI Hui-chun*, XIE Min-hui, ZHAO Peng-xia (*College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: In this paper, Gansu with its relatively fragile ecological environment was selected as the study area. Based on RS and GIS, the 11 indicators included two parts: natural factors and human factors. The spatial principal component analysis (SPCA) was used to construct the eco-environmental quality index (EQI). The spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of eco-environmental quality in Gansu were analyzed. The results showed that from the perspective of spatial distribution characteristics of ecological environmental quality in Gansu province, the eco-environmental quality in 2000 and 2017 showed a polarization phenomenon in term of spatial distribution. The bad and poor classifications of eco-environmental quality were mainly concentrated in northwest Gansu, while the good and excellent classifications of eco-environmental quality were mainly concentrated in southeast Gansu. From the temporal evolution pattern of eco-environmental quality in Gansu, there was a trend of improvement during the 17 years. On the whole, the influence of factors such as climate condition, vegetation cover, land use mode and soil matrix was dominant, while the influence of such as population economy, landform and hydrological environment was weak.

Key words: eco-environmental quality; spatiotemporal change; spatial principal component analysis (SPCA); GeoDetector; Gansu.

生态环境是人类发展和社会进步的前提。生态环境质量反映了生态环境的优劣程度, 能够以量化的方式描述生态环境的好坏。生态环境质量是以生态学理论为基础, 从特定的时

国家自然科学基金项目(41161022)和甘肃省科技支撑计划项目(090NKCA075)资助。

收稿日期: 2019-03-26 接受日期: 2019-09-02

*通讯作者 E-mail: shc8@163.com

空角度在生态系统层次上剖析生态环境对人类生存发展的适宜性程度(刘盼等, 2018)。自 20 世纪以来, 随着社会经济的高速发展, 植被衰减、土地退化、水土流失、大气污染、生物多样性锐减等生态环境问题日益凸显(Xiong *et al.*, 2007; 石三娥等, 2018), 给当地人们的生活生产带来了极大的威胁(周文英等, 2014)。对生态环境质量的评价以及动态监测尤为重要。

目前, 有关于生态环境质量相关评价的研究已逐渐成为当下的研究热点, 受到国内外学者的广泛关注(Suciu *et al.*, 2017; 王晓君等, 2017; Musse *et al.*, 2018; 杨江燕等, 2019), 众多学者从不同的评价指标体系和评价方法上对生态环境质量进行定量评价。在不同指标体系的构建上, 大多学者从不同的视角出发, 选择适合该研究区的指标。如: 王平等(2006)从自然环境、环境污染、城市建设和社会经济等 4 个方面共选取 20 个指标采用层次分析法对南京市生态环境质量进行评价; 徐涵秋(2013)基于遥感技术, 从绿度、湿度、热度和干度等四大生态要素考虑选取并计算出 4 个遥感指标, 并利用主成分分析法建立了遥感生态指数 RSEI, 应用在城市生态环境评价中; 常中兵等(2017)选取生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫、污染负荷等 5 个指标, 通过计算生态环境质量总指数, 用以定量评估河南省生态环境质量时空变化。目前针对生态环境质量的评价指标体系尚不能全面的去描述区域生态环境的全貌, 因此, 合理、科学和有针对性地选择符合区域生态特征的评价指标是必不可少的。从不同评价方法上来看, 在生态环境质量评价中比较常用的方法主要有层次分析法(李崧等, 2006)、主成分分析法(徐涵秋, 2013; 宋慧敏等, 2016)、熵权法(Xu *et al.*, 2018)、模糊神经网络法(柴燕妮等, 2018)、综合指数法(厉彦玲等, 2005)、灰色聚类分析法(厉彦玲, 2007)和变异系数法(刘轩等, 2016)等。到目前为止, 尚无统一、确定的方法用于评价区域生态环境质量, 但客观评价方法的使用已成为当今生态环境质量评价的主流。空间主成分分析(SPCA)是目前广泛应用于环境综合评价的客观方法, 相比主成分分析(PCA)来说, 不仅具有降维和减少主观影响的作用, 而且能够考虑不同因素之间的空间关系(Zou *et al.*, 2017)。因此, SPCA 在各个领域被广泛运用(Parinet *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2018)。

