

张晋博,陆志翔,罗艳,等.甘肃省黄河干支流水质差异及其影响因素分析[J].中国环境科学,2025,45(5):2767-2779

Zhang J B, Lu Z X, Luo Y, et al. Analysis of the water quality difference and its influencing factors in the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2767-2779

## 甘肃省黄河干流水质差异及其影响因素分析

张晋博<sup>1,2</sup>,陆志翔<sup>1\*</sup>,罗艳<sup>1,2</sup>,冯起<sup>1</sup>(1.中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**以黄河流域甘肃段为研究对象,基于DEM数据、土地利用数据、水质监测数据和社会经济数据,采用Fragstats 3.3软件和Pearson相关分析方法,计算河道缓冲区景观格局指数,分析水质指标与景观格局的相关性,探讨影响甘肃省黄河干支流水质的因素.结果表明:(1)2018~2021年,除洮河水质指标浓度总体趋于增长外,甘肃省黄河干流和其他支流水质整体好转,但超过80%的监测点的总氮(TN)指标处于V类以上,且渭河、泾河和庄浪河氮源污染水平仍然较高;总氮(TN)和氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)高值区主要分布在流域中部和东部局部地区,大部分地区的总磷(TP)很高,化学需氧量(COD)值空间差异大,且高值区主要集中在兰州市、临夏回族自治州中部的局部地区.(2)景观格局与水质指标存在显著相关性,景观斑块聚集度和连通性越强,水质越好;景观斑块破碎化程度和离散程度越高,水质污染风险越高;(3)水质指标具有较强的空间差异,水质驱动因素结果表明氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)、高锰酸钾指数和化学需氧量(COD)指标主要受农村生活和农业生产影响,总氮和溶解氧指标主要受城镇生活和工业生产影响.

**关键词:**景观格局; 河流水质; 驱动因素; 甘肃省; 黄河

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2767-13

**Analysis of the water quality difference and its influencing factors in the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province.** ZHANG Jin-bo<sup>1,2</sup>, LU Zhi-xiang<sup>1\*</sup>, LUO Yan<sup>1,2</sup>, Feng Qi<sup>1</sup> (1.State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2767~2779

**Abstract:** Using the Gansu section of the Yellow River Basin as the research object, Fragstats 3.3 software and Pearson correlation analysis method were used to calculate the landscape pattern index of the river buffer zone, analyze the correlation between water quality and landscape pattern indicators, and investigate the factors influencing the water quality of the Yellow River's main stream and tributaries in Gansu Province. The data included the land use data with the resolution of 30m in 2020, water quality monitoring data, and socio-economic data from 2018 to 2021. The results indicated that: (1) From 2018 to 2021, the water quality of the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province were improving, except the Taohe River, where the concentration of water quality indicators was in the increasing trend; however, TN at more than 80% of monitoring sites remained above Class V water quality standards, with significant nitrogen pollution persisting in the Weihe River, Jinghe River, and Zhuanglang River. High concentrations of TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were mainly distributed in the central and eastern parts of the basin, TP levels were elevated across most areas, and COD was dispersed, with hotspots concentrated in parts of Lanzhou City and central Linxia Hui Autonomous Prefecture. (2) A significant correlation was observed between landscape patterns and water quality indicators. Higher aggregation and connectivity of landscape patches were associated with better water quality, whereas higher levels of fragmentation and dispersion increased the risk of water pollution. (3) Water quality indicators exhibited strong spatial heterogeneity. The driving factor analysis revealed that NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, permanganate index, and COD were primarily influenced by rural activities, while TN and DO were mainly affected by urban living and industrial production.

**Key words:** landscape pattern; river water quality; drivers; Gansu Province; Yellow River

河流水资源是人类赖以生存和发展的基础,而水质的好坏对流域的水资源安全和生态建设至关重要,是实现流域生态环境高水平保护和社会经济可持续发展的关键因素<sup>[1]</sup>.河流作为陆地生态系统的主要汇集区域,受到周边土地利用类型和景观格

局的显著影响<sup>[2]</sup>.然而,水质的恶化已经成为了中国

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划项目(21ZD4FA008,23ZDFA018);兰州分院所际青年联合基金项目(E4400404);中国科学院西部之光项目(xbzglzb2022020)

\* 责任作者, 副研究员, lzhiang@lzb.ac.cn

内陆水域一个严重的环境问题,如社会经济迅速发展导致的水污染事件频发等<sup>[3]</sup>.近年来,探究水质差异及影响因素已成为国内外的研究热点.学者们采用随机森林回归模型、多元线性回归和冗余分析等方法探究景观格局与水质的相关性.周添红等<sup>[4]</sup>应用随机森林回归模型和BP神经网络,量化了土地利用及景观格局指数对水质指标的影响程度,表明黄河上游甘肃段不同土地利用类型和景观格局对河流总氮(TN)具有显著影响,耕地和建设用地对TN呈正相关作用,而绿地林地对TN呈负相关作用.Pei等<sup>[5]</sup>通过比较区域划分和流域划分方式下景观格局与水质的关系,表明水质监测点应与上游的所有子流域以及缓冲区相对应,嵌套流域和汇流机制的影响不容忽视;干旱灌区的灌溉事件对黄河水质的影响不容忽视,应避免将污染物直接排放到河岸附近.Wang等<sup>[6]</sup>通过冗余分析和多元线性回归等方法,得出影响水源地和干流水质参数的土地利用类型分别以自然地表和人为活动相关地表为主,但其影响在区域和季节上各不相同,特别是氮和TOC受土地利用影响显著.另有学者通过建立不同尺度的缓冲区<sup>[7-8]</sup>和确定河流廊道宽度<sup>[9]</sup>,采用景观格局指数和统计分析探究土地利用对水质的影响<sup>[10-14]</sup>.针对流域水质评价,学者们通过模型构建、水质指数和理化分析等方法探究水质等级.Qiu等<sup>[15]</sup>构建基于压力—状态—响应(PSR)模型的水生态安全评价体系,采用“单指标量化—多指标综合—多准则集成”(SMI—P)方法确定水生态安全指数(WESI),结合空间自相关分析方法,表明黄河流域一半的城市达到了二级预警,且大部分集中在流域的中上游地区.徐发凯等<sup>[16]</sup>基于综合污染指数法,结合单因子污染指数法及累积距平法等多种统计分析方法,定量分析了流域水质时空变化特征.Zhao等<sup>[17]</sup>采用理化分析、水质指数(WQI)对水质进行评价,通过细菌群落分析指出水质细菌污染不容忽视.区域社会经济发展和景观格局决定污染物的排放规模和消纳能力,进而成为影响区域水质空间分布的重要因素<sup>[18-20]</sup>.综上,现阶段景观格局对水质特征的相关关系研究已有一定的进展,但对干支流水质差异及社会经济对水质的影响研究却鲜有提及.因此,受人类活动和气候变化的多重影响,甘肃省黄河干支流水环境问题的成因复杂,且本底状况尚不清晰,缺乏有效的识

别和诊断技术方法,使得水环境问题的精准识别和诊断面临巨大挑战,进而导致河流治理与管控难以有效实行.

