

基于 RS 和 GIS 的石羊河流域生态环境 质量空间分布特征及其影响因素

郭泽呈¹ 魏 伟^{1*} 张学渊¹ 李振亚¹ 周俊菊¹ 颀斌斌²

(¹西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; ²兰州城市学院城市经济与旅游文化学院, 兰州 730070)

摘 要 基于 RS 和 GIS 技术方法, 选取自然资本、社会压力和经济支撑 3 方面的 11 个指标, 利用空间主成分分析法、变异系数法和层次分析法, 构建自然资本指数 (NCI)、社会压力指数 (SPI)、经济支撑指数 (ESI) 以及生态环境质量评价指数 (EQEI), 对石羊河流域生态环境质量空间分布特征及影响因素进行分析。结果表明: 石羊河流域生态环境质量整体处于较差水平, 生态环境质量等级为优、良的区域主要集中在流域上游的祁连山地区, 等级为较差及其以下的区域主要集中在中、下游的低山丘陵区 and 荒漠区。石羊河流域 EQEI 值在西南-东北方向上具有两极分化现象, 随着距离变化, 该值变化幅度较大, 存在明显的空间异质性。石羊河流域生态环境质量以高-低值两种聚集模式共存, 主要呈现“断裂式”分布, 并具备热点高度聚集、冷点高度聚集的特征。在石羊河流域生态环境质量的影响因素中, 自然资本因素占据主导地位, 社会压力因素次之, 经济支撑因素的影响最小。

关键词 生态环境质量; 空间分布特征; 影响因素; 生态环境质量评价指数; 石羊河流域

Spatial distribution characteristics and influencing factors of eco-environmental quality based on RS and GIS in Shiyang River Basin, China. GUO Ze-cheng¹, WEI Wei^{1*}, ZHANG Xue-yuan¹, LI Zhen-ya¹, ZHOU Jun-ju¹, XIE Bin-bin² (¹College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; ²School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China).

Abstract: Based on RS and GIS, 11 indexes from three aspects including natural capital, social pressure and economic supports were selected. The natural capital index (NCI), social pressure index (SPI), economic support index (ESI), and environment quality evaluation index (EQEI) were constructed by using spatial principal component analysis, variation coefficient method, and analytic hierarchy process. The spatial distribution characteristics and influencing factor of the environmental quality in Shiyang River Basin were analyzed. The results showed that the overall environmental quality was at poor level in Shiyang River Basin. The regions with better classes of environmental quality were mainly concentrated in the upper reaches of Qilian Mountains, and those with poorer classes were mainly concentrated in the middle-lower reaches of low hills land and desert. The EQEI value in Shiyang River Basin had polarization phenomenon from southwest to northeast. With the variation of distance, the value had large variation range, with obvious spatial heterogeneity. The environmental quality showed both high and low aggregation patterns, with "fault" distribution. There were highly clustered hot spots and highly clustered cold spots in the basin. Among the influencing factors of environmental quality, natural capital was the dominant one, social pressure was the second, and economic support was the least contributor.

Key words: eco-environmental quality; spatial distribution characteristics; influencing factor; eco-environmental quality evaluation index; Shiyang River Basin.

本文由国家自然科学基金项目(41861040/41761047)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41861040, 41761047).

2018-09-28 Received, 2019-06-17 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiweigis2006@126.com

生态环境是区域社会经济发展的基础与核心,生态环境质量的好坏标志着区域是否具有经济可持续发展以及社会生产和生活环境协调共存的能力^[1]。20 世纪 80 年代以来,人口的快速扩张以及人类对资源一系列无休止的开采等人为活动带来了一系列严重的生态问题,如水体污染、大气污染、矿产资源储量减少、生物多样性降低和自然灾害频繁爆发等,这些问题严重制约了社会经济的可持续发展^[2]。近年来,有关区域生态环境质量的研究已成为国内外热点领域之一^[3-5]。尤其在国 内,从不同评价区域、不同空间尺度和不同分析方法等角度对区域生态环境质量展开了大量工作。2015 年国家环保部门发布的《生态环境状况评价技术规范》(HJ/T 192—2015)^[6]基于多指标评价体系,采用生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数、污染负荷指数和环境限制指数对县域/省域/国家生态状况进行定量评价,同时,相对于 2006 年的《生态环境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T 192—2006)^[7],新增加了生态功能区、城市、自然保护区等专题生态区生态状况定量评价的相关内容^[8-9]。陆张维等^[10]选取人口密度、交通密度、空气质量、地表温度、植被盖度、水体覆盖率和工业密度,利用主成分分析法对杭州市主城区的居住生态环境状况进行了评价。徐涵秋^[11]以绿度、湿度、热度和干度等基于遥感手段直接计算的指标,利用主成分分析法构建了遥感生态指数(RSEI),可广泛运用到城市生态环境评价之中。解雪峰等^[12]基于压力-状态-响应模型,结合流域生态系统结构和功能,选取 18 个评价指标,用以揭示流域生态安全的空间分布规律。从上述研究成果来看,评价指标体系和方法逐渐向多元化方向发展。随着地理信息系统和遥感技术的发展,空间数据获取和处理变得更为容易^[1]。区域生态环境质量评价由侧重自然因素向综合自然因素和社会经济条件的方向发展^[13-14],评价方法也从定性评价偏向于定量评价^[15-17]。但从整体上来看,评价指标与方法的选取仍然存在一些不足:如生态环境具有多样性和复杂性,评价指标的选取并无统一标准,因此,在选取评价指标时要遵循科学性、系统性、综合性等基本原则,符合区域生态环境变化规律,避免指标间表征的信息可能具有高相关性,以保证评价结果的真实可靠^[1,11];评价方法的选取应当具有适应性、针对性和充分性等,与区域实际情况相匹配,并能真实表征区域生态环境状况。目前,在评价方法上偏向于多种方法的集成使用,以反映不同层面上区

域生态环境的细节变化^[18-19]。

本研究基于 RS 和 GIS,选取关于自然资本、社会压力和经济支撑 3 个方面 11 个指标,利用空间主成分分析法、变异系数法和层次分析法获取石羊河流域自然资本、社会压力和经济支撑,以及综合评价结果的空间分布状况,以提取不同层面上该流域生态环境质量情况;同时,结合剖面工具(3D Profile)、空间自相关局部指标 Getis-Ord G_i^* 和地理探测器,分析石羊河流域生态环境质量的梯度分布、空间聚集模式以及影响因素。石羊河流域是我国干旱区内陆河流域生态退化的典型区域之一,生态问题日益突出^[20]。本研究可为石羊河流域生态保护与环境修复提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