甘肃省是古丝绸之路的黄金地段, 但其生态环境十分脆弱(纪学朋等, 2017)。本研究基于 RS 和 GIS, 在影响生态环境变化的自然和人为两个视角, 从气候、植被、地形、水文、土壤、土地、人口及经济等八个方面共选取 11 个指标, 利用空间主成分分析(SPCA)对甘肃省生态环境质量的时空演变规律进行定量评价, 以期甘肃省生态保护与环境恢复提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃省位于我国西北内陆地区, 介于 $32^{\circ}11'N$ — $42^{\circ}57'N$, $92^{\circ}13'E$ — $108^{\circ}46'E$ 之间(庞素菲等, 2019), 东接陕西, 西达新疆, 南瞰巴蜀青海, 北扼宁夏、内蒙古, 总面积为 $45.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇于此地, 境内地形起伏多变, 山脉纵横交错, 海拔高差悬殊, 高山、盆地、平原、沙漠和戈壁等地貌类型丰富多样。气候类型多样, 年平均气温在 $0 \sim 16^{\circ}\text{C}$, 大部分地区气候干燥, 干旱、半干旱区约占总面积的 75%。而年降水量在 $36.6 \sim 734.9 \text{ mm}$, 大致呈现从东南向西北递减的趋势, 陇南山区和祁连山东段降水偏多, 乌鞘岭以西地区降水明显偏低。截至到 2017 年末, 甘肃省常住人口约 2625.71×10^4 人, 其中, 城镇人口 1218.07×10^4 人, 占常住人口比重为 46.39%; 2017 年实现地区生产总值 7677.0×10^8 元, 比 2016 年增长 3.6%。现管辖 12 个地级市、2 个自治州包括 86 个县(市、区)。

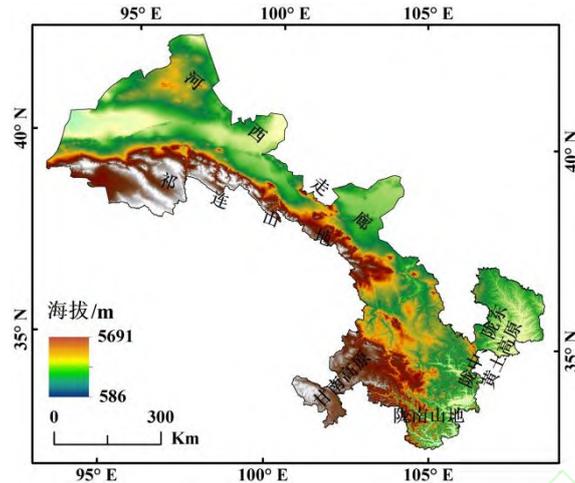


图 1 研究区概况图

Fig.1 Location of study area

1.2 数据源及预处理

本研究采用的数据包括：归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据；地表温度(land surface temperature, LST)数据；数字高程模型(DEM)数据；气象数据；社会经济统计数据；其他数据包括河流数据、土壤侵蚀数据、土壤有机质含量数据和土地利用数据。

根据研究需求，本文对原始数据做如下进一步的处理：

(1) NDVI 和 LST 的提取：本研究选取 MODIS 数据的 MOD13A1 产品(植被指数数据)和 MOD11A2 产品(地表温度数据)，数据来源于 NASA 网站 LAADS DAAC 数据中心(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)，其行列号为 h25v04、h25v05、h26v04、h26v05，时间上选择 2001 和 2017 年(由于 MODIS 数据 2000 年缺失 1 月份数据，本研究采用 2001 年的数据来代替 2000 年)。其中，MOD13A1 产品数据时间分辨率为 8 天，空间分辨率为 1 km×1 km，而 MOD11A2 产品数据时间分辨率为 16 天，空间分辨率为 500 m×500 m。为了统一时间和空间分辨率，采取投影转换、影像拼接、栅格重采样、最大值合成等方法，将两个数据产品处理为时间分辨率为 1 月、空间分辨率为 1 km×1 km 的数据，再利用均值法将月数据处理成年数据，用于获取研究区 2001 和 2017 年的 NDVI 和 LST 数据(庞素菲等, 2019)。

(2) 海拔和坡度的提取：DEM 来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)，空间分辨率为 90 m×90 m。海拔可由 DEM 直接获取，而坡度则要通过 ArcGIS 10.2 中 Slope 工具进行提取。

(3) 年降水量的提取：降水量数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)，本研究将 2000 和 2017 年各月降水量数据求和得到年降水量，通过甘肃省及周边地区 65 个气象站点数据，考虑到海拔对降水的影响，基于 ArcGIS 10.2 的 Geostatistical Analyst 模块，采用克里金插值方法(Kriging)进行空间插值，以实现年降水的空间可视化(田璐等, 2018)。

(4) 人口密度和经济密度的提取：人口和 GDP 数据主要来源于 CNKI 中国经济社会大数据研究平台(<http://data.cnki.net>)和甘肃省统计年鉴。本研究通过统计甘肃省 2000 和 2017 年各县区的人口及 GDP 数据，依据各县区面积分别算出人口密度和经济密度，分别赋值到各县区的矢量图层，采用克里金插值法(Kriging)进行空间插值，以获取人口密度与经济密度 1 km×1 km 的栅格数据(魏伟等, 2017)。

(5) 距主要河流距离：主要河流数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>)的 1:1000000 中国基础地理数据库。本研究利用 ArcGIS 10.2 中 Spatial Analyst Tools 工具集中的欧氏距离(Euclidean Distance)工具进行栅格空间化，其值越大代表该空间位置距主要河

