朱兴林，司建华，王军德，等. 基于地理探测器的洮河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析[J]. 水利水电技术(中英文)，2025，56(1)：74-84. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.007
ZHU Xinglin，SI Jianhua，WANG Junde，et al. Analysis of spatial and temporal evolution of ecological environment quality and driving force in Taohe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2025，56(1)：74-84. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.007

基于地理探测器的洮河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析

朱兴林[1,2,3]，司建华[1,2]，王军德[4]，雒天峰[5]，程玉菲[4]，周冬蒙[1,2,3]，杨　杨[6]，伊丽娜[6]

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州　730000；2. 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室，甘肃 兰州　730000；3. 中国科学院大学，北京　100190；4. 甘肃省水利科学研究院，甘肃 兰州　730000；5. 甘肃省水利厅 水利工程建设造价与规费管理中心，甘肃 兰州　730000；6. 阿拉善盟生态产业发展规划中心，内蒙古 阿拉善盟　750300)

摘　要：【目的】准确分析流域生态环境质量的时空演变及其驱动因素，可为流域的综合治理和高质量发展提供科学依据。【方法】以洮河流域为例，通过耦合绿度、湿度、热度和干度指数构建了流域生态环境质量评价的遥感生态指数(*RSEI*)，并对1990—2020年洮河流域生态环境质量时空演变特征进行了分析。引入地理探测器和结构方程模型探索了流域生态环境质量对自然和人为因素直接和间接影响的响应。【结果】结果表明，研究区*RSEI*均值呈先降低后上升趋势；流域内生态环境质量等级由大面积的差和较差转化为大面积的中等和良好。气候和地形对*RSEI*分布有正向影响，城市化对*RSEI*分布有负向影响，土地利用类型对*RSEI*为先负向后正向。气候的正向影响逐渐减弱，城镇化的负向影响逐渐增强。【结论】洮河流域生态环境质量总体呈现逐渐改善的趋势，其空间格局的变化及相应的驱动因素分析结果可为流域综合治理提供相应的科学依据和实践指导。

关键词：生态环境质量；遥感生态指数；地理探测器；结构方程模型；洮河流域；影响因素；气候变化；人类活动

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.007　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)**：

中图分类号：X821　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0860(2025)01-0074-11

听语音 聊科研 与作者互动

Analysis of spatial and temporal evolution of ecological environment quality and driving force in Taohe River Basin

ZHU Xinglin[1,2,3], SI Jianhua[1,2], WANG Junde[4], LUO Tianfeng[5], CHENG Yufei[4], ZHOU Dongmeng[1,2,3], YANG Yang[6], YI Lina[6]

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou　730000, Gansu, China;

收稿日期：2024-08-08；**修回日期**：2024-10-29；**录用日期**：2024-10-31；**网络出版日期**：2024-11-01

基金项目：国家自然科学基金项目(52379029)；甘肃省重点研发计划(23YFFA0020)；甘肃省重点研发计划(23YFFA0018)；讨赖河流域径流变化预估及其对社会经济的影响研究(24GSLK063)

作者简介：朱兴林(1998—)，男，博士，主要从事干旱区生态水文的研究。E-mail：zxinglin@yeah.net

通信作者：司建华(1979—)，男，研究员，博士，主要从事干旱区生态水文的研究。E-mail：jianhuas@lzb.ac.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands Chinese, Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Gansu Academy for Water Conservancy, Lanzhou 730000, Gansu, China; 5. Water Conservancy Project Construction Cost and Fee Management Center, Gansu Provincial Water Conservancy Department, Lanzhou 730000, Gansu, China; 6. Alxa League Ecological Industry Development Planning Center, Alxa League 750300, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] The accurate analysis of the spatiotemporal evolution of watershed ecological environmental quality and its driving factors can provide scientific support for the comprehensive management and high-quality development of the watershed. [Methods] Using the Tao River Basin as an example, a Remote Sensing Ecological Index (*RSEI*) was constructed by coupling indices of greenness, humidity, temperature, and dryness to evaluate the ecological environmental quality of the basin. The spatiotemporal evolution characteristics of the ecological environmental quality in the Tao River Basin from 1990 to 2020 were then analyzed. On this basis, geographic detectors and structural equation models were introduced to explore the direct and indirect responses of the basin's ecological environmental quality to natural and human factors. [Results] The results show that the average *RSEI* in the study area first decreased and then increased over time. The ecological environmental quality levels in the watershed transitioned from large areas of poor and very poor to large areas of medium and good. Climate and terrain have a positive influence on the distribution of *RSEI*, while urbanization has a negative influence. The impact of land use types on *RSEI* first showed a negative and then positive relationship. The positive impact of climate gradually weakened, while the negative impact of urbanization gradually intensified. [Conclusion] The ecological environmental quality of the Tao River Basin has generally improved over time. The analysis of spatial pattern changes and driving factors can provide scientific support and practical guidance for comprehensive watershed management.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; geodetector; structural equation modeling; Taohe River Basin; influencing factors; climate change; human acticities

0 引 言

流域生态环境质量是流域内的各类要素、各层结构和各种功能在时空尺度上的系统表征，是人类社会生存与发展的基础[1]。近年来，社会经济的快速发展、人口的急剧增加，再加上人为干预、破坏和无序的开发自然资源，使得流域生态环境发生了深刻变化[2-3]。实现生态保护和社会经济的高质量协同发展是流域管理的长远目标[4-5]。了解和评价生态环境状况是进行流域综合治理的基础[6]。通过探究流域生态环境质量的空间变化和驱动因素，不仅能够揭示生态环境质量演变规律，还可为未来流域生态环境治理和保护制定有利方针。

针对生态环境质量的监测和评价，国内外学者开展了大量的探索，其评价方法大致可归纳为 3 类。第一类为单一遥感指数法，诸如净初级生产力[7]、归一化植被指数[8]、归一化差异指数[9]等是目前单一遥感指数中较为常用的生态环境质量评价指数。然而，流域生态系统是环境和人为因子耦合的复杂综合体，仅通过单一指数并不能客观、准确地反映生态环境质量的变化。第二类为多元指标评价法，综合多种遥感和社会经济数据，采用压力-状态-响应法[2]、层次分析法[10]、多级模糊评价法[11]等，以多元指标体系评价生态环境质量。这类评价方法虽然采用了较多的数据和指标，但其评价过程很容易受到学者、专家的主观感受的影响，进而影响评价结果的准确性。第三类则为基于遥感的综合生态指数，目前应用最为广泛的当属徐涵秋[12]提出的遥感生态指数(*RSEI*)，其耦合了湿度、热度、干度和绿度四大生态指数，通过主成分分析法确定以上各要素对生态环境质量的影响程度。*RSEI* 弥补了传统方法在评价过程中指标选择单一和主观性较强等方面的不足，在城市[13]、山地[14]、草原[15]、流域[16]等区域评价中得到了大量的应用。