石羊河流域(36°29′—39°27′N, 101°41′—104°16′E)位于甘肃省河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北麓,东南与甘肃省白银、兰州两市相接,西北与甘肃省张掖市毗邻,西南紧靠青海省,东北与内蒙古自治区接壤,属河西走廊三大内陆河流域之一(图 1)。流域的行政区划包括张掖市肃南裕固族自治县和山丹县部分地区,金昌市的永昌县、金川区全部,武威市的凉州区、古浪县、民勤县全部及天祝县部分,以及白银市景泰县的少部分地区,涉及 4 市 9 县,流域总面积约 40578 km²。截至 2016 年底,流域内总人口达 236.37 万,经济发展以第二和第三产业占主导地位,基本形成以凉州区和金川区为中心的 二元城市发展格局,且流域内生产生活多集中在人工绿洲区^[14]。石羊河流域深居大陆腹地,海拔 1000~5000 m,属大陆性温带干旱气候,具有太阳辐射较强、日照充足、温差大、降水少、蒸发强烈,以及空气干燥的气候特点。流域上游地区年平均气温低于 6℃,年降水量 400~600 mm;中游地区年平均气温低于 6~8℃,年降水量 150~250 mm;下游地区年平均气温高于 8℃,年降水量不足 150 mm。流域内河流水系自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河 8 条河流及多条小沟、小河组成,河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水,产流面积 1.11 万 km²,多年平均径流量 15.60 亿 m³。流域内土壤、植被类型分布因受气候、水文和地形等自然条件的影响,形成了明显的土壤-植被垂直带谱^[21]。

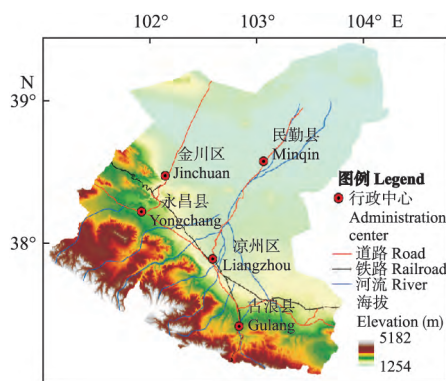


图1 研究区地理位置

Fig.1 Map of research area.

1.2 技术路线

对本研究选取的数据进行预处理和投影转换, 基于 ArcGIS 10.2 和 ENVI 5.1 平台进行空间插值、指标计算等, 用以获取表征生态环境质量的各指标因子, 然后在 ArcGIS 10.2 平台分别计算出自然资本指数、社会压力指数和经济支撑指数, 进行栅格计算, 采用自然断裂法得到生态环境质量评价分类图, 最后针对石羊河流域生态环境质量的空间分布特征及影响因素进行相关分析。本研究技术路线如图 2 所示。

1.3 数据源及预处理

本研究采用的数据包括: 1) Landsat OLI8 影像数据: 根据流域植被生长周期, 选用 2016 年 7 月 31 日(轨道号: 131/33、131/34) 和 2016 年 8 月 7 日(轨道号: 132/33、132/34) 的影像, 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>), 影像质量良好, 云量较少, 可满足研究精度需求; 2) 石羊河流域数字高程模型(DEM) 数据: 空间分辨率为 30 m×30 m, 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>) 经下载拼接而成; 3) 土地利用/覆

被类型数据: 基于土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)^[22], 结合石羊河流域实际状况, 经过目视解译将该流域内土地利用/覆被分成林地、草地、水域、耕地、城乡建设用地、沼泽、滩涂、裸地、裸岩、盐碱地、寒漠、戈壁、沙地和永久性冰川雪地共 14 类, 其分类结果参照 Google Earth 高分辨率遥感影像和 GPS 野外调查样点进行精度验证, 以满足研究要求; 4) 河流水系和土壤数据: 来源于石羊河流域信息系统专题数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn>), 包括石羊河流域主流、各条支流水系和各种土壤类型数据; 5) 道路数据: 来源于甘肃省基础地理信息中心(<http://www.gsgis.cn>), 包括国道、省道、县乡道和村镇道; 6) 气象数据: 来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>), 共选取流域及周边 14 个气象站点数据, 包括平均气温、降水量; 7) 社会经济统计数据: 来源于 2017 年武威凉州区、古浪县、天祝县、民勤县、金昌市金川区、永昌县等的统计年鉴, 包括人口、GDP, 其中部分数据缺失则参考了《甘肃发展年鉴 2017》^[23]。

根据研究需求, 对原始数据进行如下处理:

植被覆盖度的提取: 归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI) 是指示植被生长状态及空间分布集聚程度的有效因子^[24]。本研究基于 NDVI 采用像元二分模型来估算植被覆盖度^[25], 通过引入参数来减弱土壤背景、大气和植被类型等的影响, 以更为准确地提取流域植被信息。利用石羊河流域 Landsat OLI8 影像, 在 ENVI 5.1 平台上分别计算出 NDVI 和植被覆盖度, 公式如下:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (1)$$

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (2)$$

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_{red} 分别为近红外和红波段反射率;

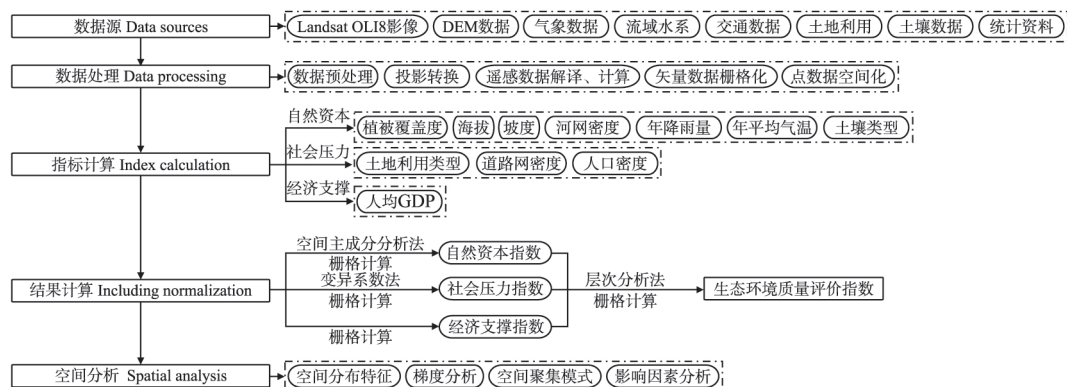


图2 研究技术路线

Fig.2 Research technical route.

F_c 为植被覆盖度; $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 分别为全部由植被覆盖区域和全部由裸土覆盖区域的 $NDVI$ 值, 根据直方图统计分析, 分别在累计概率 95% 和 5% 处确定 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$. 本研究的 $NDVI_{veg}$ 为 0.788, $NDVI_{soil}$ 为 0.059.

海拔和坡度的提取: 海拔在 ArcGIS 10.2 平台上由 DEM 直接获取, 坡度利用 Slope 工具计算生成.

年降水量和年均气温的提取: 考虑到高程对气温和降水的影响, 利用石羊河流域及周边地区 14 个气象站点的数据, 基于 ArcGIS 10.2 平台, 采用克里金插值法中的协同克里金插值方法进行空间插值, 以实现数据的空间可视化.

道路网密度和水网密度的提取: 基于 ArcGIS 10.2 平台, 利用 5 km×5 km 的格网作为评价单元, 分别提取各级道路、河流水系在不同评价单元的长度, 求出每个评价单元的道路网和河网密度值, 再基于克里金插值法中的普通克里金插值方法进行空间插值, 以实现密度数据的空间可视化. 算式如下:

$$D = \sum \frac{L_i}{A_i} \quad (3)$$

式中: D 代表道路网密度/水网密度 ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$); L_i 代表不同评价单元内道路/河流长度 (km); A_i 代表不同评价单元的面积 (km^2).