黄河流域对中国北方的社会经济可持续发展和生态安全至关重要<sup>[21]</sup>,而流域高污染企业聚集已成为限制流域可持续发展的关键因素<sup>[22]</sup>.黄河流域甘肃段西南部属于甘南高原,草原分布较集中,而东部主要以农业生产为主,农业种植用地分布较集中;中北部为城市建成区,也是人类活动强度最高的区域;此外,流域黄河河网密布、水系发达.人类活动不仅会影响景观斑块的种类和分布,还使斑块的形状趋于多样化和复杂化,从而导致景观破碎化程度进一步加剧.因此,科学诊断黄河流域的主要水环境问题,已成为新时期黄河治理的关键前提<sup>[23]</sup>.甘肃省作为“一带一路”重要节点,也是黄河流域重要的水源涵养区和生态屏障区,具有重要的战略地位和生态服务功能.由于水环境污染问题显著、经济发展水平较为落后,且社会经济的空间异质性较大,进一步制约了流域社会经济的可持续发展.黄河流域甘肃段的水质直接关系到黄河流域的水资源安全<sup>[24]</sup>,且水污染是导致黄河流域直接水稀缺风险损失(DWSR)显著增加的主要因素<sup>[25]</sup>.因此,本研究在探讨黄河流域甘肃段的水质差异的基础上,进一步探寻流域景观结构和社会经济与水质的关系.

已有学者对黄河水质状况进行了研究,但主要集中在黄河干流,对黄河支流水质状况、水质驱动因素及干支流关系的研究较少<sup>[26-28]</sup>.因而,为了进一步探讨黄河流域甘肃段的水质差异及影响因素,本研究采用水质单因子评价法、景观格局指数法、冗余分析和Pearson相关分析,探究甘肃黄河干支流水质的演变情况和主要水质污染指标,并对干流与各支流进行景观格局、社会经济因素与水质间的关系分析,厘清黄河流域甘肃段整体水质污染的程度和根源.并通过开展干支流水质对比研究,进而为干支流河长制的效果评估提供依据.研究结果将为区域生态环境治理决策提供依据,最终促进黄河流域生态保护和高质量发展.

## 1 研究区概况

甘肃省黄河干流位于甘肃省东南部,流经甘南、临夏、兰州和白银4市州,全长913km,占黄河干流总长度的六分之一.渭河是黄河最大支流,泾河、洮河和

庄浪河是黄河重要支流.地势西高东低(图 1),土地利用以草地和旱地为主,分别占研究区总面积的 29.61%和 20.21%,水体面积占研究区域的 1.59%.流域位于东部季风区和青藏高原气候区交接地带,区域年平均气温 7℃,平均年降雨量为 473.64mm.近年来区域城市化发展迅速,城镇化水平达到 58%以上.截至 2018 年末,

研究区总人口为 1830.29 万人,占甘肃省总人口的 69%;GDP 为 5769.55 亿元,占全省 GDP 的 70%.黄河流域甘肃段既是甘肃省的政治、经济和文化中心,又是黄河上游重要的水源涵养区.甘肃省黄河干支流从中心城区流经城乡交错带,复杂的景观类型和密集的人类活动对河流水环境产生了重大影响.

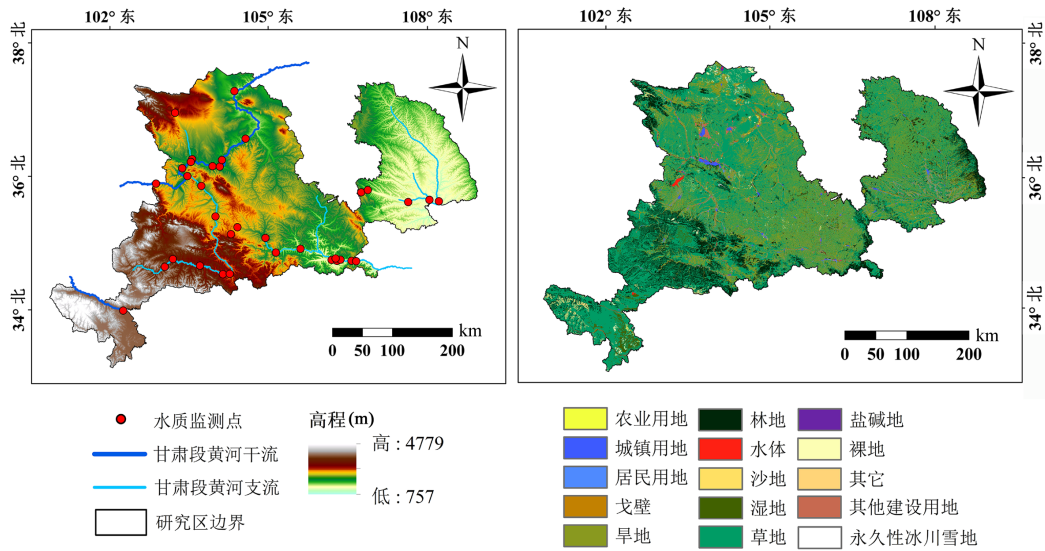


图 1 研究区概况及土地利用分类

Fig.1 The study area and its land use types

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

水质数据来源于甘肃省水环境监测中心,包括有 35 个监测点的 2018~2021 年的月水质数据,黄河干流、泾河、洮河、渭河和庄浪河分别有 10, 5, 7, 11 和 2 个水质监测点.参考我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)<sup>[29]</sup>,选取总氮(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)、高锰酸盐指数、溶解氧(DO)、化学

需氧量(COD)和 pH 值等 7 个水质指标进行分析.为探究产业发展对甘肃省黄河干支流水质的影响,驱动因素数据来源于 2018~2021 年甘肃省水资源公报和甘肃省统计年鉴.数字高程模型(DEM)数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 90m.土地利用数据从中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)获取,为 2020 年 30m 分辨率的分类数据.

### 2.2 景观格局指数法

表 1 景观格局指数及其生态学含义

Table 1 Landscape pattern index and their ecological implication

景观格局指数	英文全称	生态学含义
斑块密度(PD)	Patch Density	反映景观异质性和破碎度及某一种斑块的破碎化程度,反映了该类型斑块的密度,PD 越大,景观破碎度越高
景观形状指数(LSI)	Landscape Shape Index	反映某个斑块类型或整个景观中所有斑块的形状复杂程度,LSI 越大,表明景观形状越复杂,空间异质性越高,景观破碎度越高
聚合度指数(AI)	Aggregation Index	AI 值趋向于 0 时,表明该类型斑块的聚合度低;AI 值趋向于 100 时,表明该类型斑块的聚合高
蔓延度指数(CONTAG)	Contagion	表征景观中不同斑块类型的团聚程度或延展趋势,高蔓延度表明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连通性,CONTAG 越大,斑块内聚度越高,景观破碎度越低
边缘指数(ED)	Edge Density	单位面积内斑块边界长度与景观总面积的比值,ED 越大,空间破碎度越高
香农多样性指数(SHDI)	Shannon's Diversity Index	反映景观各组分数量、比例情况及景观多样性;SHDI 越大,景观类型丰富度越高,空间异质性越强

为探究景观破碎度、景观聚集度和景观类型丰富度对甘肃省黄河干支流水质的影响,参照已有研究<sup>[30]</sup>,选取了斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、聚集度指数(AI)、蔓延度指数(CONTAG)、边缘指数(ED)和香农多样性指数(SHDI)等6个景观指数表示景观破碎度、聚集度和丰富度.其中,PD、LSI和ED反映景观破碎度,AI和CONTAG反映景观聚集度,SHDI反映景观类型丰富度.景观指数的生态含义如表1所示.

