

石羊河下游生态输水对区域生态环境的影响

雷 莉¹, 魏 伟², 周俊菊², 李振亚²

(1. 武威职业学院, 甘肃 武威 733000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:通过遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术手段,选用 2001、2006、2009 年和 2015 年的 Landsat TM/OLI 遥感影像作为数据源,通过提取植被覆盖度指数(VFC)、沙漠化指数(DI)、土壤盐渍化指数(MSI)、土壤湿度(WI)、绿度指数(GVI)和地表温度指数(LST)等指标,构建遥感生态综合指数(RSECI),对生态输水项目实施以来石羊河下游生态环境状况进行定性和定量评估。结果表明:(1)从时间变化来看,RSECI 值从 2001 年的 0.42 上升到 2015 年的 0.48,这表明 2015 年的生态环境比 2001 年显著改善。从不同时段分区面积变化情况来看,2001—2006、2006—2009、2009—2015 年 3 个时段内,生态环境改善的区域面积分别为 357.08、397.77、1 637.98 km²,而恶化的区域面积分别为 100.24、1 386.14、398.83 km²。这表明在实施生态输水初期,石羊河下游的生态环境没有显著改善,且绿洲部分地区还有恶化趋势,但在生态输水持续进行后,石羊河下游绿洲的环境得到显著改善。(2)从空间变化来看,绿洲边缘沙漠区的环境显著改善,绿洲内部生态环境总体上呈下降趋势。这说明在 2001—2015 年间,石羊河下游的生态环境变化状况具有明显的空间异质性。综上所述,随着相关生态治理项目的实施,虽然石羊河下游的总体生态环境状况得到显著改善,但绿洲内部区域的生态环境恶化趋势却不容忽视,当地的生态环境治理工作仍然任重道远。

关键词:生态输水;生态环境;空间异质性;RS;GIS;石羊河下游

中图分类号:S181 **文献标志码:**A

The impact of ecological water transport on the regional ecological environment in the lower Shiyang River

LEI Li¹, WEI Wei², ZHOU Junju², LI Zhenya²

(1. Wuwei Occupational College, Wuwei, Gansu 733000, China

2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This paper uses Landsat TM/OLI remote sensing images from 2001, 2006, 2009, and 2015 as data sources through Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) techniques, by extracting vegetation coverage index (VFC), desertification index (DI), soil salinity index (MSI), soil moisture (WI), greenness index (GVI), and surface temperature index (LST), etc., to construct a Remote Sensing Ecological Environment Comprehensive Index (RSECI), and the ecological environment of the lower the Shiyang River was qualitatively and quantitatively evaluated since the implementation of the ecological water transfer project. The results showed that: (1) From the temporal change, the RSECI value increased from 0.42 in 2001 to 0.48 in 2015. This showed that the ecological environment in 2015 improved significantly compared to that in 2001. In addition, in the initial stage of ecological water transport, the ecological environment in the lower Shiyang River had not improved significantly, and some areas in the oasis deteriorated. However, when the ecological water transport continued, the environment of the oasis in the lower reaches of the Shiyang River had been significantly improved. (2) From the perspective of spatial changes, the environment in the desert area of the oasis was significantly improved, and the ecological environment inside the oasis was generally declining. This showed that during the period of 2001–2015, the ecological environment changed in the lower reaches of the Shiyang River have obvious spatial heterogeneity. In summary, although the overall ecological environment of the lower reaches of the Shiyang River had been signifi-

cantly improved with the implementation of relevant ecological treatment projects, the deterioration of the ecological environment within the oasis cannot be ignored, and the local ecological environment management still has a long way to go.

Keywords: ecological water transport; ecological environment; spatial heterogeneity; RS; GIS; lower reaches of Shiyang River

近年来,随着区域经济和技术的迅猛发展,人与生态环境之间的冲突日益加剧,生态环境问题已引起了人们的广泛关注。RS 具有精度高、监测范围广、信息量大、速度快等特点,能够为生态环境监测和评估提供更为科学、客观和精确的数据,已成为生态环境监测的重要手段^[1]。当前国内外对于生态环境的监测已开展了一系列工作。许菁等^[2]运用 3S 技术对生态环境进行监测、评价;杨洋^[3]用 RS 技术对生态治理区的生态恢复情况进行了动态监测。但现有的研究监测指标有限,监测内容不够全面,且对西北内陆河流域生态环境极度脆弱的区域缺乏足够的研究。基于此,本文使用遥感数据,选取石羊河下游生态脆弱区作为研究区,选用植被覆盖度指数(VFC)、沙漠化指数(DI)、土壤盐渍化指数(MSI)、土壤湿度(WI)、绿度指数(GVI)和地表温度指数(LST)等指标,对石羊河下游生态输水政策实施以来的区域生态环境变化进行监测。