人口密度和人均 GDP 的获取: 根据各县区各乡镇人口和 GDP 数据, 依据各乡镇面积和人口数分别算出人口密度和人均 GDP 数据, 分别赋值到各乡镇的矢量点上, 使用克里金插值法中的普通克里金插值方法进行空间插值, 获取人口密度与人均 GDP 的栅格数据^[26].

土地利用类型和土壤类型的定量化获取: 土地利用类型依据石羊河流域独特的流域特征进行分类, 按照不同土地利用类型水源涵养能力、植被和生物量覆盖程度的多少^[27], 按照由低到高的顺序排列: 裸地、裸岩、盐碱地、寒漠、戈壁、沙地和永久性冰川雪地<城乡建设用地<耕地<草地、沼泽、滩涂<林地、水域, 分别赋值为 1~5. 土壤类型根据不同土壤类型生态性能进行分类^[28], 按照由低到高的顺序排列: 荒漠风沙土<棕漠土<盐化土<灰棕漠土<灰漠土<灰钙土<灌溉土<栗钙土<黑钙土<草甸土<灰褐土, 分别赋值为 1~11.

由于各类数据的来源、投影方式、坐标系和比例尺等不相同, 因此, 将所有数据的空间分辨率统一为 30 m×30 m 的栅格形式, 同时采用相同的 Krasovsky 椭球体坐标和 Albers 投影, 以便本研究计算.

1.4 评价指标体系构建的合理性

影响生态环境的因素主要包括自然因素和人为因素两方面, 区域本身的自然环境构成生态环境的资本条件, 人类则通过一系列的活动改善或破坏生态环境^[17]. 参考已有相关研究成果^[14, 19], 结合石羊河流域自然、社会、经济的实际状况, 遵循指标选取的科学性、系统性、可获取性、独立性、综合性等原则, 本研究选取 11 个指标构建石羊河流域生态环境质量的评价指标体系.

自然资本是流域内生态环境各种因素长期交互的结果, 也是生态环境及功能最直接的体现^[29]. 石羊河流域深居我国大陆腹地, 地势南高北低, 自西南向东北倾斜, 相对高差悬殊, 地貌类型多样, 土质结构复杂, 降雨稀少, 时空分布不均匀, 降水和气温的空间异质性较强, 水资源匮乏, 构成了该流域独特的自然条件. 因此, 选取海拔、坡度代表地形地貌因子; 年降水量、年平均气温和河网密度代表流域内水热资源状况; 土壤类型反映了流域内适宜或不适宜植被生长、人类居住等的环境状况, 代表流域内土壤资源状况; 植被覆盖度反映了流域内植被空间覆盖程度, 代表植被对生态环境变化的抗干扰与缓冲能力.

社会压力反映流域中人类活动对生态环境造成的负荷^[27]. 长期以来, 该流域经济发展相对落后, 人口区域性分布差异显著, 人口数量的增长及人类活动的影响使流域内生态环境的承载力不堪重负^[14]. 因此, 本研究选取人口密度、道路网密度和土地利用类型来表征人类活动对石羊河流域生态环境造成的压力.

经济支撑体现人类面对生态环境问题采取的经济扶持等一系列政策及措施. 一般而言, 人均 GDP 代表区域经济状况, 能在一定程度上反映人类对生态保护建设及保护的投入能力^[27]. 因此, 本研究选用人均 GDP 代表经济支撑对石羊河流域生态环境产生的影响.

为了验证所选取的 11 个指标是否存在信息重叠、高度相关的状况, 以减少工作量及确保评价的准确性, 在评价前, 对初选指标进行多元共线性诊断. 常用的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, 当 $VIF > 10$ (即 $TOL < 0.1$) 时, 表明所选指标的多元共线性较为严重^[30]. 在 ArcGIS 10.2 中, 利用 Create Fishnet 工具构建 2 km×2 km 的渔网覆盖整个研究区, 共均匀生成 10138 个渔网点, 利用这些点提取 11 个指标和生态环境质量评价指数 (EQEI) 值, 利用 SPSS 21.0 进

表 1 多元共线性诊断结果
Table 1 Results of multicollinearity diagnosis

指标 Index	方差膨胀因子 VIF	容忍度 TOL
VC	2.427	0.412
E	6.562	0.152
S	1.523	0.657
AR	6.066	0.165
AAT	2.870	0.348
DD	1.763	0.567
ST	2.710	0.369
LUT	1.420	0.704
RND	2.473	0.404
PD	5.912	0.169
GDP _{pc}	4.633	0.216

VC: 植被覆盖度 Vegetation coverage; E: 海拔 Elevation; S: 坡度 Slope; AR: 年降水量 Annual rainfall; AAT: 年平均气温 Annual average temperature; DD: 河网密度 Drainage density; ST: 土壤类型 Soil type; LUT: 土地利用类型 Land use type; RND: 道路网密度 Roads net density; PD: 人口密度 Population density; GDP_{pc}: 人均 GDP Per capita GDP. 下同 The same below.

行共线性诊断(表 1)^[31].结果表明,各指标间不存在明显的相关性.因此,这 11 个指标适用于本研究.

1.5 指标标准化

各评价指标因数据类型和量纲不同,无法直接进行评价,必须对评价指标进行标准化处理.按照各评价指标对生态环境的影响,将各评价指标分为正影响指标和负影响指标.正影响指标对生态环境变化起促进作用,其值越大,表示生态环境质量越好,包括植被覆盖度、土地利用类型、土壤类型、海拔、坡度、河网密度、年降水量和人均 GDP;反之则为负影响指标,包括年平均气温、道路网密度和人口密度.指标标准化采用极差标准化方法进行,计算公式如下^[17]:

正影响指标:
$$Y_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

负影响指标:
$$Y_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (5)$$

式中: Y_i 为第 i 指标的标准化值; X_i 为第 i 指标的原始值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为原始值的最大值和最小值.

1.6 生态环境质量评价模型

1.6.1 自然资本指数 空间主成分分析法在保证数据信息损失最小的前提下,通过对原始空间坐标轴的旋转,将多个相关的指标转化为少数几个互不相关的综合指标,能最大限度地反映原有指标的信息^[1].同时,空间主成分整个过程不需要人为地设置权重,评价结果具有客观性.基于以上理论,本研究在 ArcGIS 10.2 平台上,将评价指标体系中与自然资本相关的植被覆盖度、坡度、海拔、年降水量、年平均

气温、河网密度和土壤类型等指标进行空间主成分分析,计算出自然资本指数(natural capital index, NCI).计算公式如下:

$$NCI = r_1X_1 + r_2X_2 + r_3X_3 + \cdots + r_nX_n \quad (6)$$

式中: r_n 为第 n 个主成分对应的贡献率; X_n 为第 n 个主成分.

