DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.026 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.026
何黎鸣, 李小玲, 陈冉, 等. 基于改进遥感生态指数的兰西城市群生态环境质量时空演变研究[J]. 水土保持研究,2026,33(6):358-370,383.
He Liming, Li Xiaoling, Chen Ran, et al. Spatiotemporal evolution of ecological environment quality in Lanzhou-Xining urban agglomeration based on improved remote sensing ecological index[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):358-370,383.

基于改进遥感生态指数的兰西城市群生态环境质量时空演变研究

何黎鸣[1], 李小玲[1], 陈 冉[1], 应泓康[2], 刘逸瑞[1], 王 成[1]
(1.青海大学 土木水利学院, 西宁 810016; 2.江西财经大学 公共管理学院, 南昌 330013)

摘 要:[目的]科学客观评价兰西城市群生态环境质量的时空演变格局,为区域生态保护与管控提供精细化科学依据。[方法]基于Landsat 8遥感数据,构建适配区域特征的改进遥感生态指数(IRSEI),结合Sen+Mann-Kendall趋势分析与生态敏感性分析,开展了生态环境质量多维度研究。[结果](1)生态环境质量与生态敏感性空间分异均较显著且格局稳定,生态质量呈现西部优于东部的特征,西北部以优、良等级为主,东部城镇与农业集中区以一般、较差、差等级为主;生态敏感性呈现西部高、东部低、南部强、北部弱的分布特征,高敏感区(10.38%)与较高敏感区(22.67%)合计占33.05%,且与IRSEI显著下降区空间重叠率达83.7%,耦合性极强;(2)时序演变呈现阶段性特征,IRSEI均值从0.50波动降至0.48,未恢复至2018—2020年最优水平(0.52);(3)研究期内IRSEI以不显著下降为主导,占比达61.13%,显著下降区域占6.65%,不显著上升与显著上升区域分别占30.9%和1.18%,空间趋势呈现中西部以下降为主、东部以上升为主的特征,生态等级转移呈现良等级上升、优等级下降、差等级增加、较差等级减少的特点,良等级区域面积增幅最大,达5 841.79 km^2,中敏感区(32.53%)为等级转移的核心过渡带。[结论]构建的IRSEI适配兰西城市群的复合生态环境特征,可精准表征区域特有的生态胁迫要素;研究证实区域生态质量与生态敏感性空间分异格局固定且空间耦合关系突出,IRSEI时序表现为阶段性震荡回落,空间演化趋势以不显著下降为主,生态用地等级转化呈现中等用地承接生态转型、优劣生态用地两极演变的客观规律。

关键词:改进遥感生态指数; 兰西城市群; 生态环境质量; 生态敏感性; 时空分异
中图分类号:X87; X821 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0358-13

Spatiotemporal evolution of ecological environment quality in Lanzhou-Xining urban agglomeration based on improved remote sensing ecological index

He Liming[1], Li Xiaoling[1], Chen Ran[1], Ying Hongkang[2], Liu Yirui[1], Wang Cheng[1]
(1.*School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Qinghai University, Xining* 810016, *China*;
2.*School of Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to scientifically and objectively evaluate the spatiotemporal evolution pattern of ecological environment quality in the Lanzhou-Xining urban agglomeration, thereby providing a refined scientific basis for regional ecological protection and management. [**Methods**] Based on Landsat 8 remote sensing data, an improved remote sensing ecological index (IRSEI) adapted to regional ecological characteristics was constructed, and a multi-dimensional analysis of ecological environment quality was conducted by combining Sen+Mann-Kendall trend analysis and ecological sensitivity analysis. [**Results**] (1) Both ecological environment quality and ecological sensitivity showed significant and stable spatial differentiation. Ecological quality was higher in the west than in the east, with the northwest dominated by excellent and good grades, while the eastern urban

收稿日期:2026-01-08 **修回日期:**2026-02-06 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:青海大学研究生科研创新项目"兰西城市群城镇化与生态环境耦合协调关系及驱动机制研究"(2025-GMKY-28)
第一作者:何黎鸣(2001—),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为城乡规划与区域可持续发展。E-mail:h362528@163.com
通信作者:李小玲(1983—),女,青海海东人,博士,副教授,主要从事生态经济与区域可持续发展研究。E-mail:lxlsource@163.com

and agricultural concentrated areas were dominated by moderate, poor, and worse grades. Ecological sensitivity showed a distribution pattern of high in the west, low in the east, strong in the south, and weak in the north. Highly sensitive and relatively highly sensitive areas accounted for 10.38% and 22.67%, respectively, with a total proportion of 33.05%, and their spatial overlap rate with areas showing significant IRSEI decrease reached 83.7%, indicating a strong coupling relationship. (2) The temporal evolution exhibited phased characteristics, with the mean IRSEI fluctuating from 0.50 down to 0.48, failing to recover to the optimal level of 0.52 during 2018—2020. (3) The IRSEI during the study period was dominated by a non-significant decreasing trend, accounting for 61.13% of the total area. Areas with a significant decrease accounted for 6.65%, while areas with non-significant and significant increases accounted for 30.9% and 1.18% respectively. Spatially, a decreasing trend dominated the central and western regions, and an increasing trend dominated the east. The ecological grade transition was characterized by an expansion of good grade areas, a shrinkage of excellent grade areas, an increase in poor grade areas, and a decrease in worse grade areas. The good grade area had the largest increase of 5 841.79 km^2, and moderately sensitive areas (32.53%) served as the core transition zone for grade shifts. [**Conclusion**] The constructed IRSEI is tailored to the complex ecological environmental characteristics of the Lanzhou-Xining urban agglomeration and can accurately characterize the region-specific ecological stressors. The study confirms that the spatial differentiation patterns of regional ecological quality and ecological sensitivity are stable, and their spatial coupling relationship is prominent. The temporal variation of IRSEI exhibits a phased oscillatory decline, while its spatial evolution trend is dominated by insignificant decline. The grade transformation of ecological land follows an objective pattern in which medium-grade land serves as a transition zone for ecological transformation, accompanied by a polarized evolution of superior and inferior ecological land.

Keywords: improved remote sensing ecological index; Lanzhou-Xining urban agglomeration; ecological environment quality; ecological sensitivity; spatiotemporal differentiation

在全球气候变化与快速城市化双重压力下,城市群作为人口与经济活动的核心载体,其生态环境质量正面临着前所未有的挑战与威胁。兰西城市群不仅是国家“两屏三带”生态安全战略格局的关键节点,也是黄河流域生态保护与高质量发展的核心区域之一。该区域兼具生态脆弱性与快速城市化特征,面临着水资源短缺、土地荒漠化、水土流失以及建设用地扩张侵占生态空间等一系列复杂生态环境问题[1]。因此,科学、准确地评价其生态环境质量的时空演变格局,深入解析其驱动机制,对于维护区域生态安全、促进人地关系协调、支撑国家重大战略实施具有至关重要的理论与现实意义。

传统的生态环境质量评价多依赖于地面定点观测与统计资料,存在成本高昂、周期长、空间不连续等局限性,难以满足大范围、长时序的动态监测需求。遥感技术以其宏观、快速、客观和周期性的优势,为区域生态环境评价提供了革命性的手段。其中,徐涵秋[2]提出的遥感生态指数通过主成分分析耦合绿度、湿度、干度和热度4个遥感指标,实现了对生态环境质量的综合、定量与快速评估,已成为该领域广泛应用的经典模型[3-4]。然而,标准RSEI作为一种普适性框架,在应用于如兰西城市群这类兼具干旱半干旱过渡、盐渍化倾向与荒漠化风险的复合生态区域时,其预设指标对盐分累积、土地退化等关键本地胁迫过程的表征能力有限,评价结果的敏感性与针对性有待提高,亟需开展面向特定地理生态单元的本地化改进。

国内外研究围绕RSEI的改进与应用已形成丰富成果,其进展主要体现在以下两个相互关联的方面:一是针对特定生态问题的指标模型优化。为提升指数在不同区域的适用性,学者们致力于通过引入关键局部参数来改进模型[5]。在干旱半干旱区,改进工作聚焦于盐渍化与荒漠化等问题,例如通过引入盐度指数[6]或构建耦合盐度、土地退化度的新指数[7]以增强对单一生态问题的响应;在城市或矿区,则通过引入气溶胶、土壤侵蚀因子或采用移动窗口法[8]来增强对人为污染与扰动的响应。这些研究为构建地域适应性指标提供了方法论基础。然而,这类改进多针对某一类突出胁迫,尚未系统解决类似兰西城市群这样多种生态胁迫并存、相互交织的复合特征的全面表征难题。现有通用4指标框架或单一增补指标,难以同时有效捕捉该区域“水盐失衡与风蚀沙化共存”的复杂生态过程。二是从静态评估到多方法融合的动态格局分析。RSEI的应用已从单一时期的现状评价,发展到与多种空间分析方法结