石羊河流域自西南向东北地貌差异大、气候复杂多变,水资源短缺、土地荒漠化成为制约当地社会经济发展的关键问题。随着人口数量不断增长,工农业快速发展,水循环系统破坏,有限的水资源供不应求。生物多样性丧失、地下水位下降、地下水矿化度增高、植被退化、土地荒漠化、土壤盐渍化等生态环境问题接踵而至,这一问题已引起了中央政府的高度关注^[4]。为治理当地的生态环境问题,中央政府于 2007 年 1 月启动了石羊河流域重点治理规划工程。该工程旨在通过调整产业结构、水资源配置保障工程、灌区节水改造工程、生态建设与保护工程、水资源保护和水资源管理体系建设等一系列治理措施增加地表来水量,减少地下水开采量,实现“决不能让民勤成为第二个罗布泊”的目标^[5]。因此,本文通过对比不同时期石羊河下游的生态环境状况,为该区域生态治理项目的实施效果评价提供参考。且本次研究通过获取的地表信息,厘清了区域生态环境变化趋势,为全面实现区域生态环境可持续发展提供科学依据,为生态环境治理政策的实施效果评估提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区地处甘肃省河西走廊东北部,石羊河流域下游,位于 101°49′41″~104°12′10″E、38°3′45″~39°27′37″N,总面积 4 024.40 km²,东、北、西三面被腾格里和巴丹吉林两大沙漠包围,大陆性沙漠气候特征显著。石羊河流域上游修建了大型水库,拦截地表水用于农业灌溉,将沿山雨养农业区改造为灌溉农业区,此外,将武威、古浪、永昌的大部分河水灌溉区变成了井水灌溉区,致使流域下游来水量减少,泉眼干枯,下游被迫超量开采地下水,造成地下水位急剧下降,水环境恶化^[6]。石羊河流域水资源经过多年的开发利用,支撑了区域经济的发展和人民生活水平的提高。但过度的水资源利用,产生了一系列生态环境问题,威胁着流域的可持续发展,部分区域甚至已经对人类的生存造成威胁,因此,中央政府和甘肃省政府于 2007 年实施石羊河流域综合治理,对当地的生态环境有着重要意义。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源与数据处理

研究选用 Landsat TM/OLI 遥感影像作为数据源,考虑到数据质量问题,选取 2001、2006、2009、2015 年 7—9 月 Landsat TM/OLI 遥感影像,具体时间为 2001 年 7 月 22 日,2006 年 8 月 21 日,2009 年 9 月 14 日和 2015 年 8 月 14 日。这些遥感影像云量在 5%之下,满足研究需求。下载数据之后,对每个时期的遥感影像进行预处理:(1)利用 ENVI5.3 的辐射定标工具(Radiometric calibration)对数据进行辐射定标,将原始的地物灰度值转换为辐射亮度值。(2)考虑到气溶胶、太阳高度角等对数据精度的影响,本文借助 ENVI5.3 软件对遥感影像做 FLAASH 大气校正。(3)利用研究区的矢量边界对遥感影像进行裁剪处理。最终进行信息提取和指数反演。

2.2 研究方法

通过提取研究区内各年份的植被覆盖度指数、沙漠化指数、土壤盐渍化指数、土壤湿度指数、绿度指数和地表温度指数,并对其进行标准化处理(处

理后的值域范围为 0~1)。之后,运用主成分分析方法计算研究期内每一年的各因子权重。用 ArcGIS 10.4 的栅格计算器将得到的各个因子权重与对应的因子相乘,得到每一年的遥感生态综合指数。

2.2.1 指数提取

(1) 植被覆盖度指数(VFC)提取。植被是调节地、气之间能量平衡的重要因素,也是影响气候的主要要素,同时还是研究人类因素对城市环境影响的指标之一^[7]。通过获取区域地表植被覆盖状态,对于揭示地表植被变化及植被动态变化趋势,分析、评价区域生态环境具有重要的现实意义。

通过归一化植被指数(NDVI)的计算,来确定植被覆盖率。NDVI 的计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \tag{1}$$

式中, ρ_{red} 为 Landsat TM 影像红光波段; ρ_{NIR} 为 Landsat TM 影像近红外波段。

由于植被在近红外波段有较强的反射率,因此,NDVI 值越大,代表该地区的植被覆盖度越大;而裸土在红光波段和近红外波段没有明显的差异,因此,NDVI 值越小,地表越接近裸土;故用下列公式来计算植被覆盖度(VFC):

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \tag{2}$$

式中,NDVI 为归一化植被指数, $NDVI_{max}$ 为植被的植被指数, $NDVI_{min}$ 为裸土的植被指数。

(2) 沙漠化差值指数(DDI)提取。近年来,沙漠化已成为困扰干旱区生态环境质量最重要的问题之一,对沙漠化的研究也越来越深入。曾永年等^[8-9]通过研究地表反照率(Albedo)与归一化差值植被指数(NDVI)之间的关系,提出了 Albedo-NDVI 特征空间概念,发现地表反照率和植被指数构成的二维空间与沙漠化程度密切相关,并提出了沙漠化差值指数模型。沙漠化过程及其地表特性的变化在 NDVI-Albedo 特征空间中有明显直观的反映,沙漠化差值指数能较好地反映研究区的沙漠化程度,故本文采用构造归一化植被指数(NDVI)与地表反射率(Albedo)特征空间的方法来提取研究区的沙漠化信息。

Albedo 的计算公式如下:

$$Albedo = 0.356\rho_{blue} + 0.130\rho_{red} + 0.373\rho_{NIR} + 0.085\rho_{SWIR1} + 0.072\rho_{SWIR2} - 0.0018 \tag{3}$$

参量标准化处理公式如下:

$$NDVI_{标} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100\% \tag{4}$$

$$Albedo_{标} = \frac{Albedo - Albedo_{min}}{Albedo_{max} - Albedo_{min}} \times 100\% \tag{5}$$

构建沙漠化差值指数模型(DDI):

$$DDI = -\frac{1}{k_i} \times NDVI_{标} - Albedo_{标} \tag{6}$$

$$DI = -DDI \tag{7}$$

式中, ρ_{blue} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 分别为 Landsat 数据的蓝光波段、红光波段、近红外波段, ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为短波红外 1 波段和短波红外 2 波段的反射率; $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 分别为归一化植被指数的最大值、最小值; $Albedo_{max}$ 、 $Albedo_{min}$ 分别为地表反射率的最大值、最小值; K_i 为 $NDVI - Albedo$ 特征空间关系的线性拟合系数, i 为 2001、2006、2010、2015 年 4 个研究时期。