### 2.3 单因子评价法

单因子水质评价法是将各项水质指标与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的水质标准限值进行对比后,选出严重超标的单项指标评价水样的最终水质类别,最终确定主要污染物和主要污染源,这有利于直观地了解研究区水质状况,同时可以有效避免确定指标权重的主观随意性<sup>[31-33]</sup>.

### 2.4 Pearson 相关系数分析

Pearson 相关系数分析法用于衡量任何两个变量之间的相关性强度<sup>[34-35]</sup>,本研究利用 Pearson 相关系数分析水质指标与类型景观指数的相关性.具体公式为:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^m (a_j - A)(b_j - B)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (a_j - A)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (b_j - B)^2}} \quad (1)$$

式中: $a_j$ 为第  $j$  类水质指标值; $b_j$ 为第  $j$  类景观指数数值; $A$ 为所有水质指标值的平均值, $B$ 为所有景观指数数值的平均值; $r$ 为二者间相关系数,范围在 $[-1,1]$ 之间.当  $r \in (0,1)$ 时,水质指标与景观指数呈

正相关;当  $r \in (-1,0)$ 时,水质指标与景观指数呈负相关;当  $r=0$ 时,两者之间不存在任何相关性.相关系数的绝对值越大,水质指标与景观指数的相关性越强.

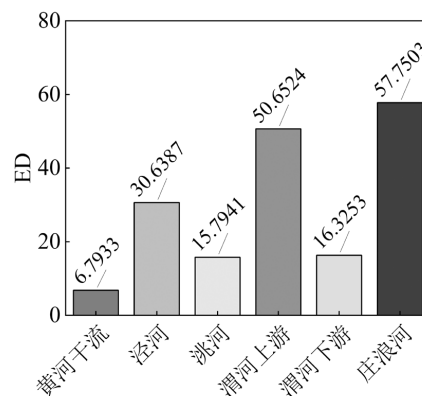
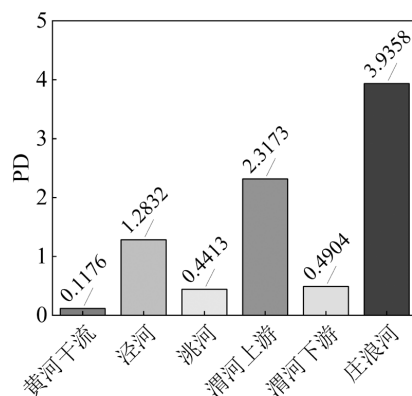
### 2.5 冗余分析

冗余分析(RDA)可获得景观格局对水质指标的解释能力.景观格局指数随缓冲半径变化的趋势表明,当缓冲半径大于 1km 时,缓冲区的景观格局指数趋于稳定,不再随缓冲半径的增大而发生较大变化<sup>[36]</sup>.因此,本研究干流的缓冲区半径为 5km,支流的缓冲区半径为 3km,基于 RDA 量化景观格局指数对河流水质解释能力的排序.当各景观格局指标的箭头之间夹角小于  $90^\circ$ 时,两者为正相关;当大于  $90^\circ$ 时,两者为负相关;等于  $90^\circ$ 时,两者不具有明显的相关性;两者之间锐角越小或钝角越大,则相关性越强.箭头长度表示景观指数对水质指标的解释力度,长度越长,景观指数解释力度越强.

## 3 结果与分析

### 3.1 景观格局指数分析

干支流水平下(图2),庄浪河 PD 值相对较大,表明景观破碎化较为显著.庄浪河和渭河上游的 ED 值相对较大,表明景观被边界分割的程度较高.泾河的 LSI 值相对较大,表明斑块越离散聚合程度越差.泾河的 CONTAG 值也相对较大,表明景观是多种要素下的密集格局,景观的破碎化程度显著.黄河干流和洮河的 SHDI 较大,说明该区域斑块分布不均衡,且景观类型空间分布的异质性逐渐增强.此外,洮河的 AI 值相对较小,表明景观斑块之间的连通性较低.



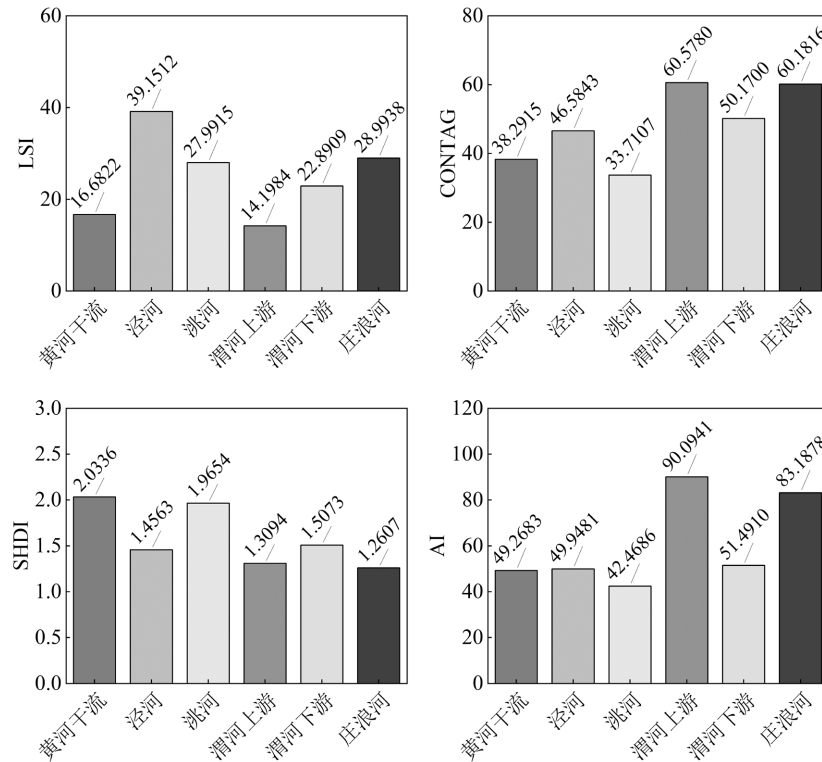


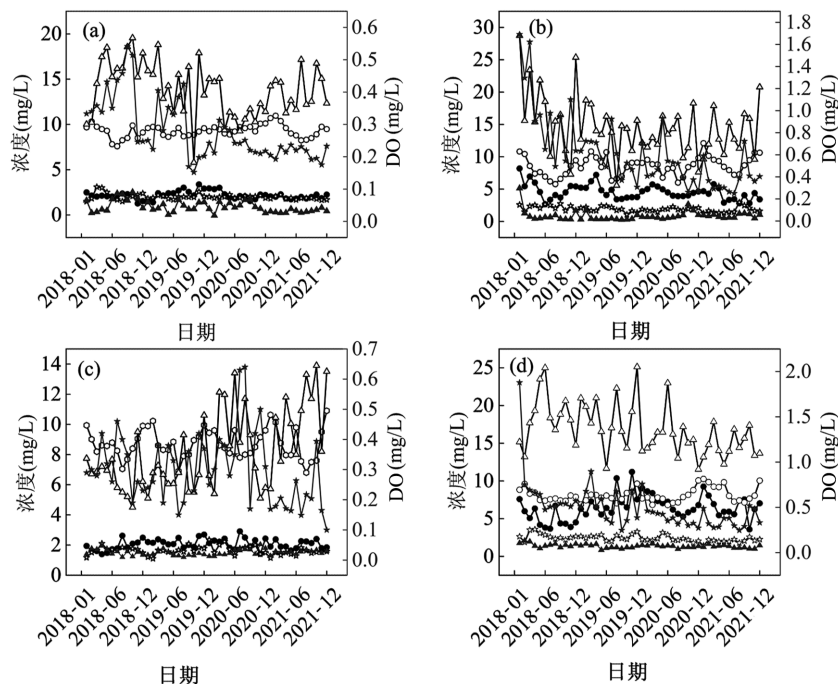
图2 甘肃省黄河干支流2020年河道缓冲区景观指数

Fig.2 Landscape pattern index of river buffers in the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province in 2020