流域生态环境质量变化背后的驱动力分析是科学合理地进行生态保护的重要前提。现有的诸多研究中，主要侧重于如何准确评价生态环境质量，而对其驱动力的定量分析相对较少。当前，气候变化和人为活动均深刻影响着生态环境质量，相关研究也采用相关分析法[17]、多元回归分析法[18]、分位数回归模型[19]等系列方法进行了探究。但以上方法归根到底并不能对影响生态环境质量变化的关键驱动因素进行识别和量化，从而难以提出有针对性的治理决策。基

于此，本研究采用地理探测器模型和结构模型方程进行驱动力分析。地理探测器是用于探测变量空间异质性并揭示关键驱动力的统计学方法[20]。该模型中的因子探测器和交互作用探测器能够具体地识别和量化关键驱动力的影响程度。结构方程模型是建立、估计和检验因果关系模型的方法，可用于分析影响因素与生态环境质量之间的线性或非线性关系，并通过路径系数提供因子间关系的强度，有利于全面了解生态环境质量与影响因素之间的直接和间接关系。

洮河流域是黄河上游重要的水源涵养区，具有生物多样性维护、水土保持和水源涵养等多种重要的生态功能。近年来，由于人类活动的过度影响，导致流域内大面积的出现植被退化、水土流失、湿地萎缩等诸多生态问题[21]。当前，关于洮河流域的研究多在探讨土地利用类型的改变、水文气象的变化和流域水资源的利用等，而对时空尺度上生态环境质量演变的宏观格局认识不足，这给洮河流域的生态保护和高质量发展带来了一定的阻碍。因此，有必要充分地揭示洮河流域近年来的生态环境质量演变特征和驱动机制。综上，本研究采用 *RSEI* 试图全面评价 2000—2020 年洮河流域生态环境质量的变化特征，并通过地理探测器识别不同驱动因子对生态环境质量变化的贡献量，从而揭示其背后的驱动机制。通过以上研究结果，以期为洮河流域的生态环境保护和可持续发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

洮河流域系黄河上游第二大支流，流域地跨两个地貌单元，即陇西黄土高原和甘南高原(见图 1)。甘南高原位于青藏高原东北边，海拔 3 500~4 000 m，甘南高原除流域上游的森林覆盖外，平坦地区主要为草地和山坡草场。陇西高原位于黄土高原西部，海拔在 1700~2 400 m，该区域则是地形破碎、丘陵起伏，植被盖度稀疏，水土流失严重，是洮河泥沙的主要来源。洮河流域虽属于大陆性气候，但因受到内蒙古高原和青藏高原气候交错的影响，大部分区域降水充沛，气候湿润。洮河流域生态系统类型较为全面，是黄河上游地区非常重要的水源涵养区。然而，近年来人类活动的加强和城镇化的迅速发展，强烈地改变了土地利用类型，导致流域生态功能部分破坏，降低了流域生态环境质量[22]。

1.2　数据来源及处理

Landsat 系列数据通过地理空间数据云下载，数据类型为 Landsat4-5 TM 和 Landsat8 OLI，空间分辨率为 30 m，时间分辨率为 16 d。考虑到遥感影像容易受到流域内气象条件的影像，故选择 5—9 月，云量小于 20%，质量较高的 Landsat 遥感影像进行研究。DEM 数据、坡度、坡向数据来源于美国国家航空航天局(NASA)，空间分辨率为 30 m。温度、降水数据均收集自国家地球系统科学数据中心，空间分辨率为 1 km。干旱指数来源于国家生态系统数据库，空间分辨率为 1 km。人口密度和 GDP 数据来源于资源环境科学与数据平台，空间分辨率为 1 km。陆表人为热排放通量来源于 2000—2020 年各市县的社会经济数据。土地利用数据来源于武汉大学目视解译的 CLCD 产品数据集，空间分辨率为 30 m。

利用 ENVI 5.3 软件进行遥感影像的辐射校正、裁剪和波段计算等预处理工作。利用 ARCGIS 10.2 软件进行数据的重采样，其中土地利用数据采用最邻

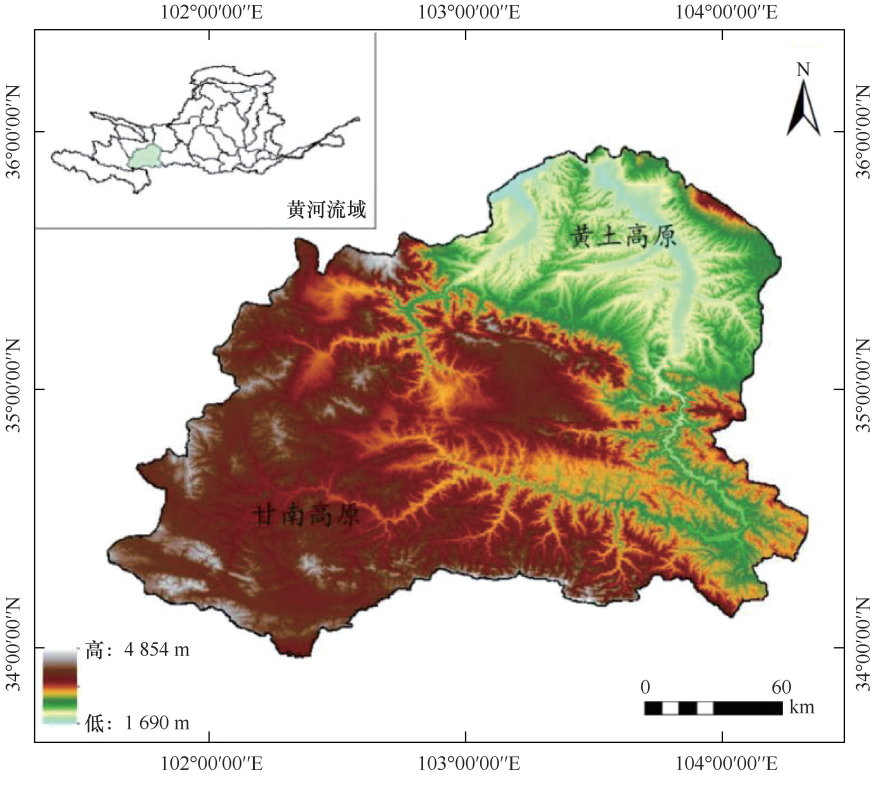


图 1　洮河流域基本概况

Fig. 1　General overview of the Taohe River Basin

近分配法，其余采用二次卷积方法，将上述数据重采样至 1 km。本次选择 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时期的数据进行洮河流域生态环境质量的演变特征和驱动机制研究。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数

遥感生态指数(*RSEI*)是在遥感波段提取的基础上，通过主成分分析建立的能综合反映生态环境质量特征的综合生态指数[23]。选择湿度(*WET*)、热度(*LST*)、干度(*NDBSI*)和绿度(*NDVI*)4 个指标进行 *RSEI* 的构建，计算式为

$$RSEI = f(NDVI,\ WET,\ NDBSI,\ LST) \tag{1}$$

其中，绿度指标(*NDVI*)用来反映区域植被盖度的变化情况，是表征流域生态环境质量的重要参照，计算式为

$$NDVI = \frac{\rho_{\mathrm{nir}} - \rho_{\mathrm{red}}}{\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{red}}} \tag{2}$$