(3) 土壤盐渍化指数(MSI)提取。在石羊河下游区域,由于超量开采地下水而引起了水质恶化、矿化度升高。此外,用高矿化度的水灌溉引起了土地盐碱化。在民勤湖区,仅 20 世纪 90 年代后期就有耕地因盐碱化而撂荒。同时,由于地下水矿化度高,味苦,人畜难以饮用,常到几公里以外的地方拉水、买水,给生活带来了很大的困难^[10]。针对研究区土壤盐渍化状况,本文通过采用 MSI 模型来反演研究区的盐渍化程度。修改型土壤调整植被指数(MSAVI)考虑了裸土土壤线,能减弱植被冠层及土壤背景影响,准确表示研究区植被信息^[11],研究发现盐分指数(SI)能够较好地反演土壤盐分状况。张添佑等^[12]以 2 个指数为基础提出了 MSAVI-SI 特征空间概念,并且发现修改型土壤调整植被指数(MSAVI)与盐分指数(SI)之间存在显著的负相关关系,以 MSAVI-SI 特征空间中任意一点到(1,0)点的距离表示土壤含盐量,离该点越小含盐量越少,反之越高,并以此构建了土壤盐渍化的遥感监测指数模型(MSI)。故本文采用 MSI 模型来反演研究区的盐渍化程度。公式^[9]如下:

$$SI = \sqrt{\rho_{blue} \times \rho_{red}} \tag{8}$$

$$MSAVI = \frac{(2\rho_{NR} + 1) - \sqrt{(2\rho_{NR} + 1)^2 - 8(\rho_{NR} - \rho_{red})}}{2} \times 100\% \tag{9}$$

参考标准化处理:

$$SI_{标} = \frac{SI - SI_{min}}{SI_{max} - SI_{min}} \times 100\% \tag{10}$$

$$MSAVI_{标} = \frac{MSAVI - MSAVI_{min}}{MSAVI_{max} - MSAVI_{min}} \times 100\% \tag{11}$$

建立土壤盐渍化指数模型(MSI):

$$MSI = \sqrt{(MSAVI_{\text{标}} - MSAVI_{\text{max}})^2 + SI_{\text{标}}^2} \quad (12)$$

式中, ρ_{blue} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 分别表示 Landsat 数据的蓝光波段、红光波段、近红外波段的反射率; SI_{max} 、 SI_{min} 分别表示盐分指数的最大值、最小值; $MSAVI_{\text{max}}$ 、 $MSAVI_{\text{min}}$ 分别表示土壤调整植被指数的最大值、最小值。

(4) 土壤湿度指数(WI)提取。K-T 变化后的前三个特征数据分别反映了亮度、绿色、湿度; 湿度分量反映出地面的水分含量状况。湿度分量表现出来的特征是: 除明显的水体之外大多都是负值, 值越小代表湿度越小, 土壤的含水量越低^[9]。故本文采用 K-T 变化后的湿度分量来反演研究区土壤湿度程度。土壤湿度计算公式如下:

$$WI = 0.1446\rho_{\text{blue}} + 0.1761\rho_{\text{green}} + 0.3322\rho_{\text{red}} + 0.3396\rho_{\text{NIR}} - 0.6210\rho_{\text{SWIR1}} - 0.4186\rho_{\text{SWIR2}} \quad (13)$$

式中, ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别表示 Landsat 数据的蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外 1 波段和短波红外 2 波段的反射率。

(5) 绿度植被指数(GVI)提取。K-T 变化后第二个数据特征表示绿度, 其能反映出地表植被变化, 因此, 本文采用 K-T 变化后的绿度分量来反演研究区植被绿度程度。绿度计算公式如下:

$$GVI = 0.2728\rho_{\text{blue}} - 0.2174\rho_{\text{green}} - 0.5508\rho_{\text{red}} + 0.7221\rho_{\text{NIR}} + 0.0733\rho_{\text{SWIR1}} - 0.1648\rho_{\text{SWIR2}} \quad (14)$$

式中, ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 表示 Landsat 数据的蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外 1 波段和短波红外 2 波段的反射率。

(6) 地表温度指数(LST)提取。地表温度是地学研究中的一个重要的参量, 它是土地退化、盐化、沙化和侵蚀以及气候变化的一个重要指示器。本文采用辐射传导方程算法来反演地表温度(LST)。辐射传导方程算法(RTE)又称为大气校正算法, 此算法对地表温度的反演是通过一些大气辐射传输模型(如 MODTRAN 系列、LOWTRAN 系列、ATCOR 或 6S)根据实时的大气探空数据或标准大气廓线数据, 估计大气对地表热辐射的影响, 并且从遥感器所观测到的热辐射总量中剔除这部分的大气影响, 从而得到真实的地表热辐射强度, 最后把真实的地表辐射强度转化为真实的地表温度^[13]。

通过对数据进行预处理, 包括辐射定标和大气校正等操作。再利用 NDVI, 计算植被覆盖度。计算公式见公式(2)。

根据前人研究^[13], 遥感图像可分为水体、城镇和自然表面 3 类。本文用以下方法计算研究区地表比辐射率: 水体像元的比辐射率赋值为 0.995, 自然表面和城镇像元的比辐射率的估算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{surface}} = 0.9625 + 0.0614F_v - 0.0461F_v^2 \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\text{building}} = 0.9589 + 0.086F_v - 0.0671F_v^2 \quad (16)$$