流距离越大,受主要河流影响就越小,也就越干旱缺水。

(6) 土壤侵蚀强度和土壤有机质含量的提取:土壤侵蚀数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),土壤有机质含量数据则由世界土壤数据库(HWSD)(<http://www.fao.org>)提供。其中,土壤侵蚀强度根据不同的土壤侵蚀等级包括微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀六种侵蚀类型,分别赋值为1~6;土壤有机质含量则根据获得的中国土壤数据集的有机碳含量属性,采用公式(1)计算有机质含量。

$$SOMC = \frac{TOC}{0.58} \quad (1)$$

式中: $SOMC$ 为土壤有机质含量(%); TOC 为土壤表层有机碳含量(%)。

(7) 土地利用类型的提取:土地利用由中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供,其中共选择2000和2015年两期数据,因无2017年的土地利用数据,本研究采用2015年来代替2017年。结合甘肃省具体情况,依据分类标准,采用耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型进行定量化处理。其中,未利用土地、建设用地、耕地、草地、林地和水域分别赋值为1~5(王志杰等,2018)。

因各种数据的投影方式、坐标系和比例尺等均不尽相同,所以将所有数据的空间分辨率统一为1 km×1 km的栅格形式,同时采用相同的Krasovsky椭球体坐标和Albers投影,以便计算。

1.3 评价指标的选择及合理性

影响区域生态环境质量的因素主要包括自然和人为两个方面(周文英等,2014)。本研究遵循全面性、科学性、系统性、易获取性、独立性、简明性等指标构建的基本原则,结合甘肃省自然环境和社会经济的特征,选取11个指标用于构建甘肃省生态环境质量的评价指标体系。具体而言:

区域生态环境中各种自然因素长期交互的结果,是形成区域生态环境本底条件的基础(Hu *et al.*, 2018)。甘肃省位于我国西北内陆地区,地处青藏高原、内蒙古高原、黄土高原三大高原交汇地带,海拔高差悬殊,地形起伏多变,具备多样的地貌类型和多变的气候条件差别。此外,植被覆盖的分布存在着明显的南北差异(纪学朋等,2017)。以上种种构成了甘肃省独特的区域自然特征。因此,本研究选取海拔和坡度表示地形地貌因素;年降水量、地表温度和距主要河流距离表达区域水热资源基本状况;土壤有机质含量反映区域内植物生长和动物生存的适宜状况;土壤侵蚀强度代表区域内受水力,风力和冻融作用的土壤流失特征;NDVI反映区域内植被覆盖程度,代表植被受外界因素变化的抗干扰和恢复能力。

人类活动对生态环境所造成的负荷主要表现为社会经济的干扰影响(纪学朋等,2017)。长期以来,甘肃省相对于其他省份其经济发展水平相对落后,人口地域分布差异性显著,城乡结构呈二元化分布明显。同时近年来人口数量的激增以及资源的不合理利用等人类干扰活动使区域生态环境的承载力不堪重负(赵鸿雁等,2018)。因此,本研究采用人口密度、经济密度和土地利用类型来表征甘肃省受人类干扰活动所产生的压力状况。

为了验证11个指标间是否存在信息重叠,以确保评价结果的准确性。因此,本研究采用多元共线性诊断的方法进行判断。常用的多元共线性诊断指标主要有方差膨胀因子(VIF)和容忍度(TOL)。这两个指标互为倒数关系,当 $VIF < 10$ (即 $TOL > 0.1$)时,表明所选指标不存在明显的多元共线性(黄明等,2012)。具体做法为:在ArcGIS 10.2中,采用5 km×5 km的渔网贯穿整个甘肃省边界图层,共均匀生成16870个点,借助这些点读取11个指标和EQI的数值,在SPSS 21.0中计算出共线性诊断指数(郭泽呈等,2019)。表1是对这两个指标的统计。结果表明11个指标间不存在明显的共线性,没有信息重叠的现象。因此,这11个指标用于本研究是合理的。

表 1 多元共线性诊断结果

Table 1 Results of multicollinearity diagnostics

指标	2000		2017	
	方差膨胀因子	容忍度	方差膨胀因子	容忍度
	VIF	TOL	VIF	TOL
年降水量	9.276	0.108	7.888	0.127
地表温度	5.504	0.182	5.437	0.184
NDVI	6.920	0.145	8.344	0.120
土地利用类型	2.324	0.430	2.336	0.428
坡度	1.745	0.573	1.735	0.576
海拔	3.966	0.252	4.040	0.248
距主要河流距离	1.302	0.768	1.271	0.787
土壤侵蚀强度	2.151	0.465	2.103	0.475
土壤有机质含量	1.666	0.600	1.650	0.606
人口密度	9.150	0.109	7.333	0.136
经济密度	5.770	0.173	5.849	0.171