式中，ρ_{red} 为 Landsat 数据中的红波段；ρ_{nir} 为 Landsat 数据中的近红波段。

湿度指标(*WET*)通过缨帽转换后的值能更好地反映地表植被和土壤的湿度特征，缨帽变换是以植被、土壤等在多光谱中的空间信息分布结构为基础，对图像进行的一种经验性的线性正变交换。其计算式为

$$WET = 0.151\,1\rho_{\mathrm{blue}} + 0.197\,2\rho_{\mathrm{green}} + 0.328\,3\rho_{\mathrm{red}} + 0.340\,7\rho_{\mathrm{nir}} + 0.711\,7\rho_{\mathrm{swir1}} + 0.455\,9\rho_{\mathrm{swir2}} \tag{3}$$

式中，ρ_{blue} 为 Landsat 数据中的蓝波段；ρ_{green} 为 Landsat 数据中的绿波段；ρ_{swir1} 为 Landsat 数据中的短波红外 1；ρ_{swir2} 为 Landsat 数据中短波红外 2。

干度指标(*NDBSI*)用于表征地表建筑(*IBI*)与裸土(*SI*)的特征，二者的大面积分布会造成地面“干化”，导致生态质量下降，计算式为

$$SI = \frac{(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{red}}) - (\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{blue}})}{(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{red}}) + (\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{blue}})} \tag{4}$$

$$IBI = \frac{2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{nir}}) - [\rho_{\mathrm{nir}}(\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{red}}) + \rho_{\mathrm{green}}(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{green}})]}{2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{nir}}) + [\rho_{\mathrm{nir}}(\rho_{\mathrm{nir}} + \rho_{\mathrm{red}}) + \rho_{\mathrm{green}}(\rho_{\mathrm{swir1}} + \rho_{\mathrm{green}})]} \tag{5}$$

$$NDBSI = \frac{SI + IBI}{2} \tag{6}$$

热度指标(*LST*)反映地表温度，本研究通过辐射传输反演地表温度，将 Landsat 热红外波段结合地表比辐射率及大气参数得到地表亮温，再通过普朗克函数得到热度指标。其计算式为

$$B(T_s) = [L_u - L_\lambda - L_d \times \tau^*(1 - \varepsilon)/\tau \times \varepsilon] \tag{7}$$

$$T_s = K_2/\ln[K_1/B(T_s) + 1] \tag{8}$$

式中，$B(T_s)$ 为黑体辐射亮度；L_d 为大气上行辐射；L_u 为大气下行辐射；L_λ 为热红外波段辐射亮度；ε 为地表比辐射率；τ 为大气透过率。

由于 4 个指标的量纲不统一，首先通过正向标准化，将其数值映射到区间 0~1，其公式为

$$I = (M_i - M_{\min})/(M_{\max} - M_{\min}) \tag{9}$$

式中，I 为生态指标标准化后的数值；M_i 为各指标的初始值；$M_{\min}$ 和 $M_{\max}$ 为各指标的最小值和最大值。以 *NDVI* 为例，则 M_i 为第 i 年的 *NDVI*，$M_{\min}$ 为第 i 年 *NDVI* 的最小值，$M_{\max}$ 为第 i 年 *NDVI* 的最大值。

1.3.2 地理探测器模型

基于驱动力分析和空间异质性度量，地理探测器模型(GDM)为探测生态环境质量的影响机制提供了便捷的途径。GDM 的基本思想是，当一个或多个变量对生态环境质量有显著影响时，则该自变量应具有与生态环境质量相似的空间模式特征。GDM 的优势在于可以从众多因素中筛选出影响生态环境质量变化的重要因素。同时，它还可以比较两个因素的交互作用对生态环境质量的影响程度，以及判断两个因素的交互作用对生态环境质量是线性关系还是非线性关系。单变量或交互变量对因变量空间差异的解释程度可以用 q 值指标来衡量。生态环境质量的演变受到自然和人为因素的综合影响。因此，选择上述因素作为自变量(X)，生态环境质量作为因变量(Y)。在应用该模型之前，首先应用 SPSS 23 软件对连续自变量进行离散化处理，并设定最优参数。q 的取值范围为[0，1]。自然和人为因素对生态环境质量的影响越大，q 值就越大[20]。计算式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} N_h\sigma_h^2 \tag{10}$$

式中，$h = 1$，…，n；L 为变量 Y 或因子 X 的分层，即分类或分区；N_h 为分层 h 的单元数；N 为整个区域的单元数；σ_h^2 为分层 h 的 Y 值的方差；σ^2 为整个区域 Y 值的方差。

1.3.3 结构方程模型

结构方程模型是 1970 年代由 JORESKOG 综合因素分析、回归分析和路径分析发展而成的一门统计方法，是建立、估计和检验因果关系模型的方法[24]。模型中同时有显在变量和潜在变量，其中显在变量是可以直接观测的变量，潜在变量是不可被观测的变量。在本研究中，显在变量为温度、降水数据、干旱

指数、DEM、坡度、坡向、人口密度、GDP 和陆表人为热排放通量，潜在变量则为气候条件、地形、城镇化和土地利用类型。本研究采用结构方程模型探索生态环境质量对影响因素的响应关系和强度，从而确定地形、气候、城镇化和土地利用方式是如何影响生态环境质量的。结构方程模型的可靠性采用均方根近似误差检验（*RMSEA*）、卡方检验（χ^2）、和拟合优度指数检验（*GFI*）进行评估。χ^2 值不显著（$P>0.05$）、*RMSEA*<0.10 和 *GFI*≥0.90 时，表明模型可靠性较高。结构方程模型的构建采用 R 4.3.2 软件中的“lavaan”包实现。

2 结果与分析

2.1 生态指标对生态环境质量的贡献度

首先将用于构建遥感生态指数的 4 个指标进行主成分分析，得到 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 个时期的分析结果（见表 1）。由表 1 可知，各时期绿度、热度、干度和湿度指标的第一主成分的贡献率均在 70%以上；其中，1990 年为 73.42%，2000 年为 75.26%，2010 年为 71.37%，2020 年为 75.38%，这表示第一主成分 PC1 较好地集合了四个指标大部分的特征信息。四个指标的平均贡献度绝对值依次为 *NDVI*（0.784）>*NDBSI*（0.643）>*LST*（0.344）>*WET*（0.194），说明绿度指数对流域内生态环境质量的影响最大，其次为干度指数。从第一主成分的正负符号来看，绿度和湿度指数显然对流域生态环境有正向改善作用，而热度和干度指数则有负向恶化作用，这一结果也符合实际情况。