式中, $\varepsilon_{\text{surface}}$ 为自然表面像元的比辐射率, $\varepsilon_{\text{building}}$ 为城镇像元的比辐射率。

地表辐射亮度值获取: 通过美国航天航空局官网分别获取研究区各年份大气在红外波段的透过率(τ)、大气向上辐射亮度值($L_{\uparrow}$), 和大气向下辐射亮度值($L_{\downarrow}$)^[14]。地面的真实辐射亮度等于同温度黑体的辐射亮度值 LT 与地物发射率 ε 的乘积。大气校正公式如下^[15]:

$$L_{\lambda} = [\varepsilon LT + (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] \tau + L_{\uparrow} \quad (17)$$

式中, T 为地表真实温度, τ 为大气在热红外波段的透过率。则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度 LT 计算公式为:

$$LT = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau \cdot (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] / (\tau \cdot \varepsilon) \quad (18)$$

地表真实温度计算: 在获取热红外波段辐射亮度值以后, 根据普朗克公式的反函数, 求得地表真实温度 LST, 其计算公式如下:

$$LST = K_2 / \ln(K_1 / LT + 1) \quad (19)$$

对于 TM,

$$K_1 = 607.76W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m), \quad K_2 = 1260.5600K \quad (20)$$

对于 OLI,

$$K_1 = 774.8853W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m), \quad K_2 = 1321.0789K \quad (21)$$

2.2.2 遥感生态综合指数(RSECI) 通过计算所得的 6 个指标, 虽然可以得到单指标生态环境的变化, 但这种单指标评价, 只能片面地解释某一方面的生态环境。而实际上在整个生态系统中, 每个指标的互动综合影响着整个生态系统, 它们是无法被单独分割的^[1]。所以将每一年的数据提取多个特征因子后加权进行年际变化的比较更加具有实际价值。因此, 本文通过空间主成分分析方法对单个指标进行综合, 得到遥感生态环境监测指数, 对研究区的生态环境进行监测。

主成分分析法是多元统计方法的一种, 通过正交变换, 使参评因素的原始变量综合简化, 生成新的线性组合变量。主成分即主要的线性组合变量, 它比原始变量更能集中反映研究对象的特征。分

析过程中涉及的特征根反映了各主成分方差的大小;特征根积累百分率代表所含主成分对总方差的贡献率;特征向量反映各原始指标对主成分的贡献大小,即权重的大小。传统 PCA 方法中每个变量是一个向量,常规的统计分析软件都可以实现^[16]。

由于得到的每个指数在分级值和计量单位上看,都不具有可比性,因此,需要对各年份指数进行标准化处理。

采用级差标准化的方法,对各指标进行处理。当指标与生态环境成正相关时使用式(22),当指标与生态环境成负相关时使用式(23)^[16]:

$$X'_i = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (22)$$

$$X'_i = 1 - (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (23)$$

式中, X'_i 表示第*i*个指标的标准化值, X_i 表示第*i*个指标的初始值, X_{imax} 、 X_{imin} 分别表示第*i*个指标在研究区内的最大值和最小值。

3 结果与讨论

3.1 影响石羊河流域下游区域生态环境的生态指标的主成分分析

通过对各评价指标的整理,将 6 个遥感生态评价指标归纳为两大类,其中绿度、植被覆盖度和湿度(WI)为正向指标,荒漠化、地表温度和盐渍化为负向指标。由表 1 计算结果可知,荒漠化、绿度和地表温度占了累计贡献率的 94%,说明沙漠化、植物的生长状况和地表温度是影响石羊河下游区域生态环境的主要因素。其中,沙漠化与区域生态环境恶化的关系更为密切,其贡献率达到了 82.02%,为所有指标贡献率之最。而绿度与生态环境好转的关系更为密切,其贡献率为 6.5%,为所有正向指标贡献率之最。

根据 4 个研究时段的特征值情况绘制特征值变化图,如图 1 所示,可以看出沙漠化指数的贡献度整体上呈下降趋势,这表明石羊河下游区域在生态输水项目实施以后土壤沙漠化现象有了显著的改善,而土壤湿度和地表温度的贡献度也呈缓慢上升趋势,表明当地的土壤质地有好转的迹象,加之地表温度对其生态环境改善的正向叠加,使其贡献率增加;而植被覆盖度和植被绿度同样也呈上升趋势,表明当地的植被面积相比输水前有所增加,这也是该区域环境质量有所提高的主要原因之一。由此可见,由于上游输水,在局部改善了植被生长环境,使其沙漠化程度有所降低,改善了综合生态环境状况。

表 1 各年份主成分的特征值及贡献率				
Table 1 Eigenvalues and their contribution rates of the principal components for per year				
年份 Year	主成分 Main component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
2001	荒漠化 Desertification	10.7703	85.9337	85.9337
	绿度 Greenness	0.8210	6.5504	92.4841
	地表温度 Land surface temperature	0.3982	3.1770	95.6610
	盐渍化 Salinization	0.2707	2.1599	97.8209
	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.2164	1.7267	99.5477
	湿度 Wet	0.0567	0.4523	100
2006	荒漠化 Desertification	8.8940	78.4724	78.4724
	绿度 Greenness	1.2344	10.8916	89.3639
	地表温度 Land surface temperature	0.5681	5.0124	94.3763
	盐渍化 Salinization	0.3677	3.2444	97.6207
	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.2239	1.9751	99.5958
	湿度 Wet	0.0458	0.4042	100
2009	荒漠化 Desertification	8.18191	80.4430	80.443
	绿度 Greenness	0.9220	9.0646	89.5075
	地表温度 Land surface temperature	0.5806	5.7080	95.2156
	盐渍化 Salinization	0.3918	3.8516	99.0672
	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.0489	0.4809	99.5481
	湿度 Wet	0.0460	0.4519	100
2015	荒漠化 Desertification	8.4338	83.2149	83.2149
	绿度 Greenness	0.8797	8.6795	91.8944
	地表温度 Land surface temperature	0.4356	4.2980	96.1924
	盐渍化 Salinization	0.2994	2.9541	99.1465
	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.0493	0.4867	99.6332
	湿度 Wet	0.0467	0.4547	100