1.4 指标标准化

不同指标因其数据类型和量纲均具有差异性,无法直接进行计算与评估,须对各指标进行标准化处理,这里主要采用极差标准法(周文英等, 2014)。按照各指标对生态环境所起到不同的影响作用,把指标分为正向指标和负向指标。正向指标对生态环境起促进作用,其值越大,生态环境质量越好,包括 NDVI、年降雨量、土地利用类型、海拔、坡度、土壤有机质含量和经济密度;反之则为负向指标,包括地表温度、距主要河流距离、土壤侵蚀强度和人口密度。计算公式如下:

正向指标:

$$J_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (2)$$

负向指标:

$$J_i = (I_{\max} - I_i) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (3)$$

式中: J_i 为第 i 指标的标准化值, I_i 为第 i 指标的原始值, I_{\max} 和 I_{\min} 为各指标原始值的最大值和最小值。

1.5 生态环境质量指数(eco-environmental quality index, EQI)

在生态环境质量的评价方法中,空间主成分分析法(Spatial Principal Component Analysis, SPCA)是基于主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)原理和地理信息系统(GIS),依据数据信息损失最小的原则,通过对原始空间坐标轴进行旋转,将多个指标转化为少数几个不相关的综合指标(王静等, 2017; 郭泽呈等, 2019)。PCA 和 SPCA 均可以降低主观影响,不需要人为去设置权重,具备一定的客观性,但是 PCA 很难考虑不同因素间的空间关系(Zou *et al.*, 2017)。SPCA 被用来检测各种因素的空间趋势,广泛的应用于环境的研究和评价中(Dallas *et al.*, 1996; Shi *et al.*, 2009; 王志杰等, 2018)。基于此,本研究在 ArcGIS 10.2 中,将标准化后 11 个指标进行空间主成分分析,计算出生态环境质量指数。计算公式为:

$$EQI = r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3 + \dots + r_n I_n \quad (4)$$

式中: EQI 为生态环境质量指数, r_n 为第 n 个主成分对应的贡献率, I_n 为第 n 个主成分。

当累计方差贡献率大于或等于 85%时,就能代表绝大多数原始数据的有关信息(王静等, 2017; Zou *et al.*, 2017)。为了客观真实获取甘肃省生态环境质量的相关信息,从表 2 可以直接观察到 2000 和 2017 年前 4 个主成分因子的累计贡献率均达到 89%以上,因此本研究选取前 4 个主成分因子进行拟合,计算公式为:

$$EQI_{2000} = 0.5709I_1 + 0.1688I_2 + 0.0837I_3 + 0.0676I_4 \quad (5)$$

$$EQI_{2017} = 0.5720I_1 + 0.1686I_2 + 0.0809I_3 + 0.0714I_4 \quad (6)$$

式中: EQI_{2000} 和 EQI_{2017} 为 2000 和 2017 年生态环境质量指数。

表 2 空间主成分分析结果

Table 2 Results of spatial principal component analysis

主成分因子	特征值		贡献率 (%)		累计贡献率 (%)	
	2000	2017	2000	2017	2000	2017
1	0.0807	0.0846	57.0892	57.1959	57.0892	57.1959
2	0.0239	0.0249	16.8779	16.8571	73.9671	74.0529
3	0.0118	0.0120	8.3707	8.0865	82.3378	82.1394
4	0.0096	0.0106	6.7602	7.1394	89.0980	89.2788
5	0.0059	0.0060	4.1851	4.0551	93.2831	93.3339
6	0.0048	0.0048	3.3846	3.2263	96.6677	96.5602
7	0.0020	0.0022	1.4457	1.4806	98.1134	98.0408
8	0.0010	0.0011	0.7152	0.7684	98.8286	98.8092
9	0.0008	0.0009	0.5958	0.5906	99.4244	99.3998
10	0.0005	0.0006	0.3333	0.3687	99.7577	99.7685
11	0.0003	0.0003	0.2423	0.2315	100.0000	100.0000

为了对比和分析局部地区生态环境质量的差异,需对 EQI 进行分级,这里本研究主要采用自然断点法(Jenks)进行划分。因各时期的分类标准应统一,否则不能进行比较分析(田璐等, 2018)。因此,2000 和 2017 年均采用 2017 年的分级标准。分级标准如表 3 所示。

表 3 甘肃省生态环境质量分级标准

Table 3 Classification criterion of eco-environmental quality in Gansu

等级	生态环境质量	生态环境质量指数值 EQI
1	差	<0.551
2	较差	0.551~0.815
3	中	0.815~1.014
4	良	1.014~1.208
5	优	≥1.208