合,以深入揭示生态格局的时空动态。例如,通过耦合转移矩阵分析土地利用变化下的生态质量演变[9];利用空间自相关分析生态质量的空间集聚特征[10];或结合生态敏感性评价识别生态保护关键区域[11]。此外,以Google Earth Engine为代表的云平台极大地促进了长时序、大范围的RSEI动态监测分析[12]。但既有研究在干旱半干旱地区的应用中,仍多以宏观格局描述或单一方法分析为主,尚未形成一套有机整合"质量现状评价—时空动态转换—生态脆弱性识别"的完整分析链条,从而难以系统揭示生态质量演变的空间过程与风险分布的内在关联。

具体到兰西城市群,相关研究提供了重要的本底认知与参照。现有成果已从土地利用转型及对环境的影响[13-14]、生态敏感性[15]、生态环境质量评价[16]、人为干扰对生态脆弱性的影响[17]以及城镇化与生态的耦合协调关系等[18]多个角度,揭示了该区域生态环境的空间分异格局及面临的主要压力。但综合来看,指标体系适配性不足、多方法整合程度偏低的问题仍较为突出。具体表现在:一方面,尽管有针对干旱区的RSEI改进研究,但目前尚未形成一套专门针对兰西城市群"干旱半干旱过渡带—盐渍化与荒漠化风险并存"这一复合特征且被系统应用的综合指标体系。通用的4指标框架或单一增加的改进指标,可能难以全面捕捉该区域复杂的生态胁迫因子;另一方面,在兰西城市群的相关研究中,将生态质量现状评估、生态脆弱性空间识别与长时间序列动态转换过程分析进行系统性整合的研究实践尚不多见。多数研究侧重于宏观格局描述或单一方法的运用,在揭示生态质量演变的空间过程与脆弱区分布方面,仍有深化细化的余地。

基于上述研究不足,本研究从指标体系优化与多方法整合双维度开展探索,针对性解决兰西城市群生态环境评价的三大现实问题:一是解决通用RSEI指标体系无法同步表征区域盐渍化、荒漠化复合生态胁迫的问题;二是解决单一分析方法难以串联生态质量现状、动态过程与脆弱格局的问题;三是解决现有研究成果与区域生态保护、差异化管控实践衔接不足的问题。在评价模型上,针对兰西城市群复合生态胁迫特征,引入荒漠度指数(DMI)、盐度指数(NDSI)并替换绿度指标,构建适配区域的改进遥感生态指数(IRSEI),完善本地化指标体系;在分析框架上,整合IRSEI, Sen+Mann-Kendall趋势分析、生态等级转移矩阵及生态敏感性评价,搭建"质量现状—动态过程—脆弱格局"的系统化整合分析路径。通过这一框架,系统揭示2014—2024年兰西城市群生态环境质量的时空分异、等级转换特征及其与生态敏感性的空间耦合关系,为区域差异化生态管理、保护修复优先区划定及黄河流域生态安全保障提供精准科学依据。

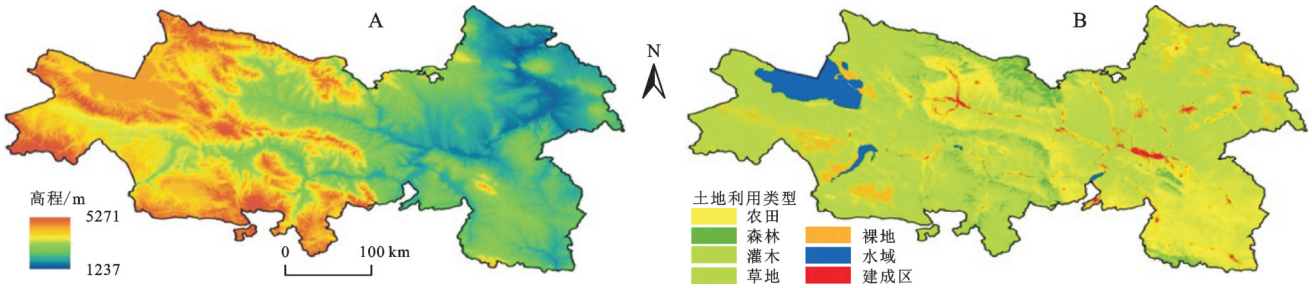
1 数据与方法

1.1 研究区概况

兰西城市群地处中国西北内陆腹地,地理范围介于东经99°—105°,北纬35°—37°,是《兰西城市群发展规划》明确的跨省域城市群,行政上涵盖兰州、西宁、海东市全境以及白银市、定西市、临夏州、海北州、海南州和黄南州的部分区县(图1)。该区域干旱少雨、蒸发强烈,这种水分亏缺与高蒸发势的水热组合,是土壤盐分向表层聚集、诱发次生盐渍化的根本自然驱动力。在地形上,区域呈现西高东低的格局,西部为高海拔山地与寒旱高原,东部为湟水、黄河等河谷盆地。地形梯度导致的水热再分配,使得东部河谷区在成为城镇与农业核心地带的同时,也因灌溉等人为水分输入而加剧了局部的水盐失衡风险。同时,干旱多风的气候与地表植被覆盖不足的区域,共同为风蚀沙化与土地荒漠化提供了条件。人类活动深刻重塑了生态过程的空间格局:东部河谷区密集的农业灌溉与城镇建设直接改变了自然水盐运移,而中西部草原区传统的放牧利用则影响着植被覆盖与土壤稳定性。这种"自然脆弱本底"与"人为高强度干扰"在空间上的耦合与错位,使得兰西城市群成为"干旱半干旱过渡、盐渍化与荒漠化风险并存"的典型复合生态胁迫区,其生态环境质量的演变不仅影响区域自身的可持续发展,更对黄河流域整体生态安全具有重要的辐射效应。

1.2 数据来源与预处理

本研究基于Google Earth Engine云计算平台,采用Landsat 8表面反射率数据产品。针对兰西城市群的地理特征和生态监测需求,制定专门的影像筛选标准:选择每年5月15日—9月15日植被生长旺盛期的影像数据,设置云量覆盖阈值低于70%,以平衡数据质量与覆盖度的需求。其他数据来源见表1。考虑到研究区域空间范围较大且受季风气候影响,单一年份生长季内可用影像往往难以实现全域有效覆盖。为此,本研究创新性地采用跨年度影像融合策略,即将目标分析年份与前一年度同期的合格影像进行集成处理。具体而言,对于目标年份Y,同步采集Y年和(Y-1)年5月15日—9月15日期间的所有可用影像,通过中值合成算法生成融合产品。这一策略的核心目的是确保每年都能获得一幅空间连续、可比的分析底图。由于融合相邻年份的影像可能会在一定程度上平滑年际间的剧烈变化信号,因此,本文所揭示的生态环境质量变化主要反映年际尺度上的总体趋势与空间格局。



注:自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1　兰西城市群区域概况

Fig. 1　Regional overview of Lanzhou-Xining urban agglomeration

在数据预处理方面,首先基于QA_PIXEL质量评估波段进行精确的云与云阴影掩膜处理,采用位掩膜算法(云阴影标识位:2^3,云标识位:2^4)识别并剔除无效像元。对光学波段(SR_B2-SR_B7)应用标准化辐射转换($\rho=DN\times0.0000275-0.2$)获取地表反射率,热红外波段(ST_B10)通过特定系数(0.003 418 02)转换为地表温度。所有数据统一采用WGS1984地理坐标系(EPSG:4326),确保空间参考的一致性。为匹配城市群尺度的宏观生态评价需求,并与90 m分辨率的DEM等辅助数据保持空间一致性,本研究将所有计算生成的生态指标统一重采样至90 m空间分辨率。这一尺度选择的依据在于:(1)本研究的核心目标是揭示区域宏观的空间分异格局与时间演变趋势,而非刻画微观的地块边界;(2)主要的分析方法(Sen+Mann-Kendall趋势检测、生态等级转移矩阵)对中等尺度的分辨率变化不敏感,其统计结论具有稳健性;(3)统一的分辨率有利于多源栅格数据的准确叠加与耦合分析。

表1　数据来源与信息

Table 1　Data sources and information

数据类型	数据名称	分辨率/m	来源
遥感影像	Landsat 8	30	GEE(Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level-2)
地形数据	DEM	90	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	90	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡向	90	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
用地数据	土地利用类型	30	中国科学院资源与环境中心(https://www.resdc.cn)