3.2 流域水质时空特征

3.2.1 甘肃省黄河干流水质月变化特征 2018~2021年,甘肃省黄河干流水质指标变化均趋于稳定,且冬季水质相比其余时期水质较好(图 3a)。泾河氨氮、总磷和高锰酸钾指数变化均趋于稳定(图 3b);洮河水质指标浓度均呈增长状态(图 3c);渭河氨氮、

总磷和高锰酸钾指数变化均趋于稳定,总氮均劣于V类水质标准(图 3d);庄浪河氨氮、总磷、溶解氧和高锰酸钾指数变化均趋于稳定(图 3e)。其中,各流域氨氮和化学需氧量指标年变化较大,总磷和高锰酸钾指数指标年变化较小。除洮河流域外,其余流域各水质指标变化均为改善趋势。



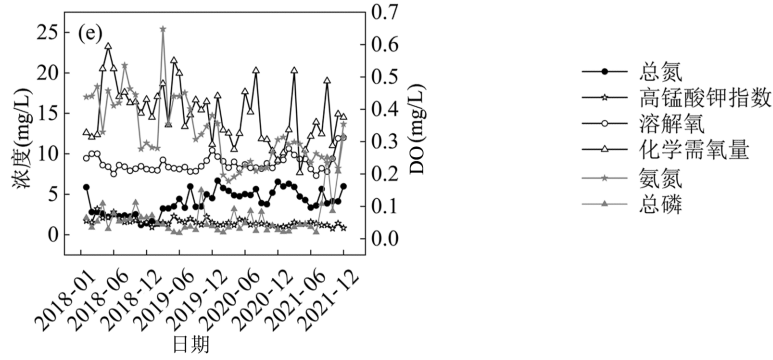


图3 甘肃省黄河干流和支流 2018~2021 年水质月变化

Fig.3 Monthly water quality variations of the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province from 2018 to 2021  
a 干流, b 泾河, c 洮河, d 渭河, e 庄浪河

3.2.2 甘肃省黄河干流水质总体特征 甘肃省黄河干支流 35 个水质监测点的水质监测数据的描述性统计特征如图 4 所示.氨氮含量在 2019 年的变化幅度较大(0.15~2.73mg/L),变异系数为 90,从平均值来看,2021 年氨氮含量最低(0.27mg/L),2018 年和 2019 年数值较为接近,分别为 0.52 和 0.48mg/L;高锰酸钾指数平均值在 2021 年最低(1.76mg/L),2018 年

和 2019 年分别为 2.24 和 2.13mg/L;总氮含量的平均值,2019 年(4.13mg/L)和 2020 年(4.13mg/L)远高于 2018 年(3.35mg/L)和 2021 年(3.67mg/L),总氮均值均属于 V 类标准;总磷浓度呈现降低趋势,并逐年递减.总的来看,研究区河流的氨氮和总氮指标整体处于较高水平.此外,总氮、氨氮以及总磷的变异系数均大于 36,表明存在强烈的空间分异.

水质指标	年份	最小值 (mg/L)	最大值 (mg/L)	均值 (mg/L)	标准差 (mg/L)	变异系数 (%)	偏度	峰度
总氮	范围	(0.04~1.41)	(8.23~9.32)	(3.35~4.13)	(2.33~2.49)	(60~69)	(0.57~1.29)	(-1.07~0.47)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							
氨氮	范围	(0.13~0.19)	(0.66~2.73)	(0.27~0.52)	(0.12~0.43)	(39~90)	(0.67~4.23)	(-0.11~22.14)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							
总磷	范围	(0.01~0.02)	(0.09~0.15)	(0.04~0.06)	(0.02~0.03)	(53~63)	(0.51~1.03)	(-0.75~0.81)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							
高锰酸钾指数	范围	(1.01~1.53)	(2.41~5.55)	(1.76~2.24)	(0.34~0.81)	(7~38)	(-0.07~2.38)	(-0.91~8.31)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							
溶解氧	范围	(7.29~7.97)	(9.48~10.05)	(8.49~9.11)	(0.47~5.36)	(5~64)	(-1.29~0.25)	(-0.91~0.62)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							
化学需氧量	范围	(5.38~7.76)	(20.23~26.05)	(8.43~13.78)	(0.57~5.67)	(7~41)	(-0.07~0.75)	(-0.35~0.35)
	2018							
	2019							
	2020							
	2021							

图4 水质的描述性特性

Fig.4 Qualitative characteristics of water quality

3.2.3 甘肃省黄河干流水质空间差异 甘肃省黄河干流水质空间差异如图 5 所示,相较于其他指标,TN 污染情况较为严重,80%以上的监测点水质处于 V 类以上.氨氮污染逐渐改善,2020 年 85%以上

水质监测点满足 II 类水质标准,到 2021 年,90%以上水质监测点满足 II 类水质标准.总磷污染逐渐改善,2020 年水质监测点均满足 II 类水质及以下标准,其中 20%以上水质监测点满足 I 类水质标准,到

2021 年,水质监测点均满足 II 类水质标准,其中 70% 以上水质监测点满足 I 类水质标准.高锰酸钾指数逐渐减小,2020 年水质监测点均满足 II 类水质及以下标准,其中 45% 以上水质监测点满足 I 类水质标准,到 2021 年,水质监测点均满足 II 类水质及以下标准,其中 70% 以上水质监测点满足 I 类水质标准.化学需氧量指标逐渐改善,2020 年和 2021 年 70% 以上水质监测点满足 II 类水质标准.溶解氧在 2018~2021

年期间均为 I 类水质标准.除 2020 年泾河流域 2 个监测点 pH 值大于 9 外,其余水质监测点 2018~2021 年的 pH 值均在 7~9 之间,可见 2018~2021 年监测点 pH 值均呈碱性.总体来看,总氮和氨氮高浓度区主要分布在流域中部和东部局部地区,总磷在流域大部分地区均很高,化学需氧量值空间差异较大,且高值区主要集中在兰州市、临夏回族自治州中部的局部地区.