3.2 石羊河流域下游区域生态环境的时空变化特征

通过对 4 个时期的植被覆盖度、沙漠化差值指数、土壤盐渍化、土壤湿度指数、绿度指数、地表温度指数的计算,分别得到不同时期植被覆盖度的空间分布图(图 2)、沙漠化的空间分布图(图 3)、土壤盐渍化的空间分布图(图 4)、土壤湿度程度的空间分布图(图 5)、绿度程度的空间分布图(图 6)、地表温度空间分布图(图 7)。最后,通过对各个指标进行综合,得到石羊河下游区域生态环境空间分布图(图 8)。为便于研究区生态环境的时空对比,本文通过自然断点法,将归一化后的遥感生态监测结果划分为 5 个等级(图 9),分别为差、较差、中等、良和优,分别统计了不同时期不同类型的面积及占比。通过统计结果可以看出(表 2),石羊河下游地区面积最多的为差等级,且各个时期所占面积均在 50%以上,说明该地区整体上生态环境还是比较差的。但从 4 个不同时段对比来看,中等、良和优面积有较明显增加,说明过去 15 年间下游地区生态在局部有好转的迹象,这与各级政府的努力是分不开的。

将 4 个研究时段的遥感生态综合指数图进行叠置分析,得到了 4 个时期增加和减少的空间位置及面积分布状况(表 3)。从表 3 可知,在 2001—2006 年

期间,生态环境变好的区域面积为 357.08 km²,变差的区域面积为 100.24 km²。在这一时期,虽然石羊河上游的来水量少,但大量的地下水被抽取,以满足当地生产生活需求。据统计 2006 年该区域的机井数量达到了 12 132 眼,机井建设规模达到了顶峰。因此,石羊河下游地表生态环境质量不降反升,且生态环境变好的区域主要集中于绿洲区,变差的区域集中于绿洲边缘区(图 10)。在 2006—2009 年期间,生态环境变好的区域面积为 397.77 km²,变差的区域面积为 1 386.14 km²。由于大量的地下水被开采,导致地下水水位不断下降,水质恶化。2007 年石羊河流域重点治理规划颁布实施,但由于生态环境有滞后效应,该时期生态环境并未好转,总体上呈现出恶化趋势。且生态环境变好的区域主要集中于绿洲区,变差的区域集中于绿洲边缘区(图 10)。在 2009—2015 年期间,生态环境变好的区域面积为 1 637.98 km²,变差的区域面积为 398.83 km²。经过调水工程的实施,石羊河下游地区的生态得到有效治理,尤其是红崖山水库水量的增加,向下游排放的水量也随之增加。因此,流域下游尾间绿洲区及其周边生态环境没有继续恶化且得到有效的改善。经过长达十多年的治理,石羊河下游地区的生态环境质量得到了显著改善。且生态环境变好的区域主要集中于绿洲边缘区,绿洲区由于人类活动频繁生态环境变差(图 10)。

在 2001—2015 年 15 年间,石羊河流域下游区域生态环境经历了先恶化后恢复的过程,尤其是自 2009 年以后,流域下游的民勤绿洲区的生态环境得到了有效的保护和显著改善。与此同时,通过研究发现,在下游绿洲边缘地区生态环境逐渐变好,但在绿洲内部出现了生态环境波动恶化的趋势,这一现象应引起相关部门的高度重视(图 10)。但从总体上分析,2001—2015 年间,随着生态输水等一系列生态治理措施的落实,石羊河下游地区生态环境发生了显著改善,说明当地政府通过人工调水工程、植树造林工程和防风治沙工程等大型生态环境治理项目,能够使区域生态环境得到较大改善。

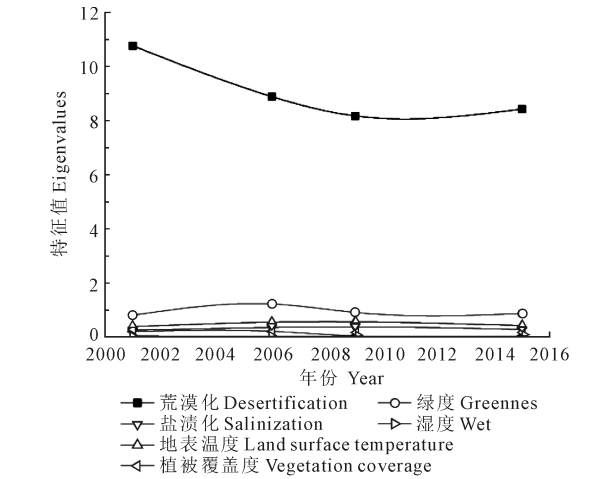


图 1 综合指数特征值分析

Fig.1 Composite index eigenvalue analysis

表 2 石羊河流域下游区域生态环境分区面积

Table 2 Statistical table of zonal area of ecological environment in the lower reaches of Shiyang River Basin								
分区 Partition	2001		2006		2009		2015	
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion
差 Deterioration	2125.51	53.41	2164.36	54.39	2160.88	54.30	2228.82	56.01
较差 Poor	665.89	16.73	600.83	15.10	560.13	14.08	544.44	13.68
中等 Moderate	418.69	10.52	467.84	11.76	473.93	11.91	477.13	11.99
良 Good	449.87	11.30	415.28	10.44	443.23	11.14	356.25	8.95
优 Excellent	319.54	8.03	331.19	8.32	341.33	8.58	372.86	9.37