1.3　研究方法

1.3.1　改进遥感生态指数　传统遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)虽广泛应用但在表征复杂生态系统方面存在局限。本研究结合兰西城市群地处干旱半干旱区及高原的区域特征和其具有植被退化、水资源短缺、土地荒漠化及土壤盐渍化等生态环境问题的现状,对RSEI进行系统性改进。在指标选取上,本研究采用植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)替代传统的NDVI作为绿度指标,因FVC受物候期和季节变化影响较小,结果稳定性更高,更适用于高原干旱半干旱地区[19],是衡量生态系统结构和功能稳定的基础。另外,针对研究区的土地荒漠化问题,引入荒漠化指数(DMI),用于直接量化地表裸露、沙化及土地退化的程度。DMI与FVC形成直接呼应:FVC下降往往预示着植被退化,而DMI上升则直接标示着荒漠化土地的扩张,二者结合可清晰揭示"植被减少到土地荒漠化"的转化过程。针对土壤盐渍化问题,引入盐度指数(NDSI),用于监测土壤盐分积聚状况。在干旱半干旱区,土壤盐渍化与荒漠化常相伴而生,且共同受到植被覆盖减少的影响。盐分积累会加剧土壤退化,抑制植被恢复,从而与DMI所表征的荒漠化进程形成正反馈循环。

综上,本研究构建的改进遥感生态指数(IRSEI)由FVC(绿度)、WET(湿度)、NDBSI(干度)、LST(热度)、DMI(荒漠度)和NDSI(盐度)6个指标耦合而成。该体系不仅将评价维度从传统的4个方面拓展至6个方面,其核心创新在于通过FVC,DMI与NDSI三者的协同设置,实现了对"植被状况-土地荒漠化-土壤盐渍化"这一区域内关键生态退化链路的系统性监测与耦合表征,从而使得IRSEI能够更全面、更深入地响应兰西城市群特有的复合生态胁迫机制,为开展因地制宜的生态环境质量评价奠定方法基础。各指标计算方法如下:

植被覆盖度(FVC)[20]:

$$FVC=\left[\left(\rho_{NIR}-\rho_{Red}\right)/\left(\rho_{NIR}+\rho_{Red}\right)-0.1\right]/(0.7-0.1) \tag{1}$$

湿度(WET)[10]:

$$WET = 0.1509\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3279\rho_{Red} + 0.3406\rho_{NIR} - 0.7112\rho_{SWIR1} - 0.4572\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

标准干度(NDBSI)[1]:

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR}} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green}+\rho_{SWIR1}}\right)}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR}} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green}+\rho_{SWIR1}}\right)} \quad (3)$$

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1}+\rho_{Red}) - (\rho_{NIR}+\rho_{Blue})}{(\rho_{SWIR1}+\rho_{Red}) + (\rho_{NIR}+\rho_{Blue})} \quad (4)$$

$$NDBSI = (IBI + SI)/2 \quad (5)$$

地表温度(LST)[21]:

$$LST = 0.00341802\rho_{ST_B10} + 149.0 - 273.15 \quad (6)$$

盐度(NDSI)[22]:

$$NDSI = \frac{\rho_{Red} - \rho_{NIR}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR}} \quad (7)$$

荒漠度(DMI)[23]:

$$B = 0.3037\rho_{Blue} + 0.2793\rho_{Green} + 0.4743\rho_{Red} + 0.5585\rho_{NIR} + 0.5082\rho_{SWIR1} + 0.1863\rho_{SWIR2} \quad (8)$$

$$G = -0.2848\rho_{Blue} - 0.2435\rho_{Green} - 0.5436\rho_{Red} + 0.7243\rho_{NIR} + 0.0480\rho_{SWIR1} - 0.1800\rho_{SWIR2} \quad (9)$$

$$W = 0.1509\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3279\rho_{Red} + 0.3406\rho_{NIR} - 0.7112\rho_{SWIR1} - 0.4572\rho_{SWIR2} \quad (10)$$

$$DMI = 0.6B + 0.3G + 0.1(1 - W) \quad (11)$$

式中:ρ_{Blue}(蓝波段地表反射率)、ρ_{Green}(绿波段地表反射率)、ρ_{Red}(红波段地表反射率)、ρ_{NIR}(近红外波段地表反射率)、ρ_{SWIR1}(短波红外1段地表反射率)、ρ_{SWIR2}(短波红外2段地表反射率)分别代表蓝、绿、红、近红外、短波红外1和短波红外2波段的地表反射率;B为亮度分量(brightness);G为绿度分量(greenness);W为湿度分量(wetness);ρ_{ST_B10}为Landsat8 SR数据的热红外波段;0.003 418 02为热红外波段的官方缩放因子;149.0为热红外波段的官方偏移量;273.15为开尔文与摄氏度的转换常数。

1.3.2 构建IRSEI 为实现对研究区生态质量的综合客观评价,本文构建改进遥感生态指数(IRSEI),基于植被覆盖度(FVC)、湿度分量(WET)、干度指数(NDBSI)、地表温度(LST)、荒漠化指数(DMI)、盐度指数(NDSI)这6项核心生态指标。由于各项指标量纲不同,需先通过线性归一化公式将各指标值映射至(0,1)区间,消除量纲失衡对评价结果的干扰;随后采用主成分分析(PCA)提取第一主成分(PC1)作为IRSEI的初始值,以此避免主观权重设定并最大程度保留原始指标信息。同时,考虑到PCA特征向量存在非唯一性可能导致生态意义相反的结果[24],参考相关研究[25]选择植被覆盖度FVC分量判断PC1的特征向量方向,若FVC与PC1呈负相关则对PC1取反,确保IRSEI值越大代表生态质量越好,最终实现对研究区生态状况的综合量化评价。以下为具体计算公式:

$$NI_n = (I_n - I_{min})/(I_{max} - I_{min}) \quad (12)$$

$$IRSEI_0 = \begin{cases} PC1\left(PCA\left(FVC_{NI}, WET_{NI}, NDBSI_{NI}, LST_{NI}, DMI_{NI}, NDSI_{NI}\right)\right) & \lambda_{fvc} \geqslant 0 \\ 1 - PC1\left(PCA\left(FVC_{NI}, WET_{NI}, NDBSI_{NI}, LST, DMI_{NI}, NDSI_{NI}\right)\right) & \lambda_{fvc} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:NI_n为目标归一化后的结果;I_{min},I_{max}分别为I_n的最小值和最大值;$IRSEI_0$为归一化前的改进遥感生态指数;FVC_{NI},WET_{NI},$NDBSI_{NI}$,LST_{NI},DMI_{NI},$NDSI_{NI}$分别为归一化后的FVC,WET,NDBSI,LST,DMI与NDSI;λ_{fvc}为FVC对PC1的特征向量方向。最后,将$IRSEI_0$进行归一化,得到IRSEI,并将其按照[0,0.2)、[0.2,0.4)、[0.4,0.6)、[0.6,0.8)、[0.8,1.0]划分为差、较差、一般、良、优[26]。

1.3.3 Sen+Mann-Kendall趋势性分析 Theil-Sen Median趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法基于所有数据点的斜率中位数进行回归估计,对于测量误差和离群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析[27]。本研究用此方法分析栅格尺度的历年IRSEI的变化趋势。计算公式如下:

$$\gamma = \text{median}\left(\frac{IRSEI_j - IRSEI_i}{j - i}\right) \quad (14)$$

式中:γ为IRSEI的变化趋势;$IRSEI_j$和$IRSEI_i$分别为像素j和像素i的IRSEI值,其中$j > i$;median为中间值函数;$\gamma > 0$,表示IRSEI呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

Mann-Kendall(MK)检验是一种非参数统计方法。可以确定时间序列中是否存在显著趋势,适用于分析持续增长或下降趋势的时间序列数据[27]。计算公式如下:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & IRSEI_j - IRSEI_i > 0 \\ 0 & IRSEI_j - IRSEI_i = 0 \\ -1 & IRSEI_j - IRSEI_i < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \text{sign}(IRSEI_j - IRSEI_i) \quad (16)$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathrm{var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{18}$$

式中:sign为2个年份IRSEI值的变化方向;S为所有年份对之间变化方向的累计和;Z为标准化后的检验统计量;var(S)为简化的方差公式。

参考现有研究成果中给定的显著性水平$\alpha=0.05$,进行显著性检验,当Z的绝对值大于1.96时,表示通过了信度为95%的显著性检验[26]。具体判断方法见表2。

1.3.4　生态敏感性分析　生态敏感性是评估生态系统脆弱性与稳定性的核心指标,可揭示生态系统对外部干扰的响应与调节能力,为国土空间规划与生态保护红线划定提供前瞻性决策支撑。针对兰西城市群地处青藏高原与黄土高原过渡带、干旱缺水、水土流失严重的生态特征,本研究在既有研究基础上[28],选取了5个核心生态敏感性评价指标并对各指标进行分级处理(高程和坡度指标采用自然断点法),赋予敏感等级值(1~5分,分别代表低至高敏感等级),具体见表3。