表 1 4 个生态指标的第一主成分分析结果

Table 1 Results of the first principal component analysis of the four indicators

第一主成分 PC1						
年 份	*NDVI*	*WET*	*NDBSI*	*LST*	特征值	贡献率/%
1990	0.731	0.243	−0.622	−0.310	0.065 2	73.42
2000	0.769	0.205	−0.639	−0.329	0.069 8	75.26
2010	0.804	0.167	−0.627	−0.348	0.079 5	71.37
2020	0.832	0.159	−0.682	−0.388	0.066 4	75.38
平均值	0.784	0.194	−0.643	−0.344	0.070 0	73.86

2.2 洮河流域生态环境质量时空格局

本研究根据 2015 年颁布的《生态环境状况评价技术规范》，以 0.2 为等间隔划分洮河流域生态环境质量等级分布，具体如下：优（0.8～1）、良（0.6～0.8）、中等（0.4～0.6）、较差（0.2～0.4）、差（0～0.2），得到图 2 的时空分布格局。从图 2 可知，洮河流域生态环境质量存在明显差异。首先，从空间分布来看，流域生态环境质量整体呈现出由西南向东北逐渐变差的态势，甘南高原的生态环境质量明显优于黄土高原，流域大部分地区处于中等偏优的区间。其次，从时间序列上看，流域生态环境质量表现出先略微恶化，而后逐渐改善的趋势。

通过 ARCGIS 统计得到洮河流域不同时期生态质量等级的面积和占比，如图 3 所示。在 1990 年，洮河流域生态环境质量的具体面积为：良（13 987.73 km^2，42.18%）>中等（12 335.24 km^2，37.20%）>较差（3 487.60 km^2，10.52%）>差（1 913.78 km^2，5.77%）>优（1 438.04 km^2，4.34%）。在 2000 年，洮河流域生态环境质量的具体面积为：良（14 469.27 km^2，43.63%）>中等（12 645.69 km^2，38.13%）>较差（3 240.51 km^2，9.77%）>差（1 946.35 km^2，5.87%）>优（860.56 km^2，2.59%）。在 2010 年洮河流域生态环境质量的具体面积为：中等（17 607.04 km^2，53.09%）>良（10 786.08 km^2，32.53%）>优（1 960.03 km^2，5.91%）>差（1 942.80 km^2，5.86%）>较差（866.44 km^2，2.61%）。在 2020 年，洮河流域生态环境质量的具体面积为：良（12 275.98 km^2，36.96%）>中等（10 888.46 km^2，32.83%）>优（3 849.30 km^2，11.61%）>较差（3 620.72 km^2，10.92%）>差（2 545.91 km^2，7.68%）。通过统计 *RSEI* 的平均值发现，*RSEI* 在 1990 年为 0.585、2000 年为 0.584、2010 年为 0.568、2020 年为 0.576。这表明在 1990—2020 年洮河流域的生态质量指数呈现先降低后增加的趋势。

2.3 洮河流域生态环境质量时空演变特征

本研究通过 ARCGIS 得到了 1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2020 年生态环境质量的空间变化，将差、较差、中等、良、优 5 个质量等级分别赋值 1、2、3、4、5，将差值计算结果分为 5 类（明显恶化、略微恶化、略微改善、明显改善、基本不变），如图 4 所示。在 1990—2000 年，洮河流域出现部分区域恶化的趋势，恶化的区域主要集中在甘南高原的碌曲县、夏河县和合作市，其他大部分地区生态质量基本不变，略微变好和明显变好的区域较少。在 2000—2010 年，洮河流域有略微恶化的地区，同时也有略微改善的地区，这一时期恶化地区生态质量下降的原因主要是洮河上游由于流域能源的集中开发、水利设施建设的快速发展，引起上游地区的水土保持监督、监测工作滞后；再加上缺乏统一的管理，流域上游的水电站无序开发现象突出，人为活动引起的水土流失现象不断加剧。而在流域下游的黄土高原

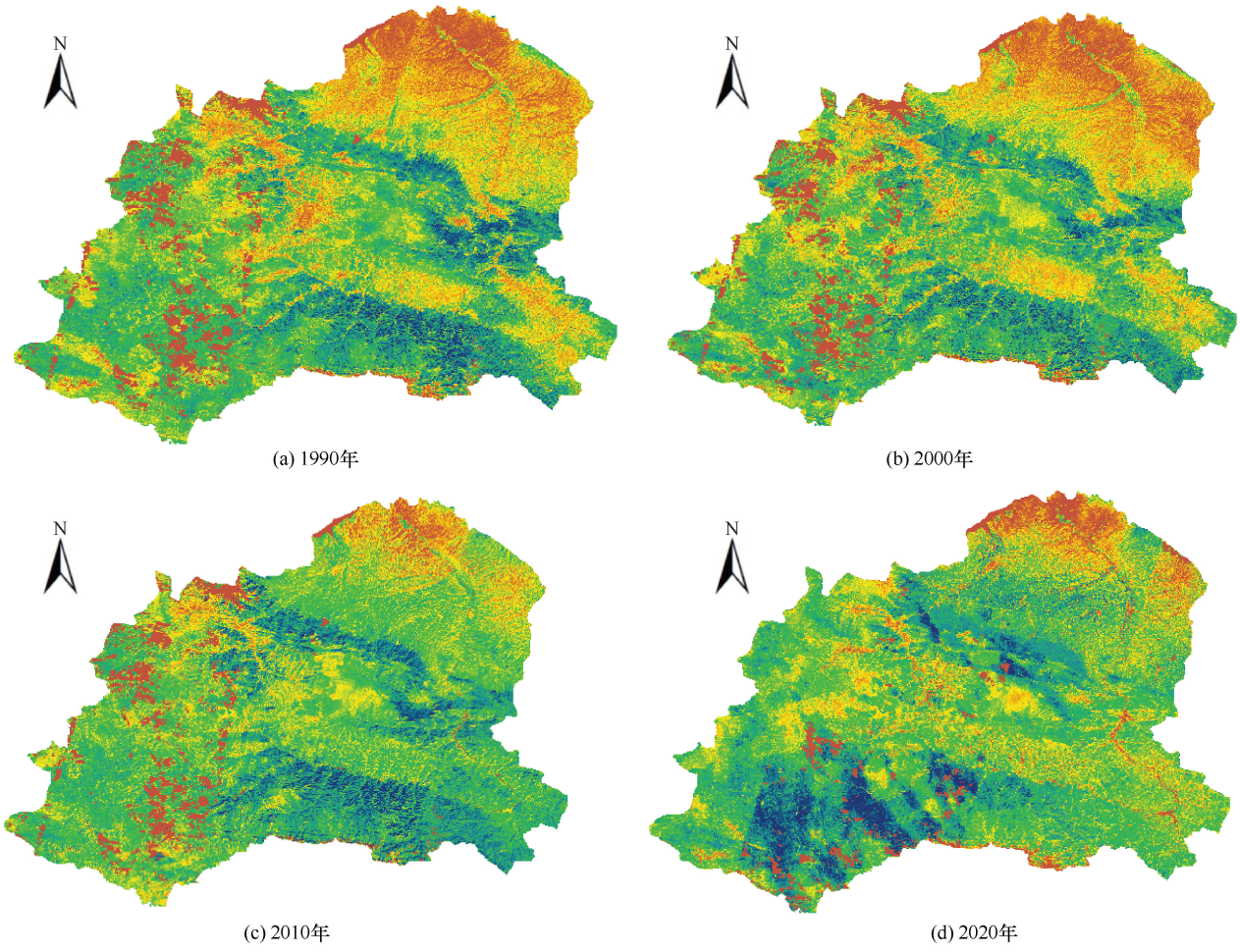


图 2　洮河流域生态环境质量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of ecological quality in the Taohe River Basin