表 3 石羊河流域下游区域生态环境变化面积

Table 3 Statistics of ecological environment change area in the lower reaches of Shiyang River Basin

变化 Change	2001–2006		2006–2009		2009–2015		2001–2015	
	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion	面积/km ² Area	比例/% Proportion
变差 Worsen	100.24	21.92	1386.14	77.70	398.83	19.58	445.08	32.73
变好 Meliorate	357.08	78.08	397.77	22.30	1637.98	80.42	914.63	67.27

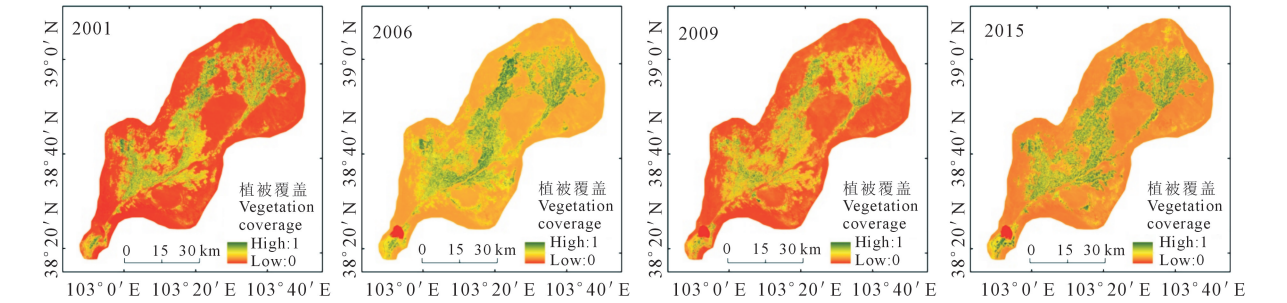


图 2 植被覆盖空间分布
Fig.2 Spatial distribution map of vegetation cover

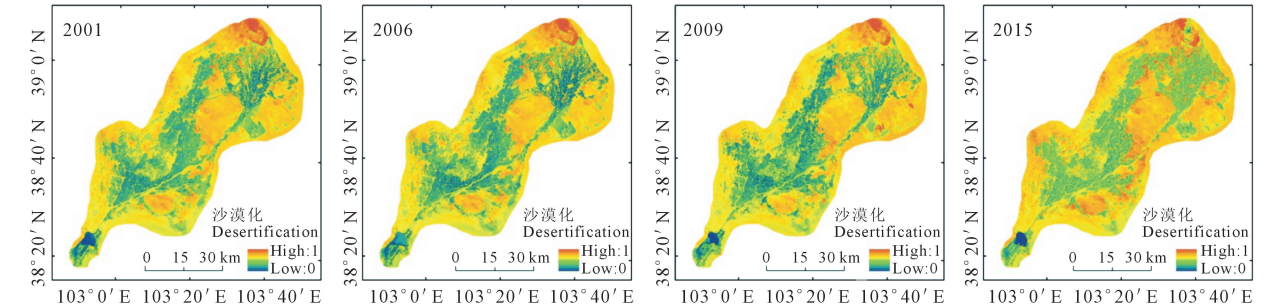


图 3 土壤沙漠化空间分布
Fig.3 Spatial distribution map of soil desertification

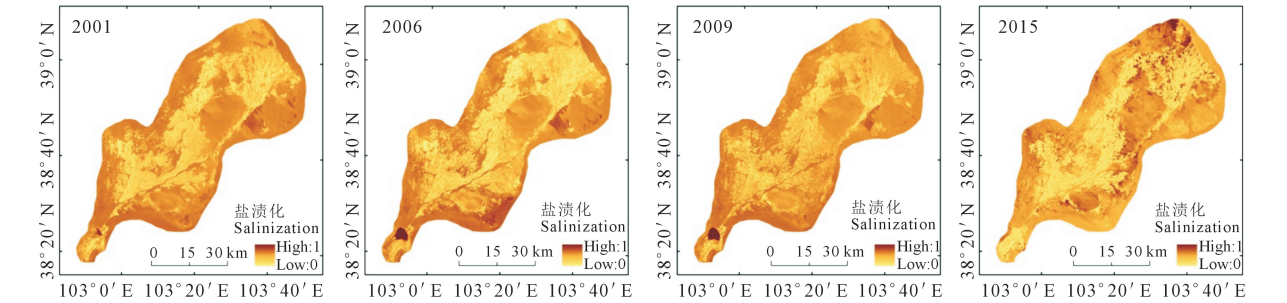


图 4 土壤盐渍化空间分布