当累计方差贡献率 $\geq 85\%$,就能代表绝大多数的有关信息^[1].为了真实、客观地获取石羊河流域自然资本信息,前 4 个主成分因子的累计贡献率达 92.7%(表 2).因此,本研究选取前 4 个主成分因子($X_1 \sim X_4$)进行拟合,计算公式如下:

$$NCI = 0.639X_1 + 0.135X_2 + 0.098X_3 + 0.055X_4 \quad (7)$$

1.6.2 社会压力指数 指标的重要程度与自身信息量息息相关,变异系数法是从数据的本身属性出发,以各个指标的标准差作为信息量,通过加权平均来确定指标的权重,具有消除量纲对权重影响的优点^[32].考虑到指标体系中与社会压力相关的人口密度、土地利用类型和道路网密度 3 个指标对流域生态环境的影响程度难以确定,本研究从所选取的指标自身特性出发,以指标的重要程度来确定权重,使用变异系数法来计算社会压力指数(social pressure index, SPI).计算公式如下:

$$V_i = \sigma_i / \bar{X}_i \quad (8)$$

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i \quad (9)$$

$$SPI = \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (10)$$

式中: V_i 为第 i 指标的变异系数; σ_i 和 $\bar{X}_i$ 分别为第 i 指标的标准差和平均数; W_i 为第 i 指标的权重; Y_i 为标准化后的第 i 指标.本研究中用以计算 SPI 的 3 个指标的变异系数和权重如表 3 所示.

1.6.3 经济支撑指数 经济发展会带动周边地区生态环境的变化,指标体系中与经济支撑相关的指标

表 2 空间主成分分析结果
Table 2 Results of spatial principal component analysis

主成分因子 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Accumulative contribution rate (%)
1	0.139	63.9	63.9
2	0.029	13.5	77.4
3	0.021	9.8	87.2
4	0.011	5.5	92.7
5	0.008	3.6	96.3
6	0.005	2.5	98.8
7	0.003	1.2	100

表 3 3 个指数的变异系数和权重
Table 3 Variation coefficients and weights of three indexes

指标 Index	标准差 Standard deviation	平均 Mean	变异系数 Variable coefficient	权重 Weight
PD	0.229	0.754	0.303	0.153
LUT	0.356	0.276	1.288	0.651
RND	0.228	0.588	0.387	0.196

为人均 GDP.人均 GDP 代表流域内经济发展状况 , 在一定程度上能够反映经济发展对周边地区生态环境保护以及资金投入的力度.因此 ,本研究的经济支撑指数 (economic support index ,ESI) 等同于人均 GDP.

1.6.4 生态环境质量评价指数 本研究从自然、社会和经济三方面着手 ,分别计算 NCI、SPI 和 ESI 来表征石羊河流域不同层面的生态环境质量状况.结合石羊河流域独特的流域特征 ,对流域生态环境影响因素的重要程度按照由高到低排序为: 自然因素 > 社会因素 > 经济因素^[33]. 本研究采用层次分析法^[18]确定 NCI、SPI 和 ESI 的权重.具体做法为: 根据指标间相互关系构建两两判别矩阵 ,然后进行一致性检验 ,最后计算出各指标的权重值.表 4 为构建的判别矩阵 ,最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.039$,一致性指标 $CI=0.019$,随机一致性指标 $RI=0.580$,随机一致性比率 $CR=0.033<0.1$,通过了一致性检验.经过计算 ,NCI、SPI 和 ESI 的权重分别为 0.637、0.258、0.105.生态环境质量评价指数 (eco-environmental quality evaluation index ,EQEI) 的计算公式如下:

$$EQEI=0.637NCI+0.258SPI+0.105ESI \quad (11)$$

1.7 梯度分析

石羊河流域的水系分布、土壤机制、植被覆盖、生物多样性等自然景观自西南到东北方向呈垂直地带性分布 ,因此有必要研究该流域生态环境质量的垂直地带性空间分布状况^[34]. 本研究基于 ArcGIS 10.2 平台 ,利用剖面工具 (3D Profile) ,分析自西南到东北方向上 EQEI 的空间分异特征.剖面线及方向的确定如图 3 所示.

表 4 两两判别矩阵
Table 4 Pair-wise comparison matrix

指标 Index	NCI	SPI	ESI
NCI	1	3	5
SPI	1/3	1	3
ESI	1/5	1/3	1

NCI: 自然资本指数 Natural capital index; SPI: 社会压力指数 Social pressure index; ESI: 经济支撑指数 Economic support index.

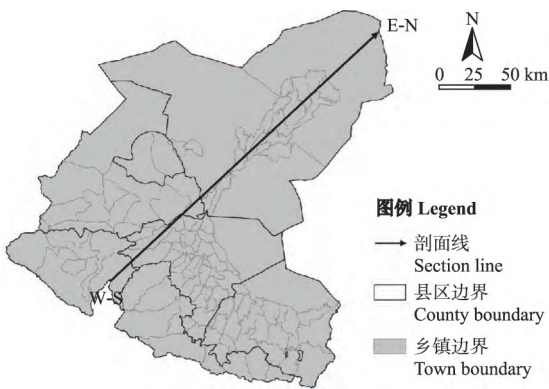


图 3 研究区从西南到东北的剖面分布
Fig.3 Profile distribution of study area from the southwest to the northeast.

1.8 空间聚集模式识别

为了探测 EQEI 在空间上的聚集状况 ,采用空间自相关的局部指标 ,通过计算每一空间单元与邻近空间单元的相关程度 ,确定区域是否具有相似的空间分布 ,以全面反映区域生态环境空间分布的变化趋势 ,用以识别 EQEI 的空间聚集模式^[35]. 空间自相关的局部指标包括局部 Morans 指数 (local Morans I) 和局部 Geary 指数 (local Getis-Ord , G_i^*) . 本研究采用 G_i^* 来测定石羊河流域生态环境质量的高值簇 (热点区) 和低值簇 (冷点区) ,从而发现生态环境质量在空间上可能存在的聚集模式. 计算公式如下^[36]:

$$G_i^* (d) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} (d) X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (12)$$

为了解释与比较 ,对其进行标准化处理:

$$Z (G_i^*) = \frac{G_i^* - E (G_i^*)}{\sqrt{Var (G_i^*)}} \quad (13)$$

式中: W_{ij} 为空间权重矩阵 ,空间相邻为 1 ,不相邻为 0; X_i 为地区单元 i 的观测值; $E (G_i^*)$ 和 $Var (G_i^*)$ 分别为 G_i^* 的数学期望和变异数.若 $Z (G_i^*)$ 值显著且为正值时 ,说明第 i 地区周围的值相对较高 (高于均值) ,即高值聚集区 (热点区) ,反之则为低值聚集区 (冷点区) .

1.9 生态环境质量的影响因素分析

石羊河流域生态环境质量空间差异受多种因素的影响和制约.地理探测器是探测多因子在不同空间单元下的影响作用及其相互关系的一种新的统计学方法^[37]. 本研究采用地理探测器分析影响生态环境质量评价指数的因素.地理探测器包括风险探测

器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器. 其中, 因子探测器可探测某因子是否是形成生态环境质量时空分布格局的原因以及在多大程度上解释了生态环境质量的空间分异机理^[38]. 具体做法为: 以 EQEI 作为因变量, 将选取的 11 个指标作为自变量, 采用自然断点法进行分层, 把数值量转为类型量, 在 ArcGIS 10.2 中, 利用 Create Fishnet 工具构建 2 km×2 km 的渔网覆盖整个研究区, 共均匀生成 10138 个渔网点, 然后将因变量值和自变量值过渔网点进行匹配, 用以探测各因子的影响作用^[38]. 其中: q 值表示自变量 X 对因变量 Y 的影响程度, 其值越大, 影响程度越大; p 值用以解释自变量 X 对因变量 Y 影响的解释程度, 其值越大, 解释程度越小^[31].