表2　Sen+Mann-Kendall趋势等级划分

Table 2　Classification of Sen+Mann-Kendall trend levels

γ	Z	趋势特征
$\gamma>0$	$1.96<Z$	显著上升
	$Z<1.96$	不显著上升
$\gamma=0$		稳定不变
$\gamma<0$	$Z<1.96$	不显著下降
	$1.96<Z$	显著下降

表3　生态敏感性评价因子及分级标准

Table 3　Evaluation factors and classification standards for ecological sensitivity

指标层	低敏感(1)	较低敏感(2)	中敏感(3)	较高敏感(4)	高敏感(5)
高程/m	1265~1987	1987~2500	2500~3049	3049~3621	3621~5271
坡向	平地、正南	西南、东南	正东、正西	西北、东北	正北
坡度/(°)	0~5	5~10	10~15	15~20	>20
FVC	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
用地类型	未利用地	建设用地	耕地	草地、灌木	林地

为明确各指标相对重要性,本研究采用层次分析法(AHP)构建层次结构模型,通过Yaahp软件完成判断矩阵构建、权重计算与一致性检验。结果显示,各指标权重为用地类型(0.493 6)、植被覆盖度(0.234 4)、坡度(0.138 1)、高程(0.099 8)、坡向(0.034 2)。判断矩阵一致性比率CR=0.0397<0.1,通过一致性检验,权重分配合理可信,符合AHP方法的应用要求。

在ArcGIS 10.7平台上,采用加权叠加分析法,通过栅格计算器集成5个指标的栅格数据,生成生态敏感性综合评价图,并基于自然断点法将其划分为低敏感、较低敏感、中敏感、较高敏感和高敏感5个等级,揭示研究区生态敏感性的空间分异规律。需说明的是,本研究聚焦陆地生态系统敏感性评估,为与遥感生态指数的水体掩膜处理保持一致,构建了非水体掩膜图层,在最终分析中统一排除水体区域。这一处理既解决了多源遥感数据的表征矛盾,又使评估结果更精准地反映人类活动对陆地生态系统的潜在影响,为研究区国土空间规划与生态保护修复提供更具针对性的科学依据。

2　结果与分析

2.1　主成分分析

在遥感生态指数(RSEI)的经典构建体系中,第一主成分(PC1)是实现多生态指标信息浓缩与维度约简的核心载体,现有针对不同区域的RSEI研究均以PC1得分作为生态环境质量的量化表征依据,其核心逻辑在于PC1可在最大程度保留原始指标信息的前提下,整合各指标的生态响应特征[29]。根据表4的主成分分析结果可知,2014—2024年兰西城市群6项生态指标的PC1累计贡献率始终超过92%,特征值稳定处于0.040 0~0.050 3区间,说明PC1能够充分解释绝大多数原始信息,具备作为综合指数核心维度的稳定性。从生态内涵来看,PC1的载荷方向清晰反映了区域生态系统的结构化特征:植被覆盖度(FVC)、湿度(WET)等正向生态指标在PC1上呈负载荷,荒漠化(DMI)、地表温度(LST)等负向指标呈正载荷,这一特征与RSEI构建的常规规律完全一致[30],不仅验证了分析结果的可靠性,更从统计上印证了IRSEI将“绿度-湿度”视为生态增益因子、将“荒漠化-热度”视为生态压力因子的生态学假定,说明PC1可有效整合并表征区域内多指标共同指向的“综合生态环境质量”这一核心维度。

为进一步验证IRSEI构建的合理性,本研究结合相关性热力图对指标关系进行解析(图2)。结果表明,各指标与IRSEI之间的相关性方向及强度均与实际生态过程高度契合:从IRSEI与单指标的关联看,植被覆盖度(FVC)作为核心正向生态指标,其与IRSEI的相关系数绝对值均超过0.7,符合“植被覆盖度越高,区域生态环境质量越好”的实际规律;湿度(WET)与IRSEI呈正向关联,尽管其相关系数绝对

值相对较低，但方向仍契合“区域湿度越高，生态环境质量越好”的生态逻辑；而荒漠化（DMI）、地表温度（LST）等负向指标与IRSEI的正向相关，则对应了“土地退化加剧与热胁迫增强共同导致生态质量下降”的复合胁迫过程。此外，指标间的相互关系进一步从系统机制层面支撑了IRSEI构建的科学性。例如，FVC与DMI，LST均呈现显著负相关，这一统计关系反映了“植被覆盖通过调节地表反照率、改善局地微气候、增强土壤固持等途径，能够有效抑制荒漠化发展与热环境累积”的生态互馈机制。以上相关性特征共同表明，本研究构建的IRSEI不仅在统计上稳定可靠，其指标体系的选取与整合方式也紧密契合区域生态系统的内在过程与相互作用机理，从而为该指数的合理性与适用性提供了扎实的理论与实证依据。

表4 主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis

年份	成分	各指标荷载						特征值	贡献率/%
		DMI	FVC	LST	NDBSI	NDSI	WET		
2014	PC1	0.3956	−0.7353	0.2428	0.0886	0.4669	−0.1340	0.0454	92.52
	PC2	0.6048	0.4041	0.6037	−0.0166	−0.2477	−0.2118	0.0020	4.06
2016	PC1	0.3980	−0.7444	0.2086	0.0165	0.4789	−0.1200	0.0440	92.82
	PC2	0.7702	0.3938	0.3750	−0.0032	−0.2472	−0.2234	0.0019	3.92
2018	PC1	0.3867	−0.7143	0.1905	0.2831	0.4583	−0.1175	0.0455	92.18
	PC2	0.7491	0.3743	0.4507	−0.0877	−0.2299	−0.1873	0.0019	3.77
2020	PC1	0.3671	−0.7210	0.195	0.3049	0.4457	−0.1258	0.0446	92.15
	PC2	0.7963	0.3695	0.3677	−0.0815	−0.2193	−0.1988	0.0018	3.63
2022	PC1	0.3705	−0.7164	0.2037	0.2840	0.4509	−0.1549	0.0503	92.26
	PC2	0.7534	0.4174	0.3198	0.0214	−0.2249	−0.3237	0.0018	3.38
2024	PC1	0.3769	−0.7153	0.2168	0.2712	0.4561	−0.1332	0.0483	92.02
	PC2	0.7285	0.3783	0.4585	−0.0876	−0.2403	−0.225	0.0020	3.79