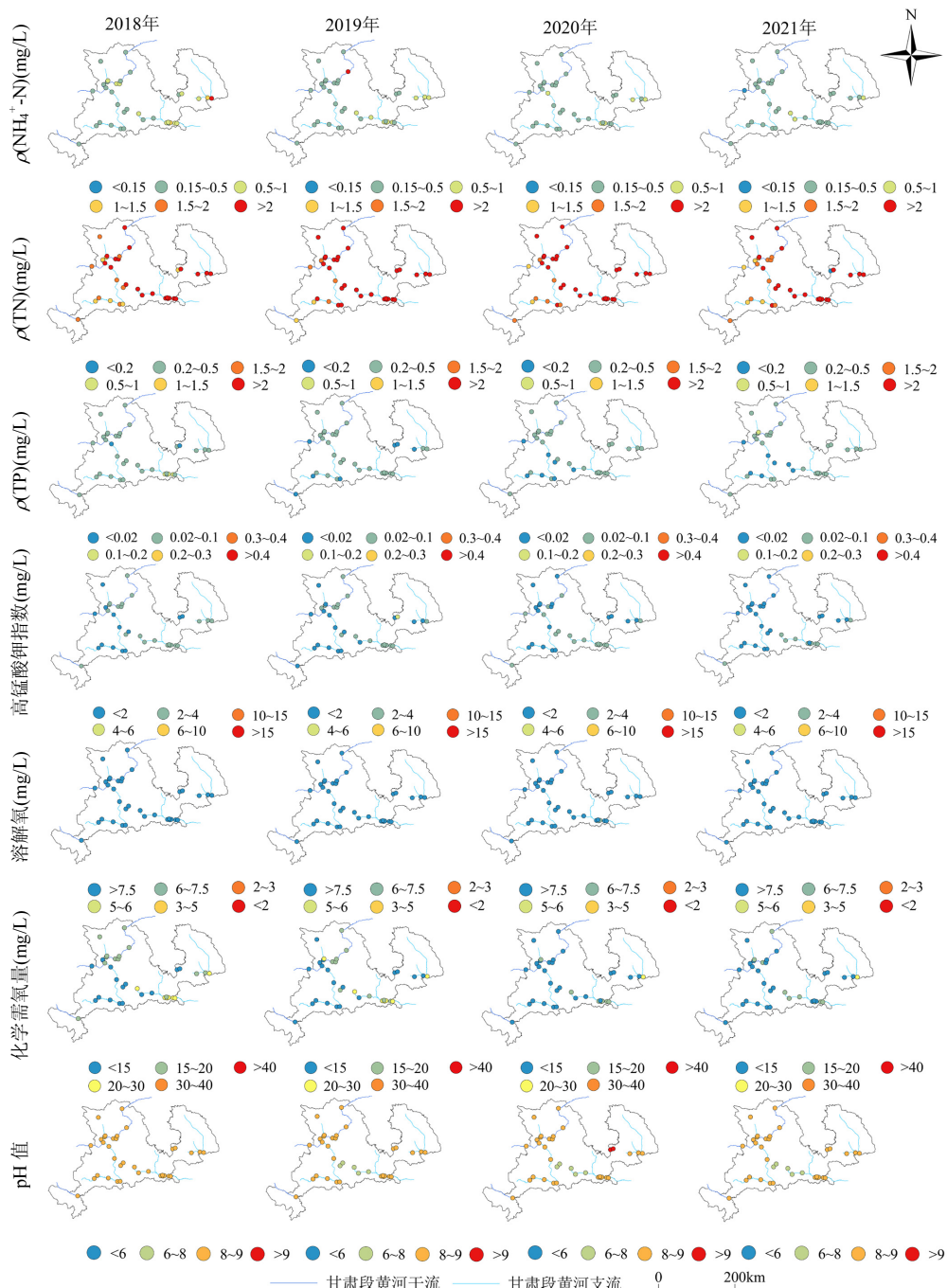


图 5 2018~2021 年甘肃省黄河干支流水质空间分布

Fig.5 Spatial distributions of water quality in the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province from 2018 to 2021

3.2.4 甘肃省黄河干支流水质特征评价 选取地表Ⅲ类水质标准对甘肃省黄河干支流 2018~2021 年逐月水质监测数据进行单因子评价,结果如图 6 所示.总氮指标在甘肃省黄河干流及各支流 4 年内变

化均较大,除洮河流域溶解氧指标外,其余各流域水质指标均处于稳定状态.评价指标中包含总氮时,各月水质均未达到Ⅲ类标准;当评价指标中不包含总氮时,单因子评价结果较好.

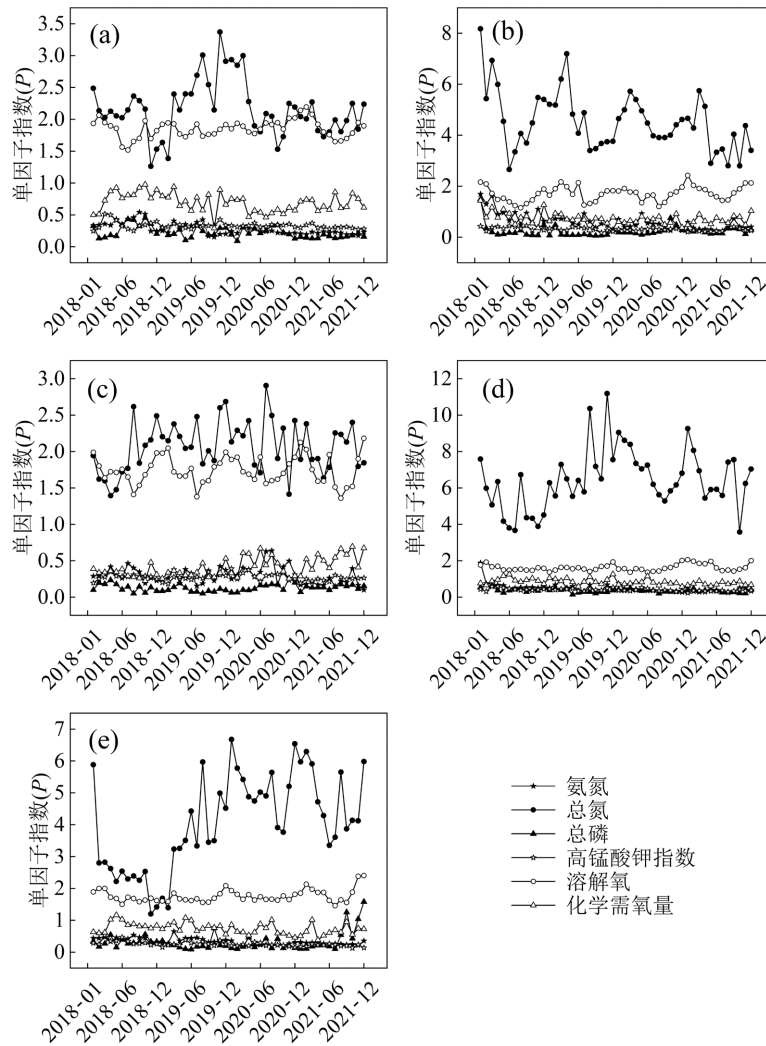


图 6 水质单因子评价结果

Fig.6 Single-factor evaluation results of water quality

a 干流,b 泾河,c 洮河,d 渭河,e 庄浪河

### 3.3 景观格局对流域水质的影响分析

3.3.1 景观格局指数与水质相关性分析 景观格局指数与水质指标的相关性如图 7 所示,化学需氧量与 PD、ED、CONTAG 和 AI 呈正相关关系,其中与 CONTAG 呈较显著正相关关系,与 SHDI 和 LSI 呈负相关关系,其中与 SHDI 呈显著负相关关系.溶解氧与 PD、ED、CONTAG、LSI 和 AI 呈负相关关系,与 SHDI 呈较显著正相关关系.氨氮和 LSI 呈显著正相关关系,与 PD、ED、CONTAG、AI 呈负相关

关系,其中与 ED 和 LSI 有较显著关系,与 CONTAG 不存在相关关系.总氮与 PD、ED、AI 和 CONTAG 呈正相关关系,其中与 CONTAG 呈较显著的正相关关系,与 SHDI 呈显著负相关关系,与 LSI 不存在任何相关关系.总磷与 PD、ED、CONTAG、AI 呈正相关关系,其中与 CONTAG 存在着相对较显著的相关关系,与 SHDI 呈负相关关系,与 LSI 不存在相关关系.高锰酸钾指数与 SHDI 呈较弱正相关关系,与 PD、ED、LSI、CONTAG 和 AI 呈负相关关系.