2 结果与分析

2.1 生态环境质量的空间分布特征

根据石羊河流域生态环境空间分布特征, 采用自然断裂法对 EQEI 值进行分级^[34], 共分为极差、差、较差、中、良和优 6 个等级, 并对不同等级的面积进行统计(表 5). 结果表明, 研究区生态环境质量等级为优、良的面积占研究区总面积的 20.5%, 等级为较差及其以下区域的面积占 59.3%. 从总体上看, 石羊河流域的生态环境质量仍处于较差水平. 由图 4 可以看出, 石羊河流域生态环境质量等级为优、良的区域主要集中在流域上游的祁连山地区, 等级为较差及其以下区域主要集中在中、下游的低山丘陵区 and 荒漠区. 各县区生态环境质量的分布按高低排序为: 肃南县、天祝县>金川区、永昌县、凉州区、古浪县>民勤县. 这与地貌地形分布、植被覆盖程度、水资源分布以及人类活动干扰等具有密切的关系. 肃南县和天祝县位于上游的祁连山地区, 海拔高, 受人类活动干扰影响较小, 水资源丰富, 植被覆盖程度较高; 金川区、永昌县、凉州区和古浪县位于中游的走

表 5 石羊河流域生态环境质量等级与面积统计
Table 5 Eco-environmental quality classes and area statistics in Shiyang River Basin

等级 Class	像元数 Count	面积 Area (km ²)	比例 Percentage (%)
极差 Extremely bad	7245823	6525.43	16.1
差 Bad	10946615	9858.29	24.3
较差 Poor	8513918	7667.45	18.9
中 Moderate	9103876	8198.76	20.2
良 Good	5354548	4822.19	11.9
优 Excellent	3893842	3506.71	8.6
合计 Total	45058622	40578.83	100

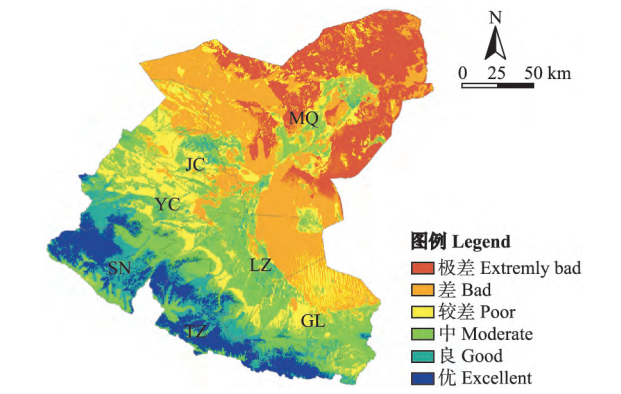


图 4 石羊河流域生态环境质量的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of eco-environmental quality in Shiyang River Basin.

JC: 金川区 Jinchuan; YC: 永昌县 Yongchang; LZ: 凉州区 Liangzhou; MQ: 民勤县 Minqin; GL: 古浪县 Gulang; SN: 肃南县 Sunan; TZ: 天祝县 Tianzhu. 下同 The same below.

廊平原区和部分荒漠区, 人口密度相对较高, 植被覆盖程度较低, 受人类活动干扰影响较大, 部分地区受盐渍化和荒漠化的影响; 民勤县大部分地区处于荒漠区, 北部处于低山丘陵区, 小部分地区处于平原, 经济发展相对落后, 水资源供需矛盾尖锐, 植被覆盖稀少, 受盐渍化和沙漠化的影响较大.

2.2 生态环境质量的梯度分析

基于西南-东北方向, 对 EQEI 在不同空间位置进行统计, 为了便于分析, 将 EQEI 值域范围由 [0, 1] 扩大为 [0, 10] (图 5). 结果表明, 西南-东北方向的流域 EQEI 呈不稳定变化现象, 且波动范围较大. 整体来看, 沿西南-东北方向随距离的增大, EQEI 值呈现逐渐变小趋势, 说明流域生态环境质量在空间上呈现一定的梯度分布. 从统计起始位置开始至 2.13×10^4 m, 即肃南县铎尖乡境内 EQEI 值在 4~8 之

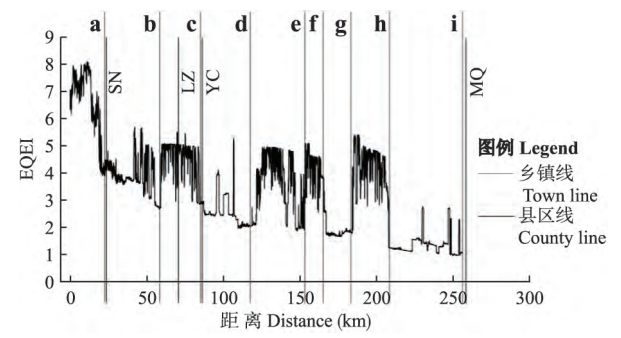


图 5 从西南到东北研究区生态环境质量评价指数的剖面变化
Fig.5 Profile changes of EQEI from the southwest to the north-east in study area.

a) 铎尖 Huajian; b) 洪祥 Hongxiang; c) 朱王堡 Zhuwangbao; d) 花儿园 Huaeryuan; e) 东坝 Dongba; f) 双茨科 Shuangcike; g) 义粮滩 Yiliangan; h) 东湖 Donghu; i) 公共用地 Public land.

间波动,波动幅度为 4,说明在该地区生态环境质量存在两极分化,主要是由于肃南县铨尖乡位于祁连山区,祁连山内部地区植被覆盖度高,受人类活动影响较小,而外围地区植被覆盖度相对较低,受人类活动影响较大;从肃南县铨尖乡到凉州区洪祥镇 3.38×10^4 m 距离内, EQEI 值在 3~6 之间波动,波动幅度为 3;从凉州区洪祥镇到永昌县朱王堡镇 2.94×10^4 m 距离内, EQEI 值在 3~5 之间波动,波动幅度较小,表明该地区生态环境质量较为稳定;从永昌县朱王堡镇到民勤县花儿园乡 3.40×10^4 m 距离内、花儿园乡到东坝镇 3.52×10^4 m 距离内、东坝镇到双茨科乡 1.37×10^4 m 距离内, EQEI 值均在 2~5 之间波动,波动幅度为 3。这 3 个沿线地带的 EQEI 值发生骤减是因为随着距离的增大,途经多个盐渍化和荒漠化较为严重的区域,导致该值的变化幅度增大;双茨科乡到义粮滩林场 1.61×10^4 m 距离内, EQEI 值在 2 左右,波动幅度较小;义粮滩林场到东湖镇 2.45×10^4 m 距离内, EQEI 值在 3~5 之间波动,波动幅度为 2,该区域为民勤县人工绿洲种植区,生态环境质量相对较高;东湖镇到公共用地 4.87×10^4 m 距离内, EQEI 值在 1~2 之间波动,波动幅度为 2,该区域主要为东北部荒漠区,生态环境质量相对较低。从整体上看,石羊河流域生态环境质量指数 EQEI 值在 4 左右,波动幅度为 7,内部存在明显的两极分化现象。