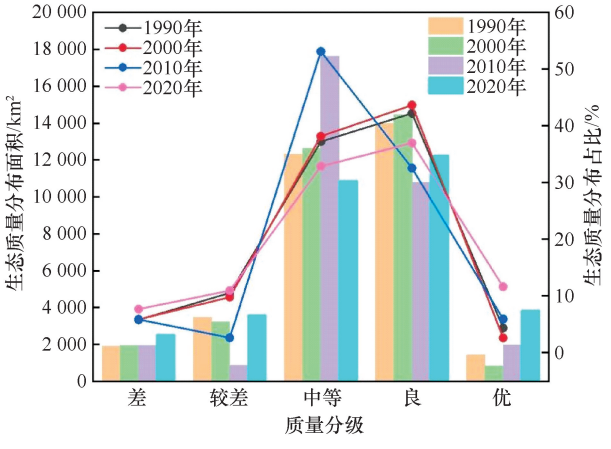
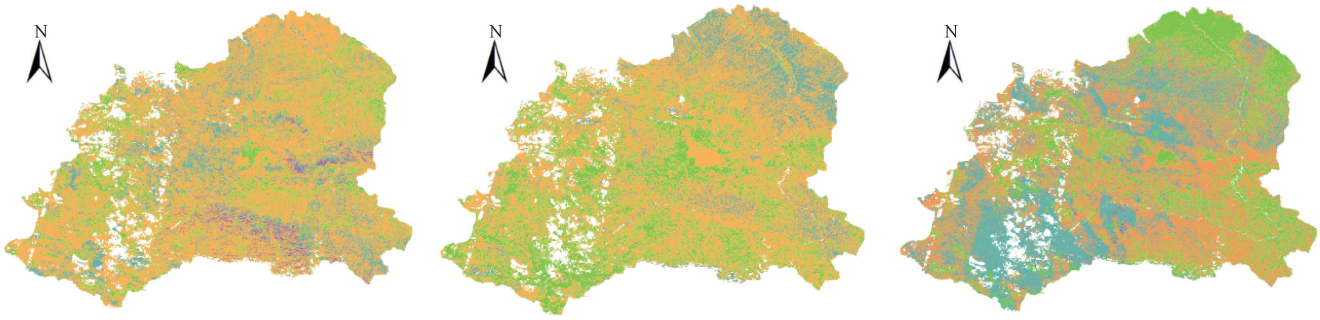


图 3　洮河流域生态环境质量分级与面积统计

Fig. 3　Classification and area statistics of ecological environment quality in the Taohe River Basin

区，生态环境本底较为脆弱，地形破碎，但现状治理工程往往以局部治理为主，加上持续治理的力度不强，从而造成流域整体生态环境质量不断下降。在 2010—2020 年，洮河流域通过大力落实河长制、湖长制，划定生态保护红线，在流域内积极开展河湖水资源保护、水环境治理及水生态修复等工程措施，坚持治理开发与节约保护并重的原则，经过多年的综合治理，使得流域生态环境质量有一个明显的改善。

本研究将 1990—2020 年洮河流域生态质量的转移进行统计。在 1990—2000 年，洮河流域生态环境质量基本不变的面积为 15 615.09 km^2；略微改善的面积为 5 898.01 km^2，略微恶化的面积为 7 376.11 km^2，明显改善的面积为 563.35 km^2，明显恶化的面积为 3 490.18 km^2。在 2000—2010 年，洮河流域生态环境质量基本不变的面积为 14 630.45 km^2，略微改善的面积为 7 675.79 km^2，略微恶化的面积为 6 871.63 km^2，明显改善的面积为 1 457.96 km^2，明显恶化的面积为 2 306.76 km^2。在 2010—2020 年，洮河流域生态环境质量基本不变的面积为 12 526.28 km^2，略微改善的面积为



(a) 1990—2000年　(b) 2000—2010年　(c) 2010—2020年

图 4　洮河流域生态环境质量空间变化

Fig. 4　Spatial changes in the ecological quality of the Taohe River Basin

13 141.97 km^2，略微恶化的面积为 2 308.98 km^2，明显改善的面积为 2 988.28 km^2，明显恶化的面积为 1 976.79 km^2。

2.4　洮河流域生态环境质量变化的驱动力分析

2.4.1　基于地理探测器模型的驱动力探测

通过地理探测器中的因子探测，得到环境因素和人为因素对洮河流域生态环境质量的影响程度，如表 2 所列。结果表明，自然因素和人为因素对洮河流域生态环境质量的影响在不断变化。总体来看，海拔、降水、气温和土地利用类型对洮河流域生态环境质量的贡献较大。随着时间的推移，土地利用类型的贡献越来越显著，人口密度和 GDP 对流域生态质量变化的解释力也在不断增强。

2.4.2　基于结构方程模型的驱动机制分析

气候、土地利用类型、地形和城镇化通过多种途径对 *RSEI* 分布产生直接和间接影响(见图 5)。模型的结果表明，气候和地形对 *RSEI* 的路径系数均为正，而土地利用类型和城镇化对 *RSEI* 的路径系数均为负。

气候对 *RSEI* 分布的正向影响逐渐减弱，从 1990 年的 0.692 降低到 2020 年的 0.635。土地利用类型对 *RSEI* 分布在 1990—2010 年为消极影响，在 2020 年为积极影响。地形对 *RSEI* 分布的正向影响逐渐减弱。1990—2020 年城镇化对 *RSEI* 具有负向影响，且负向影响在 2010 年是最大。

此外，气候、土地利用类型、地形和城镇化也通过间接途径影响 *RSEI* 的分布。气候和城镇化对土地利用类型均存在负面影响，其中，气候对土地利用类型的负向影响逐渐减弱，而城镇化对土地利用类型的影响逐渐增强。同样，地形对气候也有负面影响，洮河流域的甘南高原随着海拔的降低，气候条件由半湿润转化为半干旱。总体上，随着时间的推移，地形对 *RSEI* 的影响变化较小，城镇化和土地利用类型对 *RSEI* 的影响逐渐扩大，气候对 *RSEI* 的影响逐渐减弱。