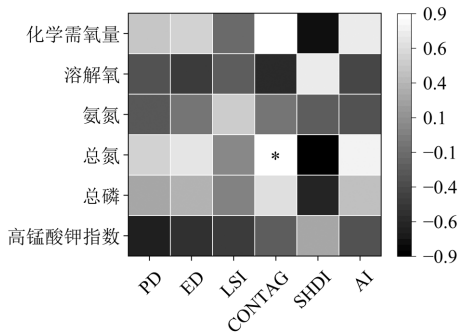


图 7 甘肃省黄河干支流 2020 年水质与景观指数相关性  
Fig.7 Correlation between water quality and landscape index in the main stream and tributaries of the Yellow River in Gansu Province in 2020  
\* 代表相关性显著,  $P \leq 0.05$

根据景观指数与水质相关性分析,景观破碎度、景观聚集度与化学需氧量、总磷、总氮呈正相关关系,与溶解氧呈负相关关系.此外,景观聚集度与高锰酸钾指数也呈负相关关系.景观类型丰富度与溶解氧和高锰酸钾指数呈正相关关系,其中与高锰酸钾指数呈较弱正相关关系,与化学需氧量、总氮和总磷呈负相关关系,其中与总氮呈显著负相关关系.

3.3.2 景观格局指数与水质的冗余分析 景观格局指数对河流水质的解释能力排序如图 8 所示,总氮与 PD、AI、LSI、ED 和 CONTAG 均呈正相关关系,但与 SHDI 呈负相关;氨氮与 LSI 呈正相关,与

PD、AI、ED、CONTAG 和 SHDI 呈负相关;总磷与 AI、PD、CONTAG 和 ED 呈正相关,与 SHDI 呈负相关;高锰酸钾指数与 SHDI 呈正相关,与 LSI、CONTAG、PD、ED 和 AI 呈负相关.总氮的箭头相较于总磷较长,说明景观破碎度对该水质指标的影响更显著.

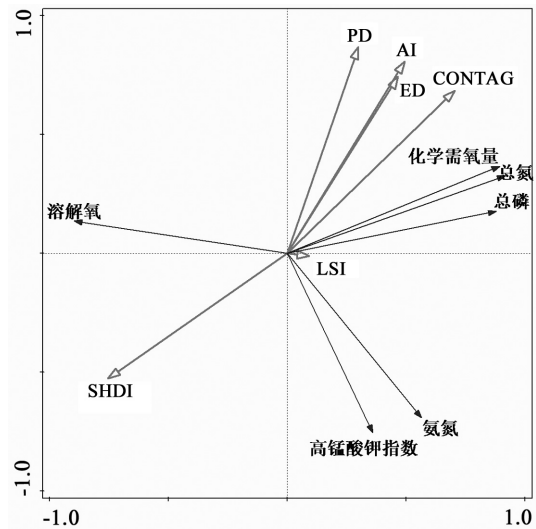


图 8 2020 年水质指标与景观指数的排序分析  
Fig.8 Ranking analysis of water quality indicators and landscape index in 2020

3.4 水质变化的社会经济因素分析

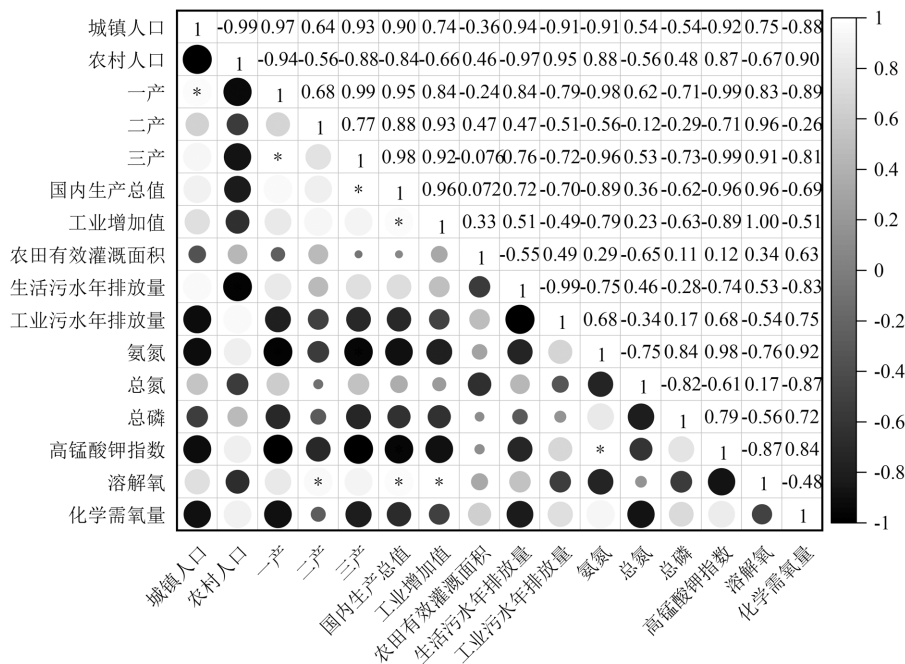


图 9 水质指标与可能影响因素的 Pearson 相关分析  
Fig.9 Pearson correlation analysis of water quality indicators and potential influencing factors  
\*代表相关性显著,  $P \leq 0.05$ ,圆圈大小和颜色深浅代表相关性程度,圆圈越大,相关性越强,圆圈越小,相关性越弱

影响水质的主要社会经济因素为国内生产总值、第一产业、第二产业、第三产业和人口数量(图9)。氨氮指标与农村人口和农田有效灌溉面积呈正相关关系,且与第一产业和第三产业存在显著负相关关系。总氮指标主要与第一产业、第三产业、生活污水排放和城镇人口呈正相关关系。总磷指标与农村人口、农田有效灌溉面积和工业污水年排放量存在正相关关系。高锰酸钾指数与农村人口与工业污水年排放量呈正相关关系,与其余驱动因素均存在负相关关系,其中与第一产业、第三产业和国内生产总值存在显著负相关关系。除农村人口与工业污水年排放量外,溶解氧与其余水质指标存在正相关关系,其中与第二产业、国内生产总值和工业增加值呈显著正相关关系。化学需氧量与农村人口和工业污水年排放量存在正相关关系,与其余水质指标呈负相关关系。

黄河流域甘肃段近年来主要污染物入河量和农业化肥施用量如表2和表3表示。2018~2021年,流域农业化肥施用量逐年减少。2018~2019年流域氨氮排放显著减少,化学需氧量排放量大幅增加,2020年生活污水排放量增加,工业污水排放量显著减少,这可能是由于新冠疫情,导致流域地区工农业等经济生产活动相对减少。由于流域有较为完善的污水处理设施,因此,虽然污染物排放增加,但整体水质仍较好。

表2 黄河流域甘肃段主要污染物入河量

Table 2 Intake of major pollutants in the Gansu section of the Yellow River Basin