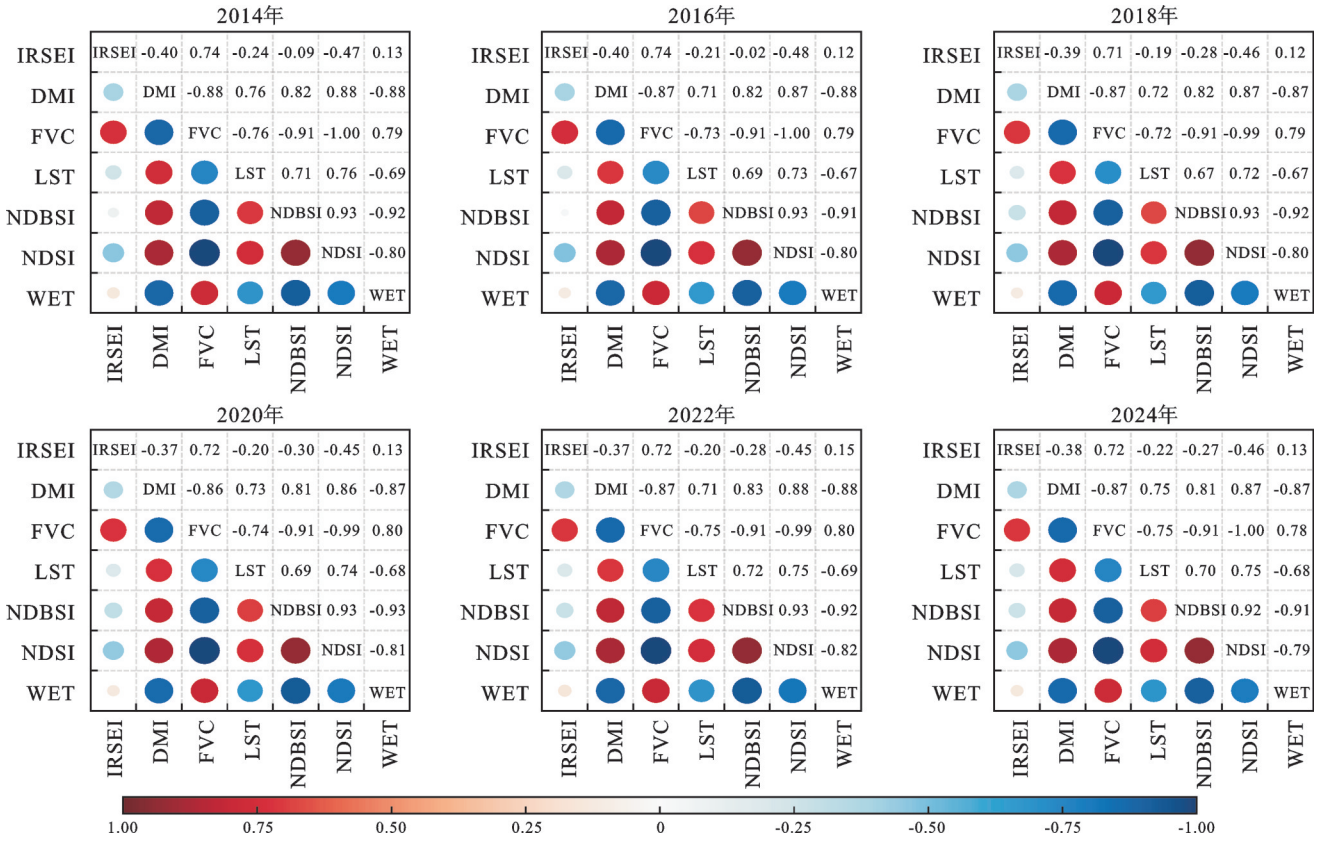


图2 相关性分析结果

Fig. 2 Results of correlation analysis

2.2 兰西城市群IRSEI时空分异

2.2.1 兰西城市群整体 如图3所示，2014—2024年兰西城市群IRSEI时空分异呈现“空间格局固化、时间波动演进”的特征，核心空间格局始终表现为“西

北部优于东北部”：西北部以高生态等级（优、良）为主，山地草甸与河谷湿地构成的优越生态本底支撑高等级区域形成较强连续性；东北部以中低生态等级（一般、较差、差）为主，河谷平原与城镇集中区呈连片分布。时序上，生态质量经历“改善—稳定—下滑—复苏”的阶段性波动：2014—2018年西北高等级区向东南扩张、东南低等级区收缩；2020—2022年东南低等级区显著扩张、西北局部高等级区向中等级转化；2022—2024年西北高等级区范围回升、东南低等级区缩减，但“西优东差”的核心格局未发生根本性改变，反映了区域生态质量空间分异的稳定性与外界扰动的阶段性影响。

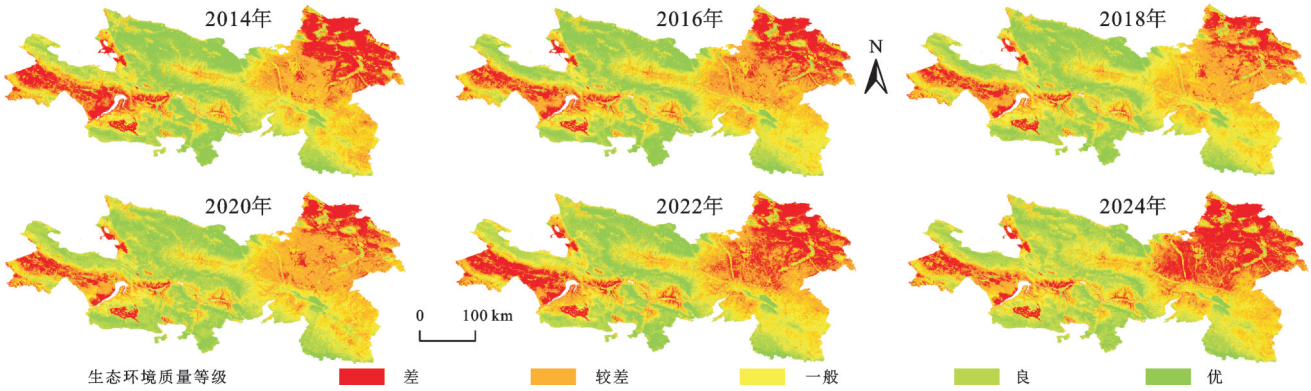


图 3　2014—2024 年兰西城市群 IRSEI 时空分异

Fig. 3　Spatiotemporal differentiation of IRSEI in Lanzhou-Xining urban agglomeration (2014—2024)

各阶段生态质量的演变规律，可通过生态等级面积占比与IRSEI均值的动态变化得到清晰量化，如图4所示。上述演变规律可通过生态等级面积占比与IRSEI均值的动态变化得到清晰量化：2014—2018年为改善期，“优、良”等级面积占比从47%提升至58%，“差、较差”等级占比从35%降至26%，IRSEI均值从0.50升至0.52；2018—2020年进入稳定期，各等级面积占比波动小于2%，IRSEI均值稳定在0.52左右；2020—2022年生态质量下滑，“优、良”等级占比回落至46%，“差、较差”等级占比回升至39%，IRSEI均值降至0.47；2022—2024年开启复苏进程，“优、良”等级占比回升至50%，IRSEI均值恢复至0.48，但各指标均未回归2018—2020年的最优水平，体现出生态恢复的滞后性。

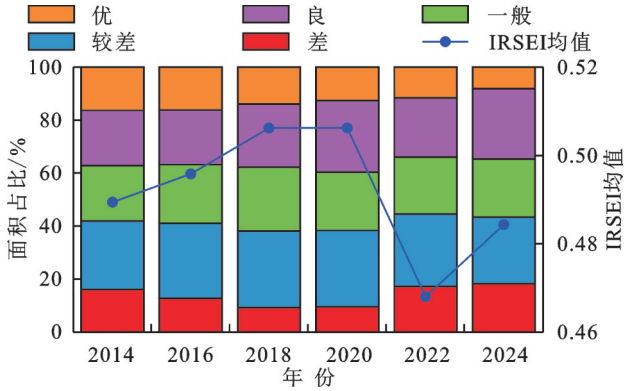


图 4　2014—2024 年兰西城市群各类生态面积占比及 IRSEI 均值变化

Fig. 4　Proportions of various ecological areas and changes in mean value of IRSEI in Lanzhou-Xining urban agglomeration (2014—2024)

2.2.2　兰西城市群各州市　为明确兰西城市群各州市尺度的生态质量分异特征，通过分尺度处理获取各州市的IRSEI及等级占比：先以各州市行政边界对6项生态指标的原始值进行裁剪，得到分州市的指标数据集，再进行归一化与主成分分析等操作得到各州市的最终IRSEI，并按照相同的分类标准将其划分为5个生态等级，最后计算各类生态等级的面积占比，结果如图5所示。

兰西城市群各州市IRSEI呈现“层级差异显著、等级结构与自然-人类活动特征深度绑定”的核心特征。其中，海北州、黄南州、西宁市构成高生态质量层级，其IRSEI均值常年维持在0.64以上（黄南州峰值近0.70），“优”“良”等级面积占比合计超60%，这一优势源于该区域以高原草甸、河谷湿地等稳定自然生态系统为主，人类活动强度相对较低，生态本底的抗干扰能力较强。定西市、海东市、海南州属于中生态质量层级，IRSEI均值大多介于0.45～0.60，“一般”与“良”等级占比多维持在40%～50%。这是因为该区域地处丘陵与河谷过渡带，农业开发强度中等，植被覆盖度与湿度指标处于区域中间水平，自然本底与人类活动的交互作用，使生态质量呈现“一般”主导的特征。而白银市、兰州市、临夏州则处于低生态质量层级，IRSEI均值多低于0.45，白银市“较差”等级占比常年超60%，兰州市、临夏州“较差”“差”等级合计占比常达40%以上，这与该区域城镇密集、工业与农业开发强度高密切相关：兰州市作为区域核心城市，城镇扩张对植被的挤占明显；白银市矿业开发历史较长，区域干度、荒漠化指标偏高，自然生态本底的承载能力较弱。