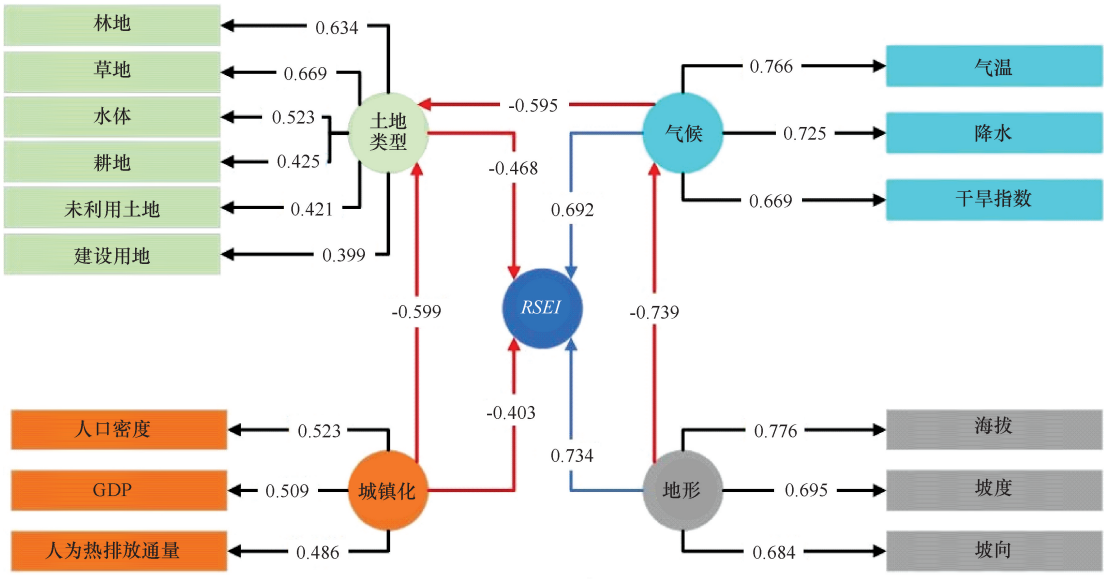
3　讨　论

本研究通过地理探测器和结构方程模型探索了环境因子和人为因子对洮河流域生态环境质量的影响程度和驱动机制。流域生态环境质量与其生态本底条件密切相关，同时也受到人为活动的强烈影响。气候

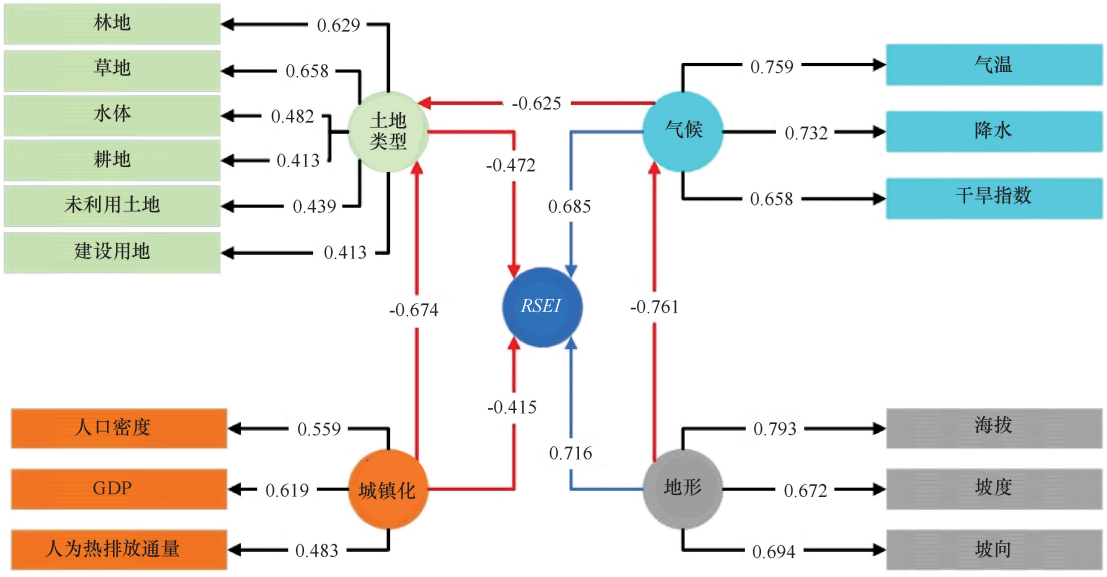
表 2　洮河流域驱动因子贡献程度排序

Table 2　Ranking of the degree of contribution of drivers in the Taohe River Basin

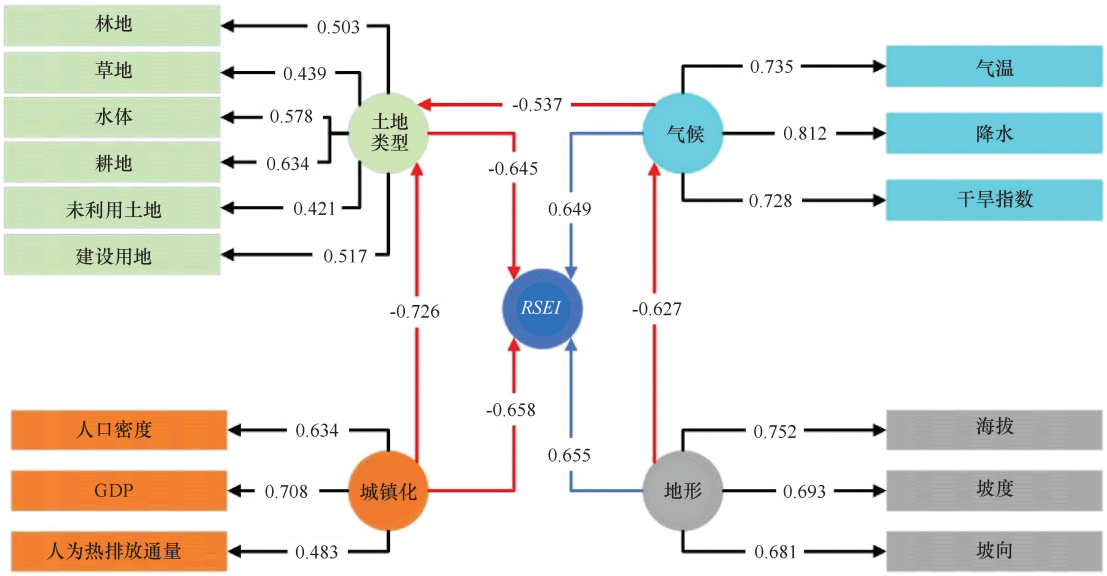
影响因子	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	q 值	排　序	*q* 值	排　序	*q* 值	排　序	*q* 值	排　序
海　拔	0.123 6	2	0.113 6	2	0.128 6	2	0.115 8	4
坡　度	0.069 5	6	0.068 4	6	0.062 8	6	0.062 1	6
坡　向	0.045 8	7	0.042 6	7	0.044 2	9	0.048 2	9
降　水	0.136 9	1	0.126 8	1	0.135 8	1	0.138 6	1
气　温	0.102 4	3	0.094 3	3	0.095 8	5	0.116 2	3
干旱指数	0.095 4	4	0.084 3	5	0.105 4	4	0.095 2	5
土地利用类型	0.085 8	5	0.742 6	4	0.115 6	3	0.125 8	2
人口密度	0.043 8	8	0.035 2	8	0.052 6	8	0.059 6	7
GDP	0.034 2	9	0.031 5	9	0.042 7	10	0.052 3	8
人为热排放通量	0.028 1	10	0.021 9	10	0.056 2	7	0.049 8	10