Fig.4 Spatial distribution map of soil salinization

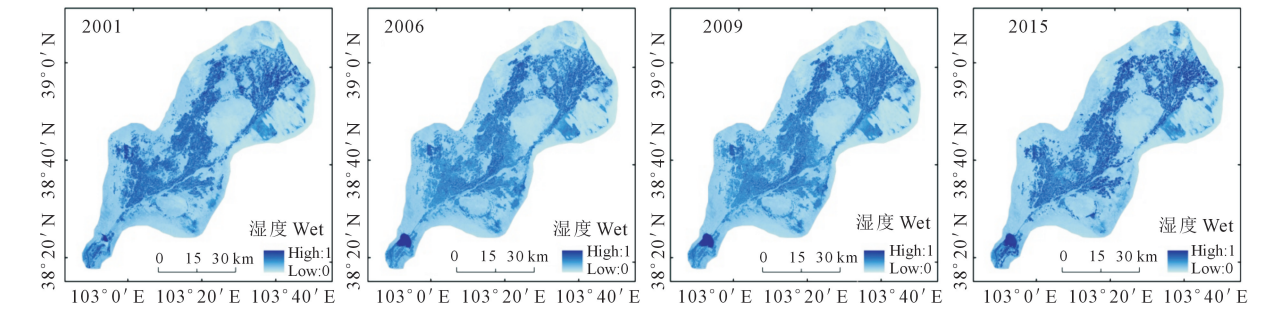


图 5 土壤湿度空间分布
Fig.5 Spatial distribution of soil moisture

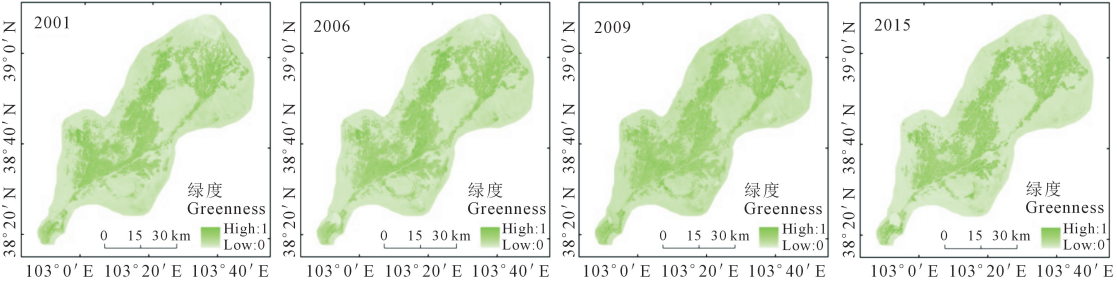


图 6 植被绿度空间分布
Fig.6 Vegetation greenness spatial distribution map

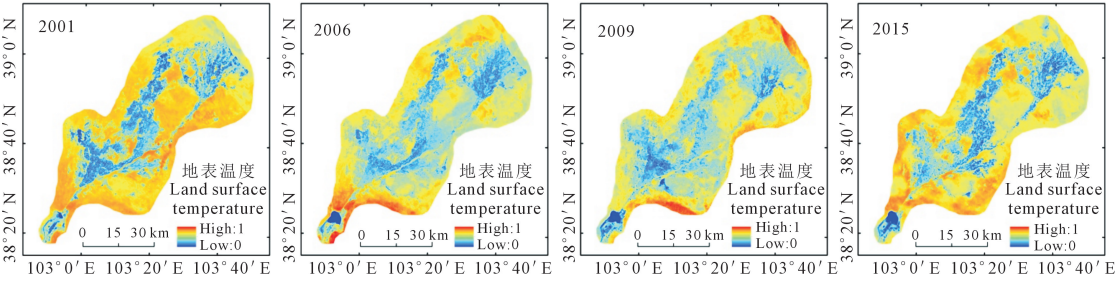


图 7 地表温度空间分布
Fig.7 Land surface temperature spatial distribution map

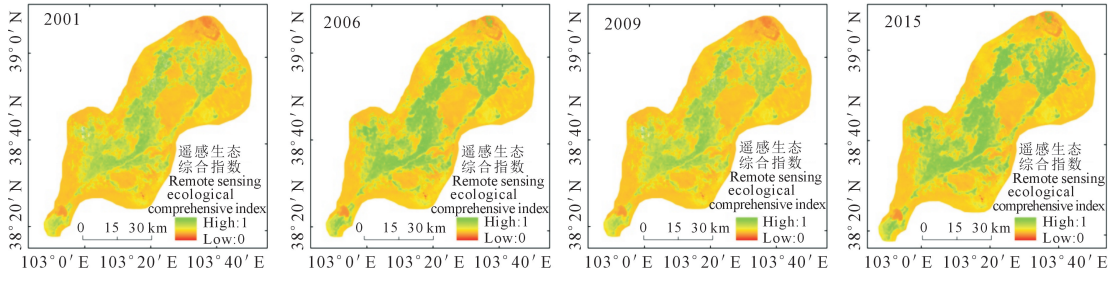


图 8 遥感生态综合指数空间分布
Fig.8 Spatial distribution map of remote sensing ecological comprehensive index

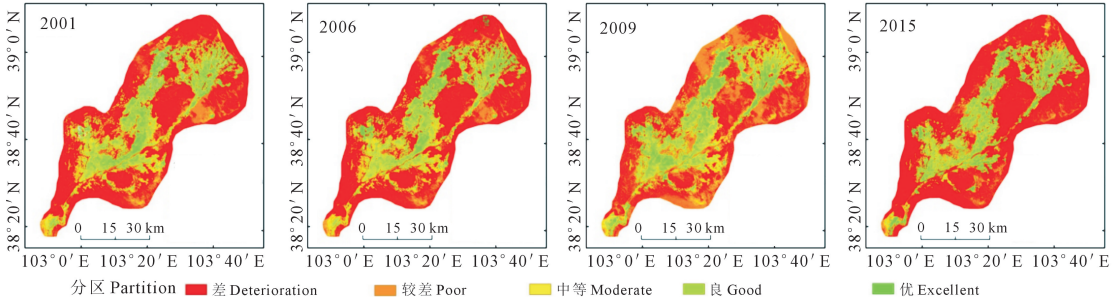


图 9 遥感生态综合指数等级划分空间分布

Fig.9 Remote sensing ecological comprehensive index classifies the spatial distribution