2.3 生态环境质量的空间聚集模式

EQEI 能很好地反映石羊河流域生态环境质量的空间分布特征。为了对该分布特征的聚集模式进一步探究,利用局部 Geary 指数 (G_i^*) 生成石羊河流域生态环境质量空间聚集分布图。由图 6 可以看出,石羊河流域生态环境质量呈现“断裂式”分布模式,空间聚集特征明显且分布均匀。高值聚集区(热

点区)主要聚中在石羊河流域西南部,呈现连片和大面积的空间分布,表明石羊河流域生态环境质量较好的区域具有高度聚集的特征,且大部分位于祁连山区;而低值聚集区(冷点区)集中在石羊河流域东北部,生态环境质量较差的区域具有高度聚集的分布特征,且大部分位于民勤县、凉州区、永昌县的荒漠区和低山丘陵区。冷点区面积多于热点区,是由于大面积荒漠化、盐渍化等现象的存在,严重制约了生态环境的治理和恢复进程。整体来看,石羊河流域生态环境质量以高-低值两种聚集模式共同分布,并呈现出热点高度聚集、冷点高度聚集的特征。进一步说明石羊河流域生态环境质量空间聚集模式在西南-东北方向上具有明显的空间异质性,同时也从侧面验证了该流域生态环境质量呈一定的梯度分布。

2.4 生态环境质量的影响因素

石羊河流域生态环境质量与自然资本、社会压力、经济支撑密不可分。由图 7 可以看出,NCI 高值主要集中于石羊河流域上游祁连山区、中下游人工绿洲区,低值主要集中于荒漠区和低山丘陵区,尤其是下游民勤县北端与腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠的交界处及以北的广大地区的自然资本含量极其匮乏;SPI 值的空间分布较为破碎,高值主要集中在祁连山和人工绿洲的林地、草地和水域区域,低值主要位于城镇建设用地、荒漠区和低山丘陵区;ESI 高值主要集中在经济较为发达的金川区 and 凉州区。

由表 6 可以看出,自然资本 7 个指标按影响力 q 值高低排序依次为:植被覆盖度>土壤类型>海拔>年降水量>年平均气温>河网密度>坡度;社会压力 3 个指标按 q 值高低排序依次为:土地利用类型>人口密度>道路网密度;11 个指标按 q 值高低总排序依次为:植被覆盖度>土壤类型>海拔>年降水量>土地利用类型>年平均气温>人口密度>河网密度>人均 GDP>坡度>道路网密度。从自然资本、社会压力和经济支撑三方面对该流域生态环境质量的影响程度来看,自然资本占据主导地位,其中,植被覆盖度、土壤类型、海拔、年降水量 q 值均大于 0.5,石羊河流域自然资本空间分布差异性较大,其丰裕程度在西南-东北方向呈现逐渐降低的趋势,主要是与中下游荒漠区和低山丘陵区相比,上游祁连山地区的植被覆盖、海拔梯度分布、土壤类型、降水状况、水资源储量等都具有较大差异;社会压力的影响程度次之,其中,土地利用类型的 q 值为 0.54,影响程度较高,主要因为城镇建设用地及大面积的荒漠区给石羊河流域带来很大负担;经济支撑的影响程度最小,

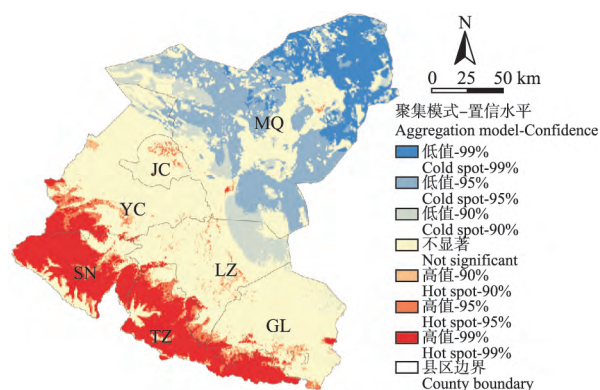


图 6 石羊河流域生态环境质量的空间聚集分布

Fig. 6 Spatial aggregation distribution of eco-environmental quality in Shiyang River Basin.

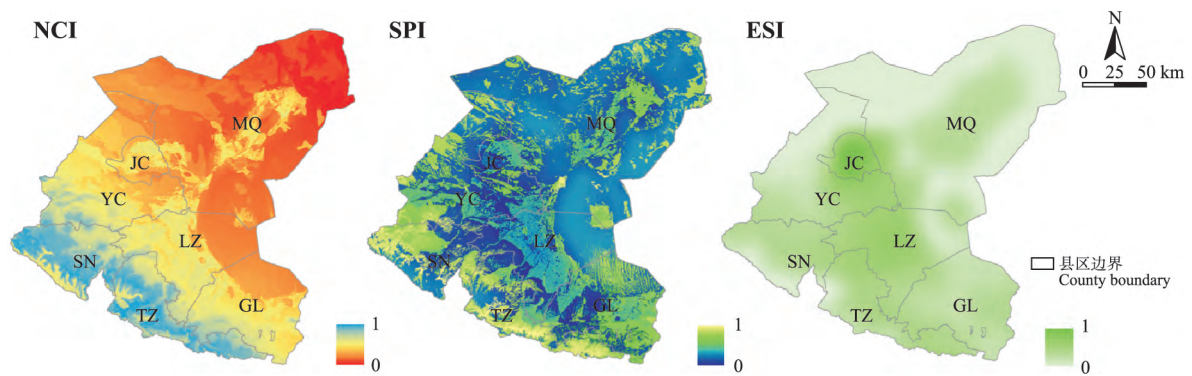


图 7 石羊河流域参评因子的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of evaluation factors in Shiyang River Basin.

NCI: 自然资本指数 Natural capital index; SPI: 社会压力指数 Social pressure index; ESI: 经济支撑指数 Economic support index.

表 6 石羊河流域生态环境质量 11 个影响因子的地理探测结果
Table 6 Geographical detector results on 11 impact factors of eco-environmental quality in Shiyang River Basin

因子 Factor	自然资本 Natural capital							社会压力 Social pressure			经济支撑 Economic Support
	VC	E	S	AR	AAT	DD	ST	LUT	RND	PD	GDP _{PC}
QV	0.703	0.661	0.254	0.616	0.491	0.335	0.672	0.540	0.142	0.352	0.324
PV	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
QR	1	3	7	4	5	6	2	1	3	2	1
QTR	1	3	10	4	6	8	2	5	11	7	9

QV: q 值 q value; PV: p 值 p value; QR: q 排序 q ranking; QTR: q 总排序 q total ranking.