1.6 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等(2017)提出的用来探测空间分异性及揭示其驱动因子的一种新的统计学方法。地理探测器共包括 4 个子探测器: 风险探测器、因子探测器、生态探测器以及交互探测器。其中因子探测器可探测某因子是否是变量 Y 的影响因素以及在多大程度上解释了变量 Y 的空间分异性机理(武鹏等, 2018; 叶妍君等, 2018)。本研究采用因子探测器对甘肃省生态环境质量的成因进行分析, 可用 q 值度量, 其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式中: $h = 1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层(Strata), 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。q 的值域为[0, 1], 值越大说明 Y 的空间分异性越明显; 如果分层是由自变量 X 生成的, 则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的影响程度就越大, 反之则越小。

2 结果与分析

2.1 甘肃省生态环境质量空间分布特征

通过计算甘肃省 EQI 值, 并参照表 3 进行分级。图 2 是分类后的空间分布图。结果表明, 2000 和 2017 年, 甘肃省生态环境质量在空间上存在两极分化现象, 同时在“西北—东南”方向具有明显空间异质性的分布特征。生态环境质量等级为差和较差的区域主要分布在酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市和武威市境内的裸土地、荒漠、戈壁等未利用地区; 而生态环境质量为良和优的区域主要集中在酒泉市、张掖市和武威市等地南部的祁连山、甘南高原, 陇南山地以及庆阳市与陕西省交界地带的陇东黄土高原的林地和草地等区域。省内生活居住区和经济发展区的生态环境质量大多为中、良两个等级, 而人工绿洲, 即农耕区(主要位于河西走廊地带, 即兰州至嘉峪关一线)大多处于中等等级, 其周围与荒漠、戈壁相互交

错分布，生态环境质量空间差异性显著。此外，从面积统计上看(图 3)，等级为差的区域面积几乎无明显变化(2000 年等级为差的面积占比为 29.87%，2017 年为 29.88%)，而较差和中等等级的面积有所较少(2000 年等级为较差和中的总面积占比为 39.24%，2017 年为 36.42%)，良和优等级的面积有所增加(2000 年等级为良和优的总面积占比为 30.89%，2017 年为 33.70%)，反映出 2017 年甘肃省生态环境质量呈现好转的趋势。

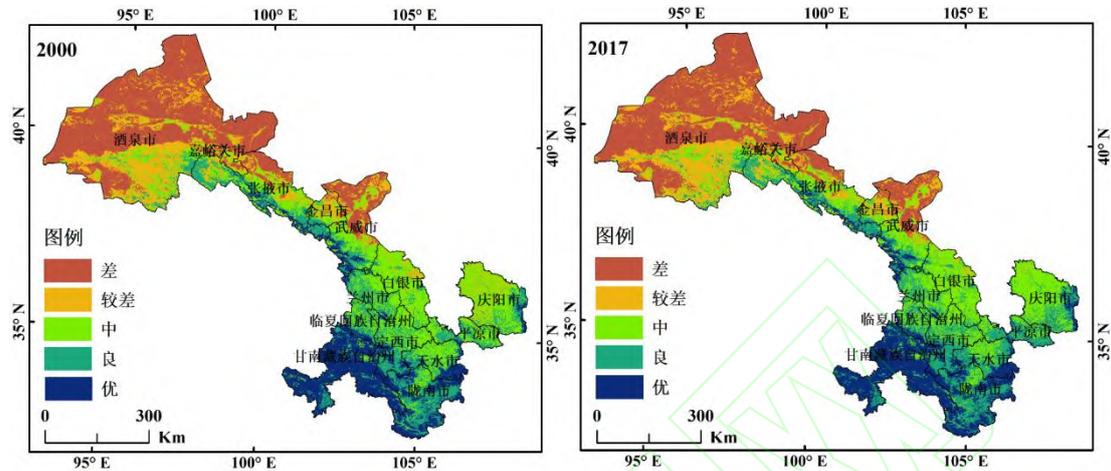


图 2 甘肃省生态环境质量指数分类空间分布
Fig.2 Spatial distribution of classification by EQI in Gansu