年份	生活污水排放量(亿 t)	工业污水排放量(亿 t)	化学需氧量排放量(t)	氨氮排放量(t)
2018	3.1679	1.6190	21584	2755
2019	2.8998	2.1240	27020	1884
2020	4.3512	0.6139		
2021	4.3512	0.5169		

表3 黄河流域甘肃段农业化肥施用量

Table 3 Amount of agricultural fertilizer applied in Gansu section of the Yellow River Basin

年份	化肥施用折纯量(t)
2018	65123
2019	64561
2020	63175
2021	62152

黄河流域甘肃段产业结构如图10所示,2018~2021年,黄河流域甘肃段产业结构表现为第一产业比重持续增加,第二产业比重整体下降,第三产业比重基本保持不变,且为黄河流域甘肃段经济发展最主要的支撑力量。随着社会发展,城镇化进程加快、人口数量增加,导致黄河流域甘肃段水质治理难度增大。Pearson相关性结果表明(图9),第一产业、第三产业和生活污水排放与总氮指标呈正相关关系,进一步说明了第一产业、第三产业和生活污水排放是总氮指标的重要影响因素。

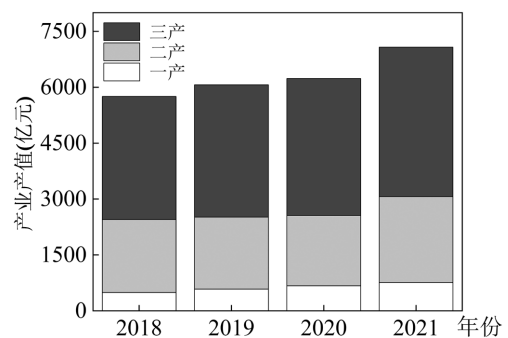


图10 黄河流域甘肃段产业结构

Fig.10 Industrial structure of the Gansu section of the Yellow River Basin

## 4 讨论

### 4.1 景观格局对甘肃省黄河流域干支流水质的影响

针对甘肃省黄河干支流景观格局指数与水质的相关性研究,并通过RDA分析解释结果可得,景观组成类型斑块的聚集度和连通性越强,水质越好;与此相反,景观组成类型斑块的破碎化程度和离散聚合程度越高,水质越差。景观格局指数的有效性不仅受尺度效应、生态意义可解释性,还受土地分类的不确定性影响,导致不同的研究者会有不同的结论<sup>[37]</sup>,且景观格局对水质的影响侧重于空间构型特征<sup>[38]</sup>。已有研究表明<sup>[39]</sup>,甘肃省黄河干支流在不同空间尺度的河岸带缓冲区下,土地利用类型的差异性不大,草原、农田和水域面积占比较大,随着空间尺度增大,草原面积略有增加,越大的空间尺度下SHDI与PD越稳定。此外,由于黄河流域甘肃段植被覆盖率较低,水土流失问题较严重,氨氮及有机质会随暴雨冲刷进入水质,从而污染水质,建设用地越多,景观破碎化

程度越高,导致水中有机物、微生物含量升高。2021年崆峒峡水库水质监测点总氮指标为Ⅰ类水质,参考甘肃省水资源公报,这可能与当年水库蓄水总量变化有关。

2018~2021年甘肃省黄河干支流水质总体改善,这与前人的研究结果高度一致,很可能与严格的生态治理有关<sup>[18]</sup>。为改善河流水质,在流域尺度上,增加城镇用地面积和林地面积的同时,还应减少城镇用地和林地的分散度;在缓冲区尺度上,增加林地面积、减少城镇面积和水域面积的分散度的同时,还应减少水域面积和林地面积的分散度、增强城镇用地的分散度<sup>[40]</sup>。

本研究以单一尺度对景观格局对水质影响进行了分析,通过干流 5km,支流 3km 的尺度对河道景观格局进行了分析,并与各水质指标进行了相关性分析和冗余分析,尚无法揭示水质与景观格局的耦合机理。景观格局对水质的影响是多过程、共同作用的结果,具有很大不确定性,对于最优解释的空间尺度目前仍无一致的定论,未来通过开展不同尺度下多种景观格局、气候、土壤性质对水质影响的深入研究,应用调查和水质模型等方法,将有助于揭示二者间的耦合机理。

#### 4.2 社会经济对甘肃省黄河流域干支流水质的影响

甘肃省黄河干支流氨氮、总磷、溶解氧和高锰酸钾指数在 2018~2021 年趋于稳定,表明氨氮控制较好,而总氮污染仍需进一步治理。通过加强对氮源污染的治理,特别是控制产业废水排放,以持续改善水质。兰州作为黄河流域甘肃段的重要城市,曾频发水污染事故,但过去 20 年在黄河干流治理上取得了显著成效。引调水工程缓解了兰州、白银等区域的用水压力<sup>[41]</sup>;持续推进的水土流失治理、退耕还林还草工程等使区域 NDVI 均值和生态弹性度均得到了提升<sup>[42]</sup>。过去 20 年,甘肃高质量发展水平整体呈上升趋势,但市域高质量发展水平存在明显差异,黄河流域甘肃段尤为突出。黄河流域甘肃段内的景观生态风险值整体处于较低水平,且高风险-低水平发展主要分布在渭河等水系<sup>[43]</sup>。2017 年,工业污染的 COD 排放源主要在定西市的安定区、天水市的麦积区和兰州市的西固区,水质指标中总氮、氨氮和总磷排放源主要集中在兰州市的西固区、红古区和安宁

区<sup>[44]</sup>; 2018 年,兰州城区规模以上工业销售利润达 7.2%,比 2000 年大幅提高;并且由于水污染得到有效治理,黄河兰州段已达Ⅲ类水标准,但甘肃省黄河支流仍存在水污染问题。

由于农牧业为研究区的主要经济支撑,磷肥使用量较大,农用地土壤中含磷量较高,导致甘肃省黄河干支流总磷指标较高<sup>[45]</sup>。农田径流是黄甘肃省黄河干支流的氮型面源污染的主要污染途径,总氮污染来源主要为城镇生活和农田径流,氨氮污染主要来源于农村生活,总磷污染主要受水土流失和农田径流影响,化学需氧量主要污染途径为牲畜养殖<sup>[46]</sup>。随着海拔降低,水中营养盐浓度增高<sup>[47]</sup>,导致高锰酸钾指数高值区主要存在于研究区北部和南部部分区域。因此,进一步加强对黄河流域甘肃段各级支流的生态保护至关重要,以更好地维护甘肃省黄河流域各支流的水质健康。

本研究以甘肃省黄河干支流各监测点水质数据,开展了水质变化差异及影响因素分析工作,分析了水质特征,得到主要污染物,对污染物来源进行了分析,但仍无法区分面源污染与点源污染对水质影响占比。因此,对甘肃省黄河干支流水质分析,仍需进一步对流域内面源与点源污染物进行调查研究。

## 5 结论

5.1 2018~2021 年甘肃省黄河干支流水质整体好转,但总氮污染仍然严重,干流水质指标总体趋于稳定,冬季水质优于其他季节;泾河水质指标趋于稳定,洮河水质指标浓度呈增长趋势,渭河氨氮、总磷和高锰酸钾指数稳定,但总氮劣于Ⅴ类水质标准,庄浪河主要水质指标均趋于稳定。影响甘肃省黄河干支流水质的主要指标为总氮,其年均浓度在 2019 年(4.13mg/L)和 2020 年(4.13mg/L)远高于 2018 年(3.35mg/L)和 2021 年(3.67mg/L),均属于Ⅴ类标准,高锰酸钾指数、溶解氧、化学需氧量、总磷、氨氮等 5 种水质指标均满足Ⅲ类水质标准。