石羊河流域经济发展以农耕经济为主,耕地不仅为当地带来经济支撑和提供粮食,还具有改善空气、净化环境和涵养水源等功能,对石羊河流域生态环境起到一定促进作用.这种现象从侧面也验证了 EQEI 构建的合理性. EQEI 在构建初期是根据自然因素>社会因素>经济因素的重要程度顺序来确立的,与实际情况相符,结果真实可靠.

3 讨 论

迄今,已有很多学者对石羊河流域生态环境质量进行了研究.如梁变变等^[14]基于生态系统生产力、稳定性和承载力 3 方面,利用非参数 Kruskal-Wallis 卡方 (χ^2) 检验和熵值法确定指标权重,对 2000、2005、2010 和 2015 年石羊河流域不同生态系统类型的质量及各指数进行综合分析,结果表明,石羊河流域生态环境质量呈上游优于中游、中游优于下游的空间分布.王蓓等^[39]借助 InVEST 模型,对流域 2005、2010 和 2015 年的生态系统水源涵养、土壤保持、水质净化、碳储存和生物多样性 5 项服务进行精准测度,认为水源涵养、土壤保持、碳储存、生物多样性呈“西南高、东北低”的空间格局,且水质净化、碳储存服务的高值区沿河流分布.石三娥等^[34]以沙漠化指数(DI)、概括差值植被指数(GI)、盐渍化指

数(MSI)、湿度指数(WI) 4 个评价指标构建用于生态环境质量评估的遥感生态距离指数(RSEDI),并绘制了石羊河流域生态环境质量空间分布图,发现 1995—2016 年,石羊河流域两大绿洲生态环境质量整体上逐年变好,且中游武威绿洲生态环境质量优于下游民勤绿洲.本研究中对石羊河流域生态环境质量的评价结果与上述研究结果基本吻合,空间分布特征也基本一致.

本研究从自然资本、社会压力和经济支撑三方面对石羊河流域生态环境质量进行定量评价,获取生态环境质量空间分布状况,并利用剖面工具(3D Profile)、空间自相关局部指标 Getis-Ord G_i^* 和地理探测器等对其空间分异规律及影响因素进行深入探讨.在尺度上,以 30 m×30 m 的栅格单元作为评价单元,以期获取石羊河流域在较高空间分辨率下生态环境质量的空间分布特征;在评价方法上,依据主客观赋权重以及石羊河流域生态环境的发展规律,结合空间主成分分析法、变异系数法和层次分析法,构建 NCI、SPI、ESI 和 EQEI,可为决策者从石羊河流域自然资本、社会压力和经济支撑多方面合理、科学地获取生态环境质量的相关信息.生态环境和社会经济的发展具有复杂性和模糊性,而目前的一些方法尚不能做到全面和系统的评价.本研究在总结前人

研究成果的基础上,对石羊河流域生态环境质量进行简单评价,在研究方法上仍存在不足,主要表现在两方面:一是指标体系构建时考虑的影响因素不足,经济支撑指数仅选取了人均 GDP 作为响应指标,而石羊河流域经济支撑影响因素有很多,如重大生态工程投资、森林生态效益补偿等用于生态建设和环境保护的经济数据;二是缺乏对石羊河流域多年生态环境质量时空变化的探讨。在今后的研究中,应针对这些不足进一步加以研究。

4 结 论

本研究基于 RS 和 GIS 从宏观尺度上对石羊河流域进行了生态环境质量评价。结果表明,该流域生态环境质量整体仍处于较差水平,生态环境治理与恢复工作迫在眉睫。在西南-东北方向上,石羊河流域呈现“生态源地(祁连山区)-人类集聚地(人工绿洲区)-无人区(低山丘陵区 and 荒漠区)”过渡式的景观分布特征,生态环境质量具有两极分化现象,存在明显的空间异质性。该流域的空间聚集模式以高、低值两种聚集模式为主,具有“断裂式”的分布和热点高度聚集、冷点高度聚集的特征。自然环境、社会压力 and 经济发展三者相互影响,彼此制约,共同形成了石羊河流域独特的生态环境。在影响石羊河流域生态环境的因素中,自然资本因素对该流域的影响占主导地位,其中植被覆盖度、土壤类型、海拔、年降水量的 q 值均大于 0.5,影响较大;其次为社会压力因素,土地利用类型的 q 值为 0.540,影响程度相对较高;而经济支撑因素的影响作用最小。

今后,在石羊河流域生态环境的综合治理过程中,要合理利用水资源,促进植被覆盖率的 growth,同时,应结合流域土壤类型、水源地等分布状况,选取适合当地种植的植物品种,对不同地区采取合适的种植方式,既可稳定、健康、合理地扩大植被种植区,也能抑制荒漠化、盐渍化的扩张,涵养水源和土壤。石羊河流域是一个生态环境高度脆弱的区域,既要促进经济发展,也要构建高效、节能的和谐社会,更要注重生态环境保护工作,三者密不可分。

参考文献

- [1] Wang J (王 静), Zhou W-Q (周伟奇), Xu K-P (许开鹏), et al. Quantitative assessment of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(8): 2667-2676 (in Chinese)
- [2] Peng J (彭 建), Wu J-S (吴健生), Pan Y-J (潘雅

- 婧), et al. Evaluation for regional ecological sustainability based on PSR model: Conceptual framework. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2012, **31**(7): 933-940 (in Chinese)
- [3] Malekmohammadi B, Blouchi LR. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 133-144
- [4] Fu B-J (傅伯杰), Liu Y (刘 宇). Global ecosystem observation and research programs: Evolution and insights for future development. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2014, **33**(7): 893-902 (in Chinese)
- [5] Hu X, Xu H. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, 2018, **89**: 11-21
- [6] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation (HJ/T 192-2015) [EB/OL]. (2015-03-13) [2018-09-28] http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/stzl/201503/t20150324_298011.shtml (in Chinese)
- [7] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation (HJ/T 192-2006) [EB/OL]. (2006-03-13) [2018-09-28] http://kjs.mee.gov.cn/hjbhbz/bzwb/stzl/200605/t20060501_74874.shtml (in Chinese)
- [8] Wang S-Y (王士远), Zhang X-X (张学霞), Zhu T (朱 彤), et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2016, **35**(10): 1269-1278 (in Chinese)
- [9] Man W-D (满卫东), Liu M-Y (刘明月), Li X-Y (李晓燕), et al. Assessment on the dynamics of eco-environmental statuses from 1990 to 2015 in the ecological function zone of Sanjiang Plain. *Journal of Arid Land Resources & Environment* (干旱区资源与环境), 2018, **32**(2): 136-141 (in Chinese)
- [10] Lu Z-W (陆张维), Wu C-F (吴次芳), Yue W-Z (岳文泽), et al. The assessment on residential ecological environment in the central city of Hangzhou. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(11): 2856-2863 (in Chinese)
- [11] Xu H-Q (徐涵秋). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(24): 7853-7862 (in Chinese)
- [12] Xie X-F (解雪峰), Wu T (吴 涛), Xiao C (肖翠), et al. Ecological security assessment of the Dongyang River watershed using PSR modeling. *Resources Science* (资源科学), 2014, **36**(8): 1702-1711 (in