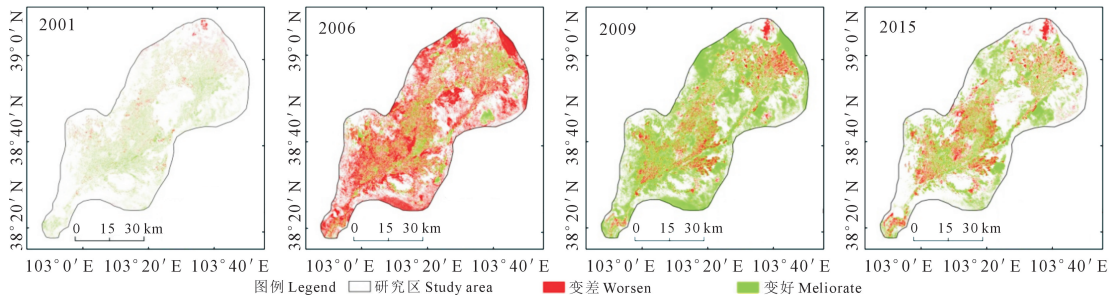


图 10 石羊河下游生态环境变化

Fig.10 Monitoring map of ecological environment changes in the lower reaches of Shiyang River

4 结 论

本文考虑到遥感可快速、客观、大面积的观测的特点,借助遥感手段,选取植被覆盖度指数、沙漠化指数、土壤盐渍化指数、土壤湿度指数、绿度指数和地表温度指数等 6 个指标构建石羊河下游生态环境评价指标体系,运用主成分分析法,对石羊河下游生态输水政策实施以来,生态环境状况及其时空变化特征进行分析。结论如下:

1)从时间变化来看,RSECI 值从 2001 年的0.42 上升到 2015 年的 0.48。这表明相比 2001 年,2015 年的生态环境显著改善。此外,在 2006 年石羊河下游实施生态输水初期,石羊河下游的生态环境没有显著改善,且绿洲部分地区还有恶化趋势,但在生态输水持续进行后,石羊河下游绿洲的环境得到显著改善。这表明生态治理政策的实施对区域生态环境状况改善具有滞后效应。

2)从空间变化来看,在 2001—2016 年间,石羊河下游的生态环境变化状况具有明显的空间异质性。一方面,自石羊河下游实施生态输水以来,绿洲边缘沙漠区的环境显著改善,这表明在生态环境脆弱区,通过一些重大生态工程建设,能够有效改善局部生态环境状况。另一方面,绿洲内部人类生产、生存聚居区生态环境总体上呈下降趋势,这表明人类的生产、生存活动对当地的生态环境改善工作造成阻碍。

综上所述,虽然随着相关生态治理项目的实施,石羊河下游的总体生态环境状况得到显著改善,但绿洲内部区域的生态环境恶化趋势也不容忽视,当地的生态环境治理工作仍然任重道远。

参 考 文 献:

[1] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7853-7862.

[2] 许菁, 阙丹丹, 官荣柱. 探讨利用 3S 技术对小区域生态环境变化的分析方法——以福州大学城周围环境为例[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2007, 6(1):99-102.

[3] 杨洋.基于 Landsat TM/OLI 遥感影像的焦作市生态环境监测与评价[D]. 抚州:东华理工大学,2018.

[4] 蒋菊芳, 魏育国, 韩涛, 等. 近 30 年石羊河流域生态环境变化及驱动力分析[J]. 中国农学通报, 2018,34(21):127-132.

[5] 郝媛媛. 基于 GIS/RS 的西北内陆河流域生态恢复效果评价研究——以石羊河下游民勤盆地为例[D]. 兰州:兰州大学, 2017.

[6] 俄有浩, 王继和, 王耀琳. 石羊河流域水资源持续利用与发展对策 [C]//王继和.中国西北荒漠区持续农业与沙漠综合治理国际学术交流会议文集. 兰州:兰州大学出版社,1997,78-81

[7] 王多尧, 蒋志荣, 纪永福. 石羊河流域生态环境问题及综合整治意见[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2):5-9.

[8] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo—NDVI 特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. 地理科学, 2006,(1):75-81.

[9] 石三娥, 魏伟, 杨东, 等. 基于 RSEDI 的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2018,37(4):1152-1163.

[10] 张宏群, 杨元建, 荀尚培, 等. 安徽省植被和地表温度季节变化及空间分布特征[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2):232-240.

[11] 丁建丽, 瞿娟, 孙永猛, 等. 基于 MSAVI-WI 特征空间的新疆渭干河—库车河流域绿洲土壤盐渍化研究[J]. 地理研究, 2013, 32(2):223-232.

[12] 张添佑, 王玲, 曾攀丽. 基于 MSAVI-SI 特征空间的玛纳斯河流域灌区土壤盐渍化研究[J]. 干旱区研究, 2016,33(3): 499-505.

[13] 丁凤, 徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析 [J]. 地球信息科学, 2009,8(2):126-127.

[14] 林江, 陈松林. 基于 ETM+影像的厦门岛地表温度反演与热环境分析[C]//福建省土地学会. 2012 年年会论文集. 福州:福建省土地学会,2012.

[15] 赵晓旭, 刘晓健, 高开强. 基于辐射传导方程法的地表温度反演 [J]. 北京测绘. 2017,(3):79-82.

[16] 潘竞虎, 李宝娟. 基于空间 PCA 的兰州市热环境人文驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4):662-670.