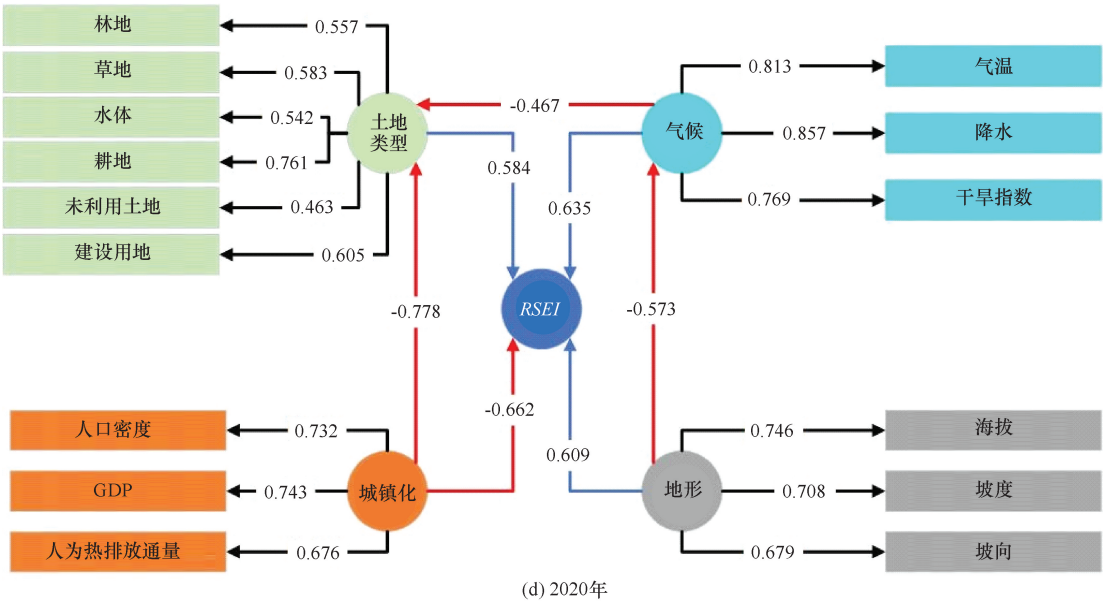
(a) 1990年



(b) 2000年



(c) 2010年



(d) 2020年

矩形代表显式变量，矩形所指向的圆代表隐式变量；指向的箭头表示影响流，其中蓝色箭头表示正相关，红色箭头表示负相关。

图 5　洮河流域生态环境质量的驱动路径及强度系数

Fig. 5　Driving paths and intensity coefficients of ecological quality in the Taohe River Basin

条件对洮河流域 *RSEI* 变化的正向影响在本研究中逐渐减弱，表明气候对生态环境的正向作用减弱，甚至可能成为未来区域生态环境质量的威胁。这与相关研究的结论是一致的，即全球气候变化、极端天气、洪涝干旱等自然灾害的增加使得气候对生态系统越来越不友好[25-26]。气候除了对 *RSEI* 分布有直接的正作用外，还通过对土地利用类型的负作用削弱了土地利用类型对 *RSEI* 分布的正作用。一方面可能是由于高海拔地区降水对土壤的冲刷在一定程度上改变了土壤的理化性质和地形结构，加剧了水土流失和植被退化，另一方面则是气候变化影响了流域水循环和地表径流的分布，从而对流域生态环境质量产生间接影响[27-28]。城镇化对 *RSEI* 的负面影响逐渐增强。一方面，洮河流域大量的村庄和城镇沿河分布，而目前城镇垃圾与污水净化设施落后，农村垃圾和农药化肥的大量使用，在遇到强降雨后容易造成面源污染，对流域生态环境造成恶劣影响。另一方面，随着引洮调水工程的逐步实施，流域工业化和城市化的发展也不断刺激着 GDP 和人口密度的增加，从而导致人为活动大规模和剧烈地改变了原来的生态系统空间格局，这在很大程度上也破坏了生态系统的稳定[29-30]。土地利用类型对 *RSEI* 的影响表现为先增强后降低，这可能与不同时期人类活动对土地利用的改造程度相关。例如，早期的林草地开垦为耕地则会削弱流域的水源涵养功能和生态调节能力，从而降低生态环境质量；而后期的退耕还林还草和人工植被建设则又会提高流域生态环境质量。

本研究完全基于遥感数据，受限于遥感图像的分辨率和质量，不可避免地会给 *RSEI* 的构建带来一些误差。此外，生态系统的复杂性决定了生态环境质量评价指标的多样性。本研究在构建 *RSEI* 指数时只考虑了绿度、湿度、热量和干燥度，这对生态环境质量的评价也有一定的影响。尽管如此，本研究的结果仍然表明了该方法评价生态环境质量的有效性。根据区域的特殊性，未来的研究将考虑纳入具有区域维度的生态评价数据，如空气质量、碳密度等。此外，本研究通过结构方程模型不仅考虑了各影响对 *RSEI* 的直接影响，还考虑了影响因素之间相互作用对 *RSEI* 的间接影响，为探索 *RSEI* 分布对各个影响因素的响应提供了新的视角。虽然结构方程模型显示了其有效性，但引入更多的观测数据可以提高其在探索 *RSEI* 对影响因素响应的准确性，如太阳辐射、风速、与道路的距离等可能是影响区域生态环境质量的重要因素。因此，在未来的生态环境质量评价中，我们将考虑通过相关算法对流域生态环境质量影响因素进行综合评价，客观识别直接变量和间接变量，以期对流域生态环境质量进行更全面地评价。

4　结　论

本研究通过绿度、湿度、热度和干度指标构建了遥感生态指数(*RSEI*)，评价了洮河流域生态环境质量的时空变化，而且通过不同的途径探讨了气候、土

地利用类型、地形和城镇化四个方面对生态环境质量的影响。研究区生态环境质量总体呈上升趋势。气候和地形对 *RSEI* 分布有正向影响，城市化对 *RSEI* 分布有负向影响，土地利用类型对 *RSEI* 为先负向后正向。气候的正向影响逐渐减弱，城镇化的负向影响逐渐增强。气候和城镇化均通过对土地利用类型的负作用间接影响 *RSEI* 的分布。本研究中生态环境质量空间格局的变化及相应的驱动因素分析结果可为流域管理者在具体的流域综合治理中提供相应的科学依据和实践指导。如在上游水土流失严重区域，确定水土保持分区和总体布局，细化水土流失防治措施；在中下游流域调查水源污染源，确定水资源保护目标，制定入河污染物控制方案等。此外，根据不同类型区的降水、植被、人口密度和工农业现状等，确定不同类型区生态修复方向及主要措施，提出不同类型区的生态治理措施布局。

参考文献(References)：

[1] BARBARA S. Application of surrogate measures of ecological quality assessment: The introduction of the indicator of eeological landscape quality(IEIQ)[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 224-234.