- Chinese)
- [13] Liu Y (刘洋), Lyu J-S (吕建树), Wu Q-Y (吴泉源), *et al.* Comprehensive assessment of regional ecological environment based on object-orientation theory. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2012, **32**(8): 1521–1529 (in Chinese)
- [14] Liang B-B (梁变变), Shi P-J (石培基), Wang W (王伟), *et al.* Integrated assessment of ecosystem quality of arid inland river basin based on RS and GIS: A case study on Shiyang River Basin, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(1): 199–209 (in Chinese)
- [15] Zhou X-C (周小成), Wang X-Q (汪小钦), Jiang H (江洪), *et al.* Remote sensing based evaluation and analysis on change of eco-environmental quality in Jiu-long River basin. *Journal of Geo-Information Science* (地球信息科学学报), 2009, **11**(2): 231–236 (in Chinese)
- [16] Wang L-H (王立辉), Huang J-L (黄进良), Du Y (杜耘). Eco-environmental evaluation of middle route of the South-To-North water transfer project. *Resources & Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2011, **20**(2): 161–166 (in Chinese)
- [17] Zhou W-Y (周文英), He B-B (何彬彬). Eco-environmental quality assessment of Ruergai County in Sichuan Province based on multi-sources remote sensing data. *Journal of Geo-Information Science* (地球信息科学学报), 2014, **16**(2): 314–319 (in Chinese)
- [18] Liu Z (刘庄), Xie Z-R (谢志仁), Shen W-S (沈渭寿). A new method that can improve regional eco-environment evaluation: Combining GIS with AHP. *Resources & Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2003, **12**(2): 163–168 (in Chinese)
- [19] Chai Y-N (柴燕妮), Wei G-J (魏冠军), Hou W (侯伟), *et al.* Multi-scale eco-environmental quality evaluation method from a spatial perspective. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2018, **37**(2): 596–604 (in Chinese)
- [20] Xiao D-N (肖笃宁), Li X-Y (李小明), Song D-M (宋冬梅). Landscape changes and ecological reconstruction in Minqin Huqu oasis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(10): 2477–2483 (in Chinese)
- [21] Wei W (魏伟), Shi P-J (石培基), Feng H-C (冯海春), *et al.* Study on the suitability evaluation of the human settlements environment in arid inland river basin: A case study on the Shiyang River Basin. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2012, **27**(11): 1940–1950 (in Chinese)
- [22] Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China (中华人民共和国自然资源部). Current Land Use Classification (GB/T 21010–2017) [EB/OL]. (2017-07-01) [2018-09-28]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2288891.html (in Chinese)
- [23] Gansu Province Bureau of Statistics (甘肃省统计局). Gansu Development Yearbook 2017 [EB/OL]. (2018-04-25) [2018-09-28]. <http://www.gstj.gov.cn/tjnj/2017> (in Chinese)
- [24] Fung T, Siu W. Environmental quality and its changes, an analysis using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**: 1011–1024
- [25] Zhang X-L (张学玲), Zhang Y (张莹), Niu D-K (牛德奎), *et al.* Spatial-temporal dynamics of upland meadow coverage on Wugong Mountain based on TM NDVI. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(7): 2414–2424 (in Chinese)
- [26] Wei W (魏伟), Xie Y-W (颜耀文), Wei X-X (魏晓旭), *et al.* Land use optimization based on CLUE-S model and ecological security scenario in Shiyang River Basin. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (武汉大学学报·信息科学版), 2017, **42**(9): 1306–1315 (in Chinese)
- [27] Wang Z-J (王志杰), Su Y (苏嫻). Analysis of Eco-environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the south-to-north water transfer project, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(2): 432–442 (in Chinese)
- [28] Wang G-X (王根绪), Cheng G-D (程国栋). Ecological features and variance of soils in Northwest Arid Area of China. *Journal of Arid Land Resources & Environment* (干旱区资源与环境), 1999, **13**(3): 14–22 (in Chinese)
- [29] Ma S-T (麻素挺), Tang J (汤洁), Lin N-F (林年丰). Synthetic assessment of eco-environment in the western Jilin Province based on multi-sources GIS and RS spatial information. *Resources Science* (资源科学), 2004, **26**(4): 140–145 (in Chinese)
- [30] Huang M (黄明), Zhang X-X (张学霞), Zhang J-J (张建军), *et al.* A multi-scale simulation of land use change in Luoyugou Watershed based on CLUE-S model. *Resources Science* (资源科学), 2012, **34**(4): 769–776 (in Chinese)
- [31] Guo Z-C (郭泽呈), Wei W (魏伟), Pang S-F (庞素菲), *et al.* Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in Arid Inland River Basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2019, **39**(7): 2558–2572 (in Chinese)
- [32] Zhong S-X (钟赛香), Hu P (胡鹏), Xue X-M (薛熙明), *et al.* Multi-factor comprehensive evaluation model based on the selection of objective weight assignment method. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2015, **70**(12): 2011–2031 (in Chinese)

- [33] Wei W (魏 伟), Shi P-J (石培基), Zhou J-J (周俊菊), *et al.* Comprehensive assessment of eco-environmental quality based on GIS and combination weighting method in Shiyang River Basin. *Journal of Arid Land Resources & Environment* (干旱区资源与环境), 2015, **29**(1): 175–180 (in Chinese)
- [34] Shi S-E (石三娥), Wei W (魏 伟), Yang D (杨东), *et al.* Spatial and temporal evolution of eco-environmental quality in the oasis of Shiyang River Basin based on RSEDI. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2018, **37**(4): 1152–1163 (in Chinese)
- [35] Chen P-Y (陈培阳), Zhu X-G (朱喜钢). Regional inequalities in China at different scales. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2012, **67**(8): 1085–1097 (in Chinese)
- [36] Wang Z (王 钊), Yang S (杨 山), Wang Y-J (王玉娟), *et al.* Analysis of cold-hot pattern of urban spatial expansion based on minimum cumulative resistance model: A case study of Suzhou-Wuxi-Changzhou area. *Economic Geography* (经济地理), 2016, **36**(3): 57–64 (in Chinese)
- [37] Wang J-F (王劲峰), Xu C-D (徐成东). Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2017, **72**(1): 116–134 (in Chinese)
- [38] Wu P (武 鹏), Li T-S (李同昇), Li W-M (李卫民). Spatial differentiation and influencing factors analysis of rural poverty at county scale: A case study of Shanyang County in Shaanxi Province, China. *Geographical Research* (地理研究), 2018, **37**(3): 171–182 (in Chinese)
- [39] Wang B (王 蓓), Zhao J (赵 军), Hu X-F (胡秀芳). Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(21): 7582–7595 (in Chinese)

作者简介 郭泽呈,男,1996年生,硕士研究生.主要从事环境遥感和GIS应用研究. E-mail: 18709424424@163.com

责任编辑 杨 弘

郭泽呈,魏伟,张学渊,等. 基于RS和GIS的石羊河流域生态环境质量空间分布特征及其影响因素. 应用生态学报, 2019, **30**(9): 3075–3086

Guo Z-C, Wei W, Zhang X-Y, *et al.* Spatial distribution characteristics and influencing factors of eco-environmental quality based on RS and GIS in Shiyang River Basin, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 3075–3086 (in Chinese)