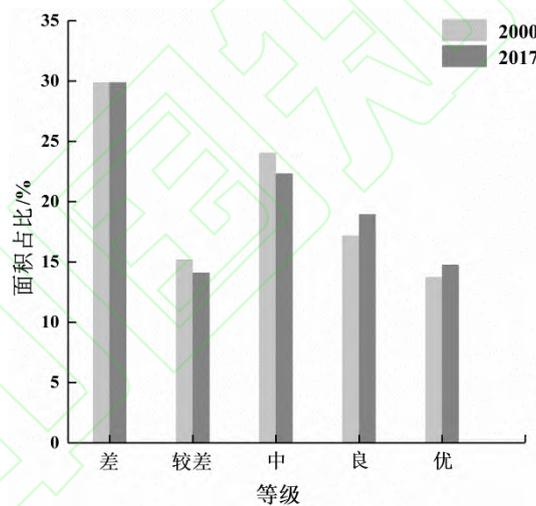


图 3 甘肃省生态环境质量指数分级面积统计
Fig.3 Area statistic of classification by EQI in Gansu

2.2 甘肃省生态环境质量时间演变格局

为了获取甘肃省在 2000—2017 年生态环境质量的变化状况，本研究将 2017 年和 2000 年两期生态环境质量分类图作减法运算，其中负值代表生态环境质量变差，0 值代表生态环境质量未发生明显变化，而正值代表生态环境质量变好。从表 4 可以看出，17 年间，甘肃省生态环境质量未发生明显变化的总面积达 $41.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，面积占比为 91.94%；生态质量变好的区域面积占总面积的 6.30%，而变差的区域面积仅占总面积的 1.76%，这一现象说明甘肃省生态环境质量在总体上有所好转。从空间分布上来看(图 4)，生态环境好转的区域主要集中在甘肃省西南部的白银市、定西市、陇南市、天水市、平凉市和庆阳市等地。而因社会经济的发展，城区、祁连山部分地区、部分荒漠与戈壁地带等生态环境质量呈现变差的趋势。这一现象说明 2000—2017 年，社会经济发展给当地生态环境带来一定的负面影响，城

区的扩张,不合理利用与开发资源等一系列人为干扰活动则是甘肃省局部地区生态环境质量变差的主要原因。

表 4 2000—2017 年甘肃省生态环境质量面积变化

Table 4 Area changes of EQI in Gansu from 2000 to 2017

变化类型	栅格数	面积($\times 10^4 \text{ km}^2$)	比例(%)
变差	7431	0.80	1.76
不变	388862	41.71	91.94
变好	26631	2.86	6.30
总计	422924	45.37	100.00

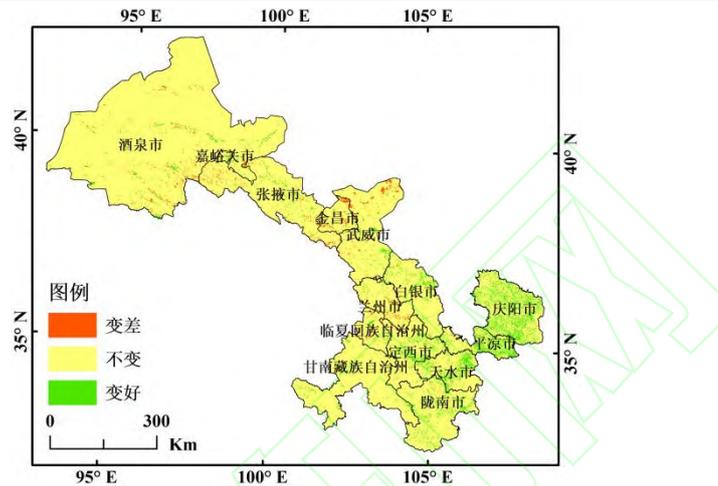


图 4 2000—2017 年甘肃省生态环境质量变化分布

Fig.4 EEQI changes of Gansu from 2000 to 2017

2.3 甘肃省生态环境质量的影响因素

为进一步分析甘肃省生态环境质量变化的内在原因,本研究引入地理探测器中的因子探测器作为分析工具,用以揭示生态环境质量的内部驱动因素(王劲峰等, 2017; 郭泽呈等, 2019)。其中 q 值表示该因子对生态环境的影响程度, p 值表示该因子是否通过显著性检验水平。表 5 为地理探测器的结果统计。结果表明, 17 年间, 除海拔、坡度和土壤侵蚀强度三个因子外, 其他各因子的 q 值均呈现不同程度的增长态势。2000 年对 EQI 影响较大的因子(q 值大于 0.4, 且 p 值为 0)排序依次为: 土地利用类型(0.763)>年降水量(0.733)>NDVI(0.707)>土壤侵蚀强度(0.619)>地表温度(0.614)>土壤有机质含量(0.440); 而 2017 年对 EQI 影响较大的因子依次为: NDVI(0.775)>土地利用类型(0.774)>年降水量(0.750)>地表温度(0.629)>土壤侵蚀强度(0.589)>土壤有机质含量(0.443)。在总体上, 2000 和 2017 年气候条件、植被覆盖、土地利用方式和土壤基质等因素对甘肃省的生态环境的影响占据主导地位, 而人口经济、地形地貌和水文环境等因素对生态环境质量的影响较弱。在 2000—2017 年的变化中, 植被覆盖这一因素的影响作用逐渐增大, 植被覆盖程度的提高在生态环境的恢复和治理中起着关键性的作用。当地政府应主动完善健全生态环境保护相关的政策与措施, 落实各方责任, 引领和带动当地居民增强环境保护意识; 从局部上, 对于城镇扩张以及经济发展区, 协调生态环境与社会经济发展之间的平衡关系, 对于生态环境遭到一定破坏的祁连山以及荒漠戈壁区, 需及时查找原因和尽快补救治理。生态环境是人们赖以生存和发展的基础和必要条件, 需要引起高度重视。