[2] 张培. 基于 PSR 的长三角区域生态环境质量综合评价及预测[J]. 枣庄学院学报, 2024, 41(2): 77-87.
ZHANG P. Comprehensive evaluation and prediction of ecological environment quality in Yangtze River Delta region based on PSR[J]. Journal of Zaozhuang College, 2024, 41(2): 77-87.

[3] 苏嘉亮，晏晨然，雷雨，等. 陕西省生态环境质量长时序动态监测[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 554-568.
SU J L, YAN C R, LEI Y, et al. Long time-series dynamic monitoring of ecological environment quality in Shaanxi Province[J]. Journal of Ecology, 2023, 43(2): 554-568.

[4] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障：在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[5] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神扎实推动新阶段水利高质量发展：在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.

[6] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. 水利发展研究, 2023, 23(12): 1-8.
WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(12): 1-8.

[7] 刘一良，张景，王丝丝，等. “全球生态环境遥感监测年度报告”回顾：2012—2021[J]. 遥感学报, 2022, 26(10): 2106-2120.
LIU Y L, ZHANG J, WANG S S, et al. Review of "annual report on remote sensing monitoring of global ecosystems": 2012—2021[J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(10): 2106-2120.

[8] NIE T, DONG G, JIANG X, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the loess plateau of Northern Shaanxi[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 613.

[9] PAN N, WANG S, WEI F, et al. Inconsistent changes in NPP and LAI determined from the parabolic LAI versus NPP relationship[J]. Ecological Indicators, 2021, 131(4): 108134.

[10] 张勃，李阳，黄小琴，等. 基于层次分析法的银川平原生态环境质量综合评价[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(11): 143-145.
ZHANG B, LI Y, HUANG X Q, et al. Comprehensive evaluation of ecological environment quality in Yinchuan Plain based on hierarchical analysis[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(11): 143-145.

[11] 解莉. 衡水湖湿地生态系统健康评价及恢复研究[D]. 北京：华北电力大学, 2007.
XIE L. Health assessment and restoration of wetland ecosystem in hengshui Lake[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.

[12] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
XU H Q. Remote sensing evaluation index of regional ecological environment change[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.

[13] 赵祖伦，赵卫权，苏印，等. 1991—2020 年贵阳市生态质量演变及空间分异定量归因[J/OL]. 环境科学, 1-17. [2024-05-22]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202401236.
ZHAO Z L, ZHAO W Q, SU Y, et al. Evolution of ecological quality and quantitative attribution of spatial differentiation in Guiyang City from 1991 to 2020[J/OL]. Environmental Science, 1-17. [2024-05-22]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202401236.

[14] 张贝贝，张晓楠，张启斌，等. 基于 RSEI 的长时序区域生态安全格局构建：以太行山区河北段为例[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 105-112.
ZHANG B B, ZHANG X N, ZHANG Q B, et al. Construction of regional ecological security pattern based on RSEI with long time series: Taking the Hebei section of Taihang Mountains as an example [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 105-112.

[15] 叶博文，孙标，史小红，等. 2000—2021 年锡林郭勒草原生态环境质量变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 271-283.
YE B W, SUN B, SHI X H, et al. Changes in ecological environment

quality and its driving factors in Xilingol Grassland from 2000 to 2021 [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2024, 44(1): 271-283.

[16] 张京新，谷雨鑫，沈佳琦，等. 黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J/OL]. 环境科学，1-23. [2024-05-22]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202401141.
ZHANG J X, GU Y X, SHEN J Q, et al. Analysis of spatial and temporal changes and drivers of ecological quality in the Yellow River Basin [J/OL]. Environmental Science, 1-23. [2024-05-22]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202401141.

[17] ZHANG Y, SHE J, LONG X, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality based on RSEI in Chang Zhu-Tan metropolitan circle, central China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109436.

[18] YUAN B, FU L, ZOU Y, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 302: 126995.

[19] 董洁芳，武荣伟，赵艳芬. 黄河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析[J]. 水生态学杂志，2024，45(3)：60-69.
DONG J F, WU R W, ZHAO Y F. Analysis of spatial and temporal evolution and driving force of ecological quality in the Yellow River Basin[J]. Journal of Water Ecology, 2024, 45(3): 60-69.

[20] 王劲峰，徐成东. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，2017，72(1)：116-134.
WANG J F, XU C D. Geoprobes: Principles and prospects[J]. Journal of Geography, 2017, 72(1): 116-134.

[21] 王士莹，谢保鹏，杨洁，等. 基于生态韧性的国土空间生态保护修复分区研究：以洮河流域为例[J]. 生态学杂志，2024，43(6)：1-14.
WANG S Y, XIE B P, YANG J, et al. Research on ecological protection and restoration zoning of national land space based on ecological resilience: Taking the Taohe River Basin as an example [J]. Journal of Ecology, 2024, 43(6): 1-14.

[22] 张平江，党国锋. 基于MCR模型与蚁群算法的洮河流域生态安全格局构建[J]. 生态环境学报，2023，32(3)：481-491.
ZHANG P J, DANG G F. Construction of ecological security pattern in Taohe River Basin based on MCR model and ant colony algorithm [J]. Journal of Ecological Environment, 2023, 32(3): 481-491.

[23] 朱青，国佳欣，郭熙，等. 鄱阳湖区生态环境质量的空间分异特征及其影响因素[J]. 应用生态学报，2019，30(12)：4108-4116.
ZHU Q, GUO J X, GUO X, et al. Spatial differentiation characteristics of ecological environment quality and its influencing factors in Poyang Lake area[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4108-4116.

[24] BUCHANAN S W, MAFA-ATTOYE T, DUNFIELD K, et al. The role of plant functional traits and diversity in soil carbon dynamics within riparian agroforests [J]. Journal of Environmental Quality, 2022, 51, 33-43.

[25] MITTNIK S, SEMMLER W, HAIDER A. Climate disaster risks-empirics and a multi-phase dynamic model[J]. Econometrics, 2020, 8, 1-27.

[26] ZANDALINAS S I, FRITSCHI F B, MITTLER R. Global warming, climate change, and environmental pollution: Recipe for a multifactorial stress combination disaster [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26, 588-599.

[27] LIU Z, WEI H, ZHANG J, et al. Seasonality regulates the effects of acid rain on microbial community in a subtropical agricultural soil of Southern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 224, 112681.

[28] NIKA C E, VASILAKI V, EXP'OSITO A, et al. Water cycle and circular economy: Developing a circularity assessment framework for complex water systems[J]. Water Research 2020, 187, 116423.

[29] ABREGO N, CROSIER B, SOMERVUO P, et al. Fungal communities decline with urbanization-more in air than in soil[J]. ISME Journal, 2020, 14, 2806-2815.

[30] LI C, SANCHEZ G M, WU Z, et al. Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989—2018) in southern China [J]. Environment Pollution, 2020, 260, 114075.

（责任编辑　王海锋）