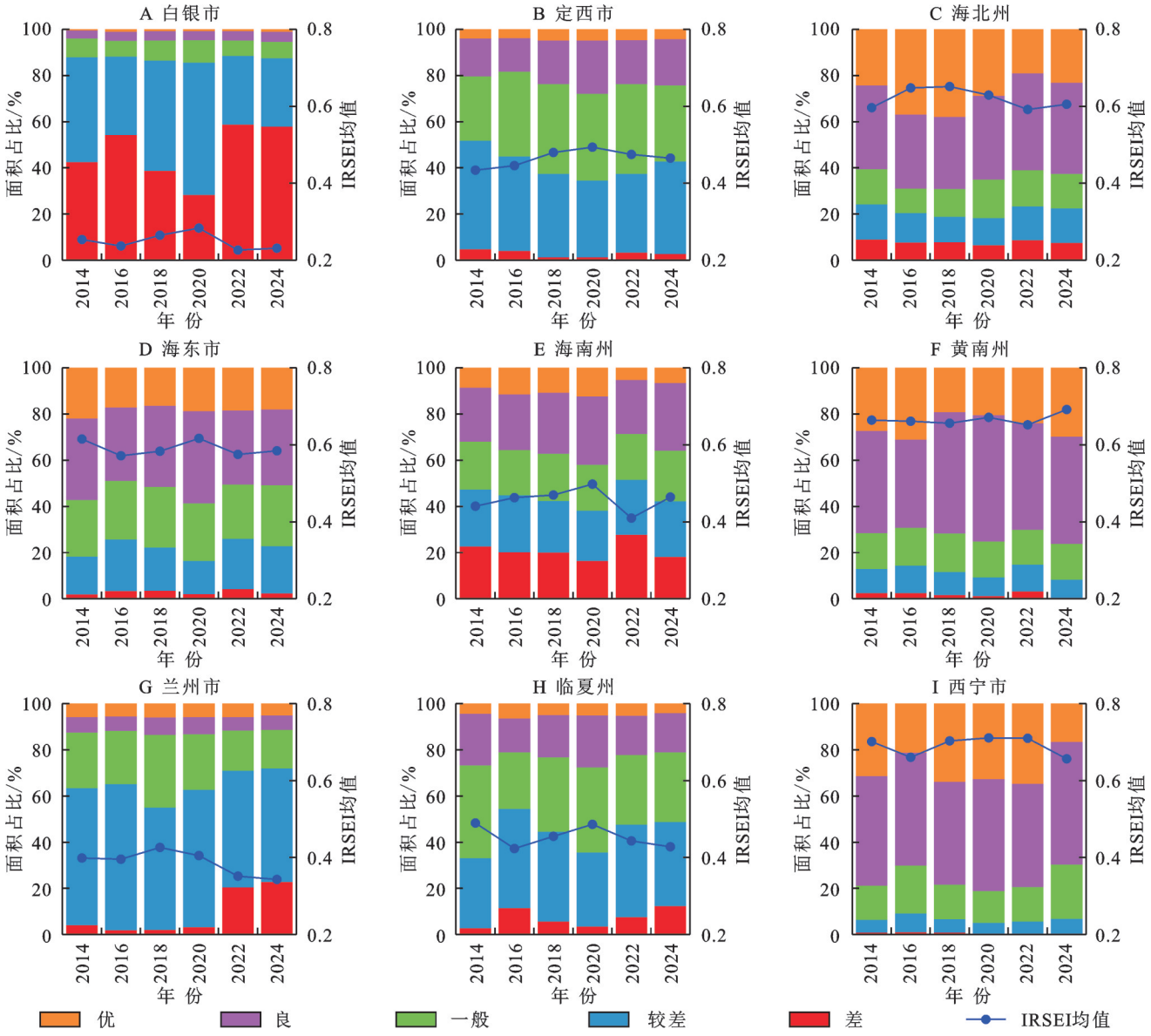


图 5 2014—2024 年各州市各类生态面积占比及 IRSEI 均值变化

Fig. 5 Proportions of various ecological areas and changes in mean value of IRSEI by prefecture/city in Lanzhou-Xining urban agglomeration (2014—2024)

2.3 兰西城市群 IRSEI 空间演化趋势

2.3.1 IRSEI 空间转移矩阵 空间转移矩阵可定量表征不同时期各等级 IRSEI 的面积转移规模与方向，结合弦图可视化结果（图 6）可凸显转移过程的空间分异特征。从 2014—2016 年、2016—2018 年、2018—2020 年、2020—2022 年、2022—2024 年 5 个相邻时段来看，IRSEI 等级转移呈现明显的阶段分异：2014—2016 年以低等级优化、高等级微退为主，差等级大幅缩减并主要向较差等级转移，良、优等级小幅下降；2016—2018 年转为中等级提升、高低等级双降，良等级增幅达 15.6%，差等级持续缩减、优等级降幅扩大；2018—2020 年中高等级持续优化、低等级止跌回升，良等级延续增长，差等级结束缩减态势并小幅回升；2020—2022 年出现低等级反弹、中高等级退化的逆转，差等级激增 77.9%，良等级大幅缩减 16.7%；2022—2024 年回归中等级主导优化，良等级大幅增长，优等级降幅进一步扩大至 28.8%。

从 2014—2024 年长时段累积演化来看，等级面积整体呈现“良升优降、差增较差减”格局：良等级面积增幅最大，共增加 5 841.79 km^2，是生态质量优化的核心载体；优等级面积降幅显著，共减少 8 436.56 km^2，为主要退化等级；差等级面积增长 14.5%，较差等级则小幅减少 3.1%。转移方向上，高等级退化（优等级中 50.8% 转移至良等级）、中等级稳定（一般与良等级自我保留率超 50%，相互转移显著）、低等级缓慢扩张（差等级保留率达 66.3%）的规律凸显，反映出区域生态系统“中等质量固化、高等级退化风险突出、低等级扩张压力显现”的特征。

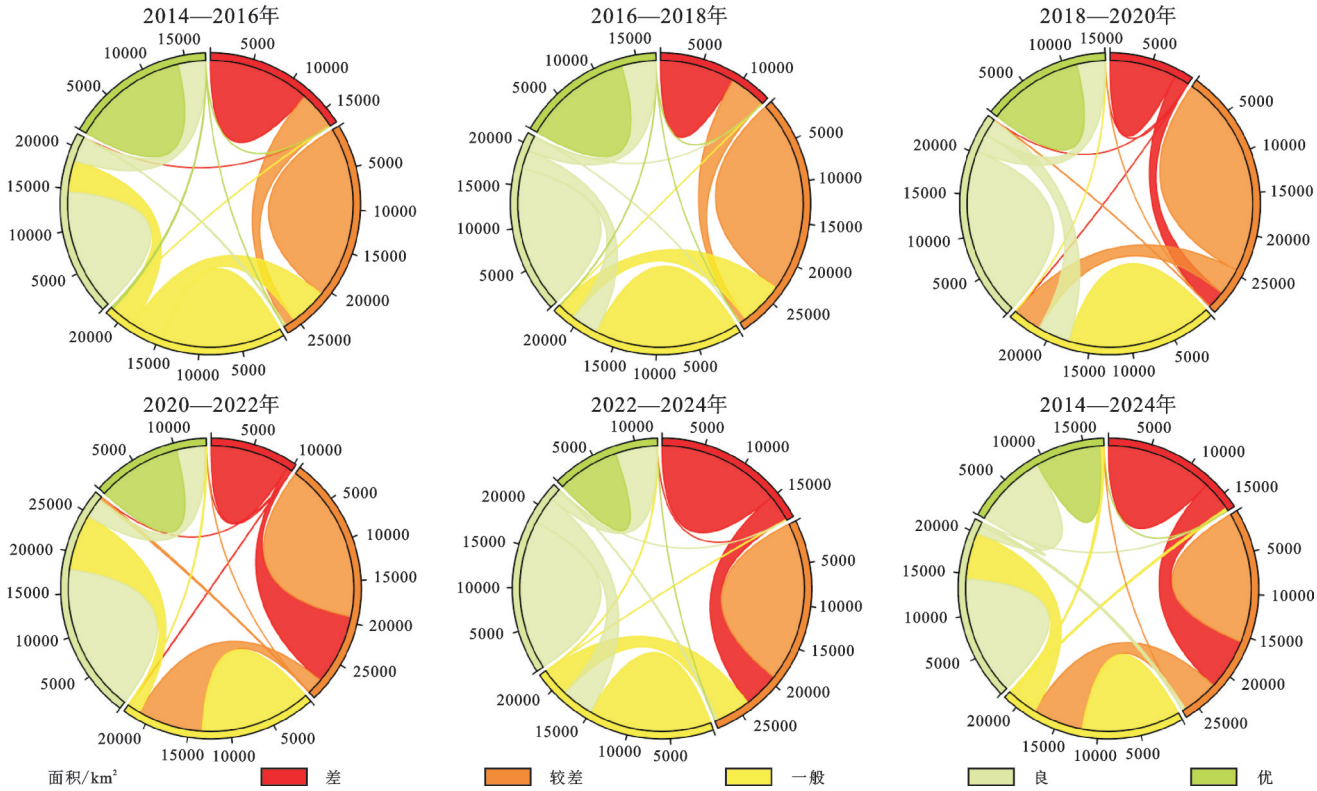


图 6　2014—2024 年兰西城市群 IRSEI 类别转移矩阵图

Fig. 6　IRSEI category transition matrix of Lanzhou-Xining urban agglomeration (2014—2024)

综上,兰西城市群 IRSEI 空间转移兼具时段波动性与长时段累积性,良等级动态主导区域生态演化趋势,而优等级持续退化与差等级后期扩张的特征,提示需针对性地加强高生态质量区域的保护与低生态质量区域的修复。