表 5 甘肃省 11 个影响因子的地理探测结果

Table 5 Geographical detector results of 11 impact factors of Gansu

因素	2000			2017		
	q 值	p 值	q 排序	q 值	p 值	q 排序
年降水量	0.733	0.000	2	0.750	0.000	3

地表温度	0.614	0.000	5	0.629	0.000	4
NDVI	0.707	0.000	3	0.775	0.000	1
土地利用类型	0.763	0.000	1	0.774	0.000	2
坡度	0.354	0.000	8	0.348	0.000	8
海拔	0.209	0.000	11	0.187	0.000	11
距主要河流距离	0.235	0.000	10	0.241	0.000	10
土壤侵蚀强度	0.619	0.000	4	0.589	0.000	5
土壤有机质含量	0.440	0.000	6	0.443	0.000	6
人口密度	0.368	0.000	7	0.397	0.000	7
经济密度	0.255	0.000	9	0.263	0.000	9

3 讨论

本文在借鉴现有生态环境质量相关研究成果的基础上(王贺年等, 2019; 吴宜进等, 2019), 从影响生态环境变化的自然和人为两个因素出发, 结合气候、植被、地形、水文、土壤、土地、人口和经济八个方面加以改进指标体系。采用空间主成分法用以获取更为客观和科学的评价结果。从宏观视角上, 以更高的空间尺度对甘肃省生态环境质量的时空变化规律以及影响因素进行了相关的探索。甘肃省生态环境质量的分布以及演变具有独特的规律。与前人对甘肃省生态环境的相关评价相比(王莉娜, 2015; 纪学朋等, 2017), 研究结果具有一定的一致性。相同之处在于, 监测出来的甘肃省生态环境好坏的分布特征均具有明显的两极分化现象, 与此同时, 在变化上也具有一致的结果, 由于社会经济的不断发展, 甘肃省各城区生态环境质量有所下降, 例如兰州市、嘉峪关市, 但“生态源地”(林地、草地)的生态环境整体上呈现转好的趋势, 对维护区域生态系统的平衡与协调起着促进作用。此外, 利用地理探测器, 分析和探测影响甘肃省生态环境质量变化的各种因素的作用, 用以揭示甘肃省生态环境变化的内在原因。本文不仅可以丰富生态质量评价方面的研究内容, 而且能为完善评价模型构建和评估内在驱动力影响机制提供理论借鉴。

需要说明的是, 生态环境是具有复杂性、综合性和模糊性的集合体, 而目前的评价方法以及评价指标体系尚不能科学和全面的评价。本研究在指标的选取上仍存在着一些不足, 从自然因素的角度, 并未考虑地下水、土壤湿度、大风天数等因子的影响; 从人为因素的角度, 本研究仅考虑了人口、经济以及土地利用方式对甘肃省生态环境的影响, 人为干扰活动包括很多方面, 采矿强度、工农业发展以及人类生产生活中的污染排放等环境问题都对区域生态环境具有一定的影响。因此, 在今后的研究中, 针对这些不足, 对于合理、科学和全面构建生态环境质量的评价指标体系仍有待进一步的探索。

4 结论

从空间分布特征来看, 甘肃省生态环境质量在 2000 年和 2017 年均存在两极分化现象, 甘肃省生态环境质量在空间上存在两极分化现象, 同时在“西北—东南”方向具有明显空间异质性的分布特征。生态环境质量等级为差和较差的区域主要分布在酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市和武威市境内的裸土地、荒漠、戈壁等未利用地区; 而生态环境质量良及优的区域主要集中在酒泉市、张掖市和武威市等地南部的祁连山区、甘南高原, 陇南山地以及庆阳市与陕西省交界地带的陇东黄土高原区。在不同等级的生态环境质量面积统计中, 在 2017 年, 较差和中等等级的面积有所较少, 而良和优等级的面积有所增加。

从时间演变格局来看, 17 年间生态环境质量整体上呈现有所好转的趋势。大部分区域生态环境质量未发生明显变化, 生态环境质量变好区主要集中在甘肃省西南地区, 生态环境质量变差区主要位于城区、祁连山部分地区、部分荒漠与戈壁地带。

从影响因素来看, 2000 和 2017 年气候条件、植被覆盖、土地利用和土壤基质等因素对甘肃省的生态环境的影响占据主导地位, 而人口经济、地形地貌和水文环境等因素对生态环境质量的影响较弱。在 2000—2017 年期间, 植被覆盖这一因素的影响作用逐渐增大, 植被覆盖程度的提高在生态环境的恢复和治理中起着关键性的作用。