2.3.2　IRSEI 趋势分析　2014—2024 年兰西城市群改进遥感生态指数(IRSEI)的时空演变趋势通过 Sen+Mann-Kendall 趋势分析得出(图 7),研究期内区域 IRSEI 变化以不显著下降为主导,不同趋势类型面积占比差异显著,其中不显著下降区域占 61.13%,显著下降区域占 6.65%,不显著上升区域占 30.9%,显著上升区域占 1.18%,无明显趋势区域仅占 0.14%,空间上总体呈现中西部以下降为主、东部西南部以上升为主的特征,且各趋势类型的空间分布具有明显差异性,不显著下降区域(占比超六成)集中于中西部高寒草原与山地灌丛带,显著下降区域多分布于河谷放牧密集区与小型开发区周边,不显著上升区域集中于东部城镇与农业区,显著上升区域则多为退化草地治理示范区。

2.4　生态敏感性评价

基于 AHP 加权叠加法的兰西城市群生态敏感性空间评价结果(图 8)显示,区域生态敏感性呈现西部高、东部低、南部强、北部弱的显著空间分异特征,从低到高各敏感等级面积占比依次为 4.85%,29.57%,32.53%,22.67% 和 10.38%。

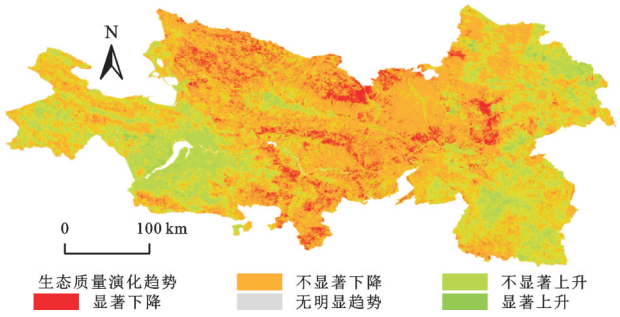


图 7　2014—2024 年 IRSEI 空间演化趋势

Fig. 7　Spatial evolution trend of IRSEI (2014—2024)

具体来看,低敏感、较低敏感区集中于城市群东部,中部与西北部则以高敏感、较高敏感区为主,这一格局与区域地理环境、生态系统类型及人类活动强度高度契合——中西部、南部受高寒/半干旱气候、高地形起伏及高植被覆盖度的自然本底约束,生态系统抗干扰阈值低,而东部地区作为城镇与农业集中区,自然生态系统经人工改造后抗干扰适应性显著增强。占比 10.38% 的高敏感区集中于西部青海湖周边山地、南部祁连山东段,该区域高海拔低温、冻融频繁,原生高寒植被自我修复能力极弱,且作为黄河上游及青海湖流域水源涵养核心区,生态扰动的影响具有传导性,进一步提升了敏感性;占比 22.67% 的较高敏感区为高敏感区与中敏感农耕区的衔接带,地处高海拔山地向河谷过渡段,微地形起伏与季节性冻融削弱土壤稳定性,山地草原、灌丛生态系统韧性不足,叠加长

期适度放牧扰动，进一步弱化系统自我恢复力；占比最高（32.53%）的中敏感区处于半干旱气候带，水热匹配度适中，原生植被处于稳定-脆弱临界状态，长期农耕活动替代原生植被，扰动局部水文土壤环境，使系统丧失天然韧性且未形成人工生态系统的强适应性；低敏感区与较低敏感区合计占比34.4%，核心源于东部兰州主城区及河谷平原的高强度人工改造，城镇建成区、集约化农田等人工生态系统对人类活动干扰具有天然适应性，这种适应性以牺牲原生生态功能为代价，形成人工主导、功能单一的低敏感特征。

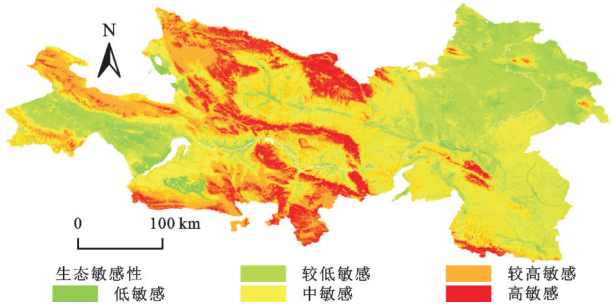


图8 兰西城市群生态敏感性空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of ecological sensitivity in Lanzhou-Xining urban agglomeration

3 讨 论

本研究以改进遥感生态指数（IRSEI）为基础，系统分析了2014—2024年兰西城市群生态环境质量的时空分异、演变趋势、生态敏感性特征及等级转移规律。从总体生态环境质量格局来看，研究区呈现“西优东差”的稳定空间格局，这与刘程辉等[16]基于传统RSEI、石晶等[17]基于SPCA模型得出的“中西部生态质量优于东部”结论一致，共同印证了自然地理本底对区域生态格局的基础性塑造作用，但现有研究多未深入解析该格局的内在驱动逻辑，本研究结合区域特征发现，其核心是自然本底与人为扰动长期协同作用的结果：西部地处祁连山东段、青海湖周边，以高寒草原和湿地为主，水热条件优越，土壤保肥保水能力较好，植被覆盖度高，且人口密度低、以低强度放牧为主，对生态基底扰动小；东部为湟水谷地、黄河谷地等城镇农业集中区，气候干旱缺水，土壤以灰钙土、盐渍土为主，自然本底脆弱，叠加城镇扩张、农业开垦等高强度人为扰动，进一步加剧生态退化，形成东西部质量梯度。从时序演变来看，现有研究多聚焦2020年前时段，如吕勇[14]基于传统RSEI评价结果认为2010—2020年兰西城市群生态环境质量整体上升，而本研究将时间延伸至2024年，发现2020—2022年生态质量出现阶段性下滑，差等级面积激增77.9%，这一差异不仅源于时间序列延伸和新增扰动，更因IRSEI对高寒生态系统轻微退化的捕捉更灵敏，其核心诱因是气候与人为扰动的协同作用：2020—2022年研究区遭遇区域性干旱，年降水量较前期均值减少18%以上，气温小幅升高，直接导致植被覆盖度下降、湿地萎缩；疫情期间生态管控阶段性放松，中西部共和盆地出现零星矿产勘探，河谷放牧强度较前期增加25%以上，双重胁迫引发生态质量骤降，这一驱动机理尚未被现有研究明确揭示；生态敏感性表现为“西高东低、南强北弱”，高敏感区集中于西部青海湖周边及南部祁连山东段，这一结论与雒占福等[15]的结果相吻合，此外，张韦萍等[18]指出的东部城镇密集区人类活动强度高，与本研究观察到的东部低敏感、中西部高敏感形成空间匹配，这一特征阐明区域生态格局由自然本底脆弱性与人类活动强度共同塑造，且两者存在明显空间错位与权衡关系——中西部本底脆弱、敏感性高，轻微扰动即可能退化；东部敏感性低，但高强度扰动抵消了本底优势。

此外，本研究IRSEI新增的DMI与NDSI指标，经空间匹配验证表现良好：DMI高值区与已知荒漠化敏感区重叠率达78.3%，与风蚀模数高值区呈显著正相关，可精准捕捉地表沙化过程；NDSI高值区与实地调查盐渍化区域重叠率达81.5%，集中于黄河谷地、湟水谷地等灌溉农业区，与地下水位埋深低的区域高度契合，充分验证了新增指标的适配性，弥补了传统RSEI在复合生态区的表征不足；在分析视角方面，现有研究多单独开展生态质量评价或生态敏感性分析，而本研究通过“质量现状—趋势演变—敏感性—等级转移”的整合框架，发现高敏感区与IRSEI显著下降区的空间重叠率达83.7%，这一耦合特征在现有研究中尚未被系统揭示，它不仅印证了“本底脆弱性会放大人类活动或气候波动的负面影响”这一生态学规律，也为理解区域生态退化风险提供了新的认知维度。

与现有研究相比，本研究的价值在于构建了适配兰西城市群复合生态特征的评价指标体系，且通过长时序数据分析捕捉了近期生态环境的动态变化，为区域生态保护与管控提供了精细化支撑。但研究也存在客观局限：未结合面板数据与气象数据构建量化模型，难以精准区分自然与人为因素对生态质量变化的相对重要性；采用90 m分辨率数据对小尺度生态修复区的质量变化捕捉不够精准，可能低估局部修复成效。未来研究可引入地理探测器模型量化各类驱动因素的影响强度，结合高分辨率数据与无人机实地监测数据细化小尺度区域生态演变规律，运用结构方程模型解析指标交互路径，同时结合CMIP6气候情景数据模拟未来演变趋势，为兰西城市群生态保护与高质量发展提供更全面的科学依据。

4 结 论

(1)兰西城市群生态质量呈“西优东差”稳定格局,受自然与人为因素双重驱动。研究证实,区域生态环境质量空间分异显著且格局长期稳定,形成“西优东差”的鲜明梯度:西北部自然生态基底完好、人为干扰轻微,“优”“良”等级生态区域累计占比最高达58%,构成区域生态安全核心屏障;东部河谷平原作为城镇集聚与农业生产核心区,受人类活动集中扰动,生态质量以“一般、较差、差”等级为主。这一格局的形成,是自然地理本底的先天差异与人类活动强度的后天分异共同作用的结果,其精准识别为区域划定生态保育与生态修复的空间边界、制定差异化生态管控策略奠定了核心基础。

(2)生态质量呈阶段性演化特征,长期保护与韧性建设至关重要。2014—2024年兰西城市群IRSEI均值从0.50波动回落至0.48,经历“逐步改善—相对稳定—阶段性下滑—缓慢复苏”的完整演化过程,2018—2020年为研究期生态质量最优阶段,2020年后受外部扰动出现短期下滑,2022年后逐步复苏但未恢复至峰值。从变化趋势看,61.13%的区域呈不显著下降,仅1.18%的区域显著上升,且空间上形成“中西部以下降为主要态势、东部呈上升趋势”的差异化特征。这一结果揭示了生态系统对外部扰动的滞后响应规律,印证了区域生态保护与修复工作的长期性和复杂性,为推进跨周期生态保护规划、强化生态系统韧性建设提供了实践参考。

(3)生态等级转移特征鲜明,与生态敏感性呈强耦合关系。研究期内区域生态等级转移呈现“良升优降、差增较差减”的显著特征,其中良等级生态区域面积增幅最大,成为生态质量优化的核心载体;中敏感区以32.53%的面积占比,成为生态等级转化的关键枢纽。高敏感区与较高敏感区累计占比达33.05%,且与IRSEI显著下降区的空间重叠率高达83.7%,凸显“高敏感区域即生态退化高风险区域”的核心规律。这一耦合特征明确了生态质量演变的敏感性约束机制,精准锁定了生态退化关键区域,为优化生态保护资源配置、优先部署生态修复工程、推进黄河上游生态安全屏障精准化建设提供了定量化支撑。

参考文献(References):

[1] 赵晓冏,张兴林,张钰浩.深入推进黄河流域城市群绿色发展的对策建议:以兰西城市群为例[J].环境保护,2022,50(24):56-60.
Zhao X J, Zhang X L, Zhang Y H. Countermeasures and suggestions for deepening the green development of urban agglomerations in the Yellow River Basin: taking the Lanzhou-Xining Urban Agglomeration as an example [J]. Environmental Protection, 2022,50(24):56-60.

[2] 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.
Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.

[3] Yagmur Aydin N, Bektas Balcik F. Assessing long-term eco-environmental quality dynamics in Akarçay River Basin (1985—2020) using Remote Sensing Ecological Index(RSEI)[J]. Environmental Earth Sciences, 2025, 84(24):703.

[4] Han C T, Li P X, Xie H A, et al. Assessment of ecological quality dynamics and driving factors in the ningdong mining area, China, using the coupled remote sensing ecological index and ecological grade index[J]. Sustainability, 2025,17(20):9075.

[5] 李妍,张国钦,吝涛,等.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究:以天津市蓟州区为例[J].生态学报,2022,42(2):474-486.
Li Y, Zhang G Q, Lin T, et al. The spatiotemporal changes of remote sensing ecological index in towns and the influencingfactors: a case study of Jizhou District, Tianjin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):474-486.

[6] 张伟,杜培军,郭山川,等.改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J].遥感学报,2023,27(2):299-317.
Zhang W, Du P J, Guo S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index andecological environment evaluation in arid area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023 27(2):299-317.

[7] 王杰,马佳丽,解斐斐,等.干旱地区遥感生态指数的改进:以乌兰布和沙漠为例[J].应用生态学报,2020,31(11):3795-3804.
Wang J, Ma J L, Xie F F, et al. Improvement of remote sensing ecological index in arid areas: a case study of Ulan Buh Desert[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(11):3795-3804.

[8] Zhu D Y, Chen T, Zhen N, et al. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window: based remote sensing ecological index [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(13):15716-15728.

[9] 赵恒谦,贾梁,尹政然,等.基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):38-43,2.
Zhao H Q, Zhang L, Yin Z R, et al. Monitoring of land use/cover and ecological environment changes in Tongzhou District, Beijing based on multi-source remote sensing data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019,35(1):38-43,2.

[10] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型

遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.
Zhang J, Yang L P, Gong E J, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Xi'an based on Google Earth Engine and improved remote sensing ecological index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5):2114-2127.

[11] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020,12(15):2462.

[12] 张华,宋金岳,李明,等.基于GEE的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J].生态学杂志,2021,40(6):1883-1894.
Zhang H, Song J Y, Li M, et al. Ecological environment quality evaluation and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(6):1883-1894.

[13] 梁胭月,曹春,李锦超,等.近20年兰西城市群生态系统服务价值对土地利用转型的时空响应[J].环境科学,2024,45(6):3329-3340.
Liang B Y, Cao C, Li J C, et al. Spatiotemporal response of ecosystem service value to land use transition in Lanzhou-Xining urban agglomeration in the past 20 years[J]. Environmental Science, 2024, 45(6):3329-3340.

[14] 吕勇.兰西城市群土地利用/覆被变化及其对生态环境质量的影响[D].兰州:西北师范大学,2025.
Lü Y. Land use/cover change and its impact on ecological environment quality in Lanzhou-Xining urban agglomeration[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2025.

[15] 雒占福,李兰,高旭,等.基于生态城市理念的兰州-西宁城市群高质量发展与生态环境耦合协调研究[J].水土保持研究,2021,28(2):276-284.
Luo Z F, Li L, Gao X, et al. Coupling coordination research between high-quality development and ecological environment of Lanzhou-Xining urban agglomeration based on ecological city concept[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):276-284.

[16] 刘程辉,刘向南.基于RSEI模型的兰西城市群生态环境质量的时空格局及动态分析[J].青海师范大学学报:自然科学版,2022,38(2):21-30.
Liu C H, Liu X N. Spatiotemporal pattern and dynamic analysis of ecological environment quality in Lanzhou-Xining urban agglomeration based on RSEI model[J]. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition, 2022,38(2):21-30.

[17] 石晶,石培基,王梓洋,等.人为干扰对生态脆弱性动态演变过程的影响:以兰西城市群为例[J].中国环境科学,2023,43(3):1317-1327.
Shi J, Shi P J, Wang Z Y, et al. Impact of human disturbance on the dynamic evolution process of ecological vulnerability: a case study of Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2023, 43(3):1317-1327.

[18] 张韦萍,石培基,赵武生,等.西北区域城镇化与资源环境承载力协调发展的时空特征:以兰西城市群为例[J].生态学杂志,2020,39(7):2337-2347.
Zhang W P, Shi P J, Zhao W S, et al. Spatiotemporal characteristics of coordinated development between urbanization and resource-environment carrying capacity in Northwest China: a case study of Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(7):2337-2347.

[19] 刘星宇,张美玲,马子茗.甘肃省1981—2020年植被覆盖度时空变化特征及气候因子分析[J].环境科学,2025,46(12):7831-7840.
Liu X Y, Zhang M L, Ma Z M. Spatiotemporal variation characteristics of vegetation coverage and climate factors in Gansu Province from 1981 to 2020[J]. Environmental Science, 2025,46(12):7831-7840.

[20] Guo Y, Wang X W, Cao H Y, et al. Anthropogenic activities dominate vegetation improvement in arid areas of China[J]. Remote Sensing, 2025,17(15):2634.

[21] Avdan U, Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using Landsat 8 satellite data[J]. Journal of Sensors, 2016,2016:1480307.

[22] 吴霞,王长军,樊丽琴,等.基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析[J].国土资源遥感,2021,33(2):124-133.
Wu X, Wang C J, Fan L Q, et al. Applicability analysis of salinization evaluation indexes based on multispectral remote sensing for soil salinity prediction in Yinbei Irrigation District, Ningxia[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021,33(2):124-133.

[23] Ali Baig M H, Zhang L F, Tong S, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):423-431.

[24] Li N, Wang J Y, Qin F. The improvement of ecological environment index model RSEI[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13(11):403.

[25] 李晓明,孙从建,孙九林,等.基于遥感信息的黄土高原主要灌溉农业分布区生态安全特征[J].应用生态学报,2021,32(9):3177-3184.
Li X M, Sun C J, Sun J L, et al. Ecological security characteristics of major irrigated agricultural distribution areas on the Loess Plateau based on remote sensing information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(9):3177-3184.

(下转第383页)