参考文献

- 柴燕妮, 魏冠军, 侯伟, 等. 2018. 空间视角下的多尺度生态环境质量评价方法. 生态学杂志, **37**(2): 596-604.
- 常中兵, 秦奋, 韩志刚, 等. 2017. 基于 RS 和 GIS 的河南省生态环境质量动态评价. 水土保持通报, **37**(4): 132-137.
- 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 2019. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例. 生态学报, **39**(7): 2558-2572.
- 黄明, 张学霞, 张建军, 等. 2012. 基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟. 资源科学, **34**(4): 769-776.
- 纪学朋, 白永平, 杜海波, 等. 2017. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. 生态学报, **37**(17): 5861-5870.
- 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 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.
- 厉彦玲, 朱宝林, 王亮, 等. 2005. 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, **30**(1): 89-91.
- 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.
- 刘盼, 任春颖, 王宗明, 等. 2018. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价. 应用生态学报, **29**(10): 3347-3356.
- 刘轩, 岳德鹏, 马梦超. 2016. 基于变异系数法的北京市山区小流域生态环境质量评价. 西北林学院学报, **31**(2): 66-71.
- 庞素菲, 魏伟, 郭泽呈, 等. 2019. 基于 TVDI 的甘肃省农业旱情特征及其影响因素. 生态学杂志, **38**(6): 1849-1860.
- 石三娥, 魏伟, 杨东, 等. 2018. 基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变. 生态学杂志, **37**(4): 1152-1163.
- 宋慧敏, 薛亮. 2016. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析. 应用生态学报, **27**(12): 3913-3919.
- 田璐, 邱思静, 彭建, 等. 2018. 基于 PSR 框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估. 地理科学进展, **37**(12): 1682-1692.
- 王贺年, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 2019. 基于 DPSIR 模型的衡水湖湿地生态环境质量评价. 湿地科学, **17**(2): 193-198.
- 王静, 周伟奇, 许开鹏, 等. 2017. 京津冀地区的生态质量定量评价. 应用生态学报, **28**(8): 2667-2676.
- 王莉娜. 2015. 甘肃省生态环境质量评价指标体系及十年变化趋势研究(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 王平, 马立平, 李开. 2006. 南京市城市生态环境质量评价体系. 生态学杂志, **25**(1): 60-63.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器:原理与展望. 地理学报, **72**(1): 116-134.
- 王晓君, 吴敬学, 蒋和平. 2017. 中国农村生态环境质量动态评价及未来发展趋势预测. 自然资源学报, **32**(5): 864-876.
- 王志杰, 苏嫒. 2018. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析. 生态学报, **38**(2): 432-442.
- 魏伟, 颀耀文, 魏晓旭, 等. 2017. 基于 CLUE-S 模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置. 武汉大学学报: 信息科学版, **42**(9): 1306-1315.
- 武鹏, 李同昇, 李卫民. 2018. 县域农村贫困化空间分异及其影响因素——以陕西山阳县为例. 地理研究, **37**(3): 593-606.
- 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 2019. 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, **74**(7): 1438-1449.
- 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.

- 杨江燕, 吴 田, 潘肖燕, 等. 2019. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估. *应用生态学报*, **30**(1): 277-284.
- 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 2018. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. *地理研究*, **37**(1): 171-182.
- 赵鸿雁, 陈 英, 杨 洁, 等. 2018. 基于改进当量的甘肃省耕地生态系统服务价值及其与区域经济发展的空间关系研究. *干旱区地理*, **41**(4): 851-858.
- 周文英, 何彬彬. 2014. 四川省若尔盖县生态环境质量评价. *地球信息科学学报*, **16**(2): 314-319.
- Dallas MD, Kerzee RG, Bing-Canar J, *et al.* 1996. An indicator of solid waste generation potential for Illinois using principal components analysis and geographic information systems. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **46**: 414-421.
- Hu X, Xu H. 2018. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, **89**: 11-21.
- Musse MA, Barona DA, Rodriguez LMS. 2018. Urban environmental quality assessment using remote sensing and census data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **71**: 95-108.
- Parinet B, Lhote A, Legube B. 2004. Principal component analysis: An appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. *Ecological Modelling*, **178**: 295-311.
- Shi ZH, Chen LD, Hao JP, *et al.* 2009. The effects of land use change on environmental quality in the red soil hilly region, China: A case study in Xianning County. *Environmental Monitoring and Assessment*, **150**: 295-306.
- Suciu MC, Tavares DC, Costa LL, *et al.* 2017. Evaluation of environmental quality of sandy beaches in southeastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, **119**: 133-142.
- Xiong Y, Zeng GM, Chen GQ, *et al.* 2007. Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—A case study of Hunan Province, China. *Ecological Modelling*, **209**: 97-109.
- Xu H, Ma C, Lian J, *et al.* 2018. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China. *Journal of Hydrology*, **563**: 975-986.
- Zhao J, Ji G, Tian Y, *et al.* 2018. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. *Ecological Indicators*, **91**: 410-422.
- Zou T, Yoshino K. 2017. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal component approach in the Daxing'anling region, China. *Ecological Indicators*, **78**: 405-415.

作者简介 宋 媛, 女, 1993 年, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感。E-mail: kaway_ann@foxmail.com
责任编辑 李凤芹