5.2 水质指标与景观组成斑块类型的破碎化存在显著的相关性,其中景观破碎度对水质的影响更为显著。聚集度和连通性越强,水质越好;破碎化程度和离散聚合程度越高,水质污染风险越大。此外,氨氮、总磷、高锰酸钾指数和化学需氧量指标主要受农村生活影响,总氮和溶解氧指标主要受城镇生活和工

业生产影响。

**5.3 甘肃省黄河干支流水质表现出显著的空间异质性,氮污染主要存在于渭河、泾河和庄浪河流域,洮河水质指标浓度总体趋于增长,且总氮、氨氮及总磷指标存在显著的空间分布特征.到2020年,35个水质监测点总氮年均浓度均为III类水质标准限值及以上,其余水质年平均浓度指标基本达到II类水质标准.总氮和氨氮高浓度区主要分布在流域中部和东部局部地区,总磷在流域大部分地区均很高,化学需氧量值空间差异大,且高值区主要集中在兰州市、临夏回族自治州中部的局部地区。**

#### 参考文献:

- [1] 丁一桐,潘保柱,赵耿楠,等.黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价[J].中国环境科学,2021,41(2):891-901.  
Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, et al. Phytoplankton in the mainstem of the Yellow River: Community characteristics and bioassessment of water quality [J]. China Environmental Science, 2021,41(2):891-901.
- [2] 易帆,陈旻,何晓枫,等.流域土地利用分析中空间尺度对水质的影响[J].中国环境科学,2023,43(8):4280-4291.  
Yi F, Chen M, He X F, et al. Effect of spatial scale on water quality in watershed land use analysis [J]. China Environmental Science, 2023,43(8):4280-4291.
- [3] 黄鑫,程文仕,李晓丹,等.干旱内陆河流域土地利用转型的生态环境效应变化特征及其驱动因素探测[J].水土保持研究,2023,30(2):324-332.  
Huang X, Cheng W S, Li X D, et al. Recognition on the changes and driving factors of eco-environmental effect of land Use transformation in arid inland river basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):324-332.
- [4] 周添红,苏思霖,马凯,等.典型区域土地利用/景观格局对黄河上游水体TN的影响[J].环境科学,2024,45(10):5768-5776.  
Zhou T H, Su S L, Ma K, et al. Influence of typical regional land use / landscape pattern on water TN of the Upper Yellow River [J]. Environmental Science. 2024,45(10):5768-5776.
- [5] Pei W, Lei Q L, Zhao Y, et al. Effect of landscape pattern on river water quality under different regional delineation methods: A case study of Northwest Section of the Yellow River in China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,50:101536.
- [6] Wang H, Xiong X, Wang K H, et al. The effects of land use on water quality of alpine rivers: A case study in Qilian Mountain, China. [J]. The Science of the Total Environment, 2023,875:162696.
- [7] 朱颖,王怡,贺凤春,等.景观格局对阳澄湖小流域水质变化影响的空间尺度效应[J].水土保持通报,2021,41(2):105-113.  
Zhu Y, Wang Y, He F C, et al. Spatial scale effect of landscape pattern on water quality change in Yangcheng Lake Watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(2):105-113.
- [8] 徐建锋,尹炜,闫峰陵,等.农业源头流域景观异质性与溪流水质耦合关系[J].中国环境科学,  
Xu J F, Yin W, Yan F L, et al. The coupling relationship between landscape heterogeneity and stream water quality in an agricultural catchment [J]. China Environmental Science, 2016,36(10):3193-3200.
- [9] 刘可喧,王冬梅,常国梁,等.多空间尺度景观格局与地表水质响应关系研究[J].环境科学学报,2022,42(2):23-31.  
Liu K X, Wang D M, Chang G L, et al. Study on the relationship between landscape pattern and surface water quality at multiple spatial scales [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(2):23-31.
- [10] 胡琳,李思悦.不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响[J].生态环境学报,2021,30(7):1470-1481.  
Hu L, Li S Y. Scale effects of land use structure and landscape pattern on water quality in the Longchuan River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(7):1470-1481.
- [11] 王小平,张飞,李晓航,等.艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析[J].生态学报,2017,37(22):7438-7452.  
Wang X P, Zhang F, Li X H, et al. Correlation analysis between the spatial characteristics of landscape pattern and surface-water quality in the Ebinur Lake area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(22):7438-7452.
- [12] 顾洋,张平究,秦风约,等.多时空景观格局对南淝河水质的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(7):1580-1589.  
Gu Y, Zhang P J, Qin F Y, et al. Impact of multi-temporal and spatial landscape patterns on the water quality of the Nanfei River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(7):1580-1589.
- [13] 王宏雪,武玮,王琦琨,等.不同河岸缓冲区尺度下土地利用方式对嘎呀河流域水质的影响[J].应用生态学报,2023,34(12):3203-3213.  
Wang H X, Wu W, Wang Q K, et al. Impact of land use pattern on water quality under different riparian buffer zone scales in Gaya River Basin, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12):3203-3213.
- [14] 夏明珠,薛万来,黄俊雄,等.北京白河流域不同空间尺度下水质对土地利用的响应关系[J].环境科学研究,2024,37(4):764-775.  
Xia M Z, Xue W L, Huang J X, et al. Relationship between water quality and land use responses at different spatial scales in White River Basin in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(4):764-775.
- [15] Qiu M, Zuo Q, Wu Q, et al. Water ecological security assessment and spatial autocorrelation analysis of prefectural regions involved in the Yellow River Basin [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):5105.
- [16] 徐发凯,何丽,王一帆,等.2010~2019年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征[J].水资源保护,2021,37(4):44-50.  
Xu F K, He L, Wang Y F, et al. Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream from 2010 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):44-50.
- [17] Zhao M M, Wang S, Chen Y, et al. Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches [J]. Science of the Total Environment, 2020,722(C):137861.
- [18] Liu S S, Qiu Y, Fu R, et al. Identifying the water quality variation characteristics and their main driving factors from 2008 to 2020 in the Yellow River Basin, China [J]. Environmental science and pollution research international, 2023,30(25):66753-66766.
- [19] 易帆,陈旻,何晓枫,等.流域土地利用分析中空间尺度对水质的影响[J].中国环境科学,2023,43(8):4280-4291.  
Yi F, Chen M, He X F, et al. Effect of spatial scale on water quality in watershed land use analysis [J]. China Environmental Science, 2023, 43(8):4280-4291.
- [20] 郑法,黄福林,陈泽恒,等.基于LUCC和景观格局变化的广西山口红树林湿地动态研究[J].热带海洋学报,2024,43(4):165-173.  
Zheng F, Huang F L, Chen Z H, et al. Mangrove wetland dynamics in Shankou, Guangxi based on LUCC and landscape pattern change [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2024,43(4):165-173.
- [21] Quan J L, Xu Y X, Ma T, et al. Improving surface water quality of the Yellow River Basin due to anthropogenic changes [J]. The Science of the Total Environment, 2022,836:155607.
- [22] Du H B, Ji X P, Chuai X W. Spatial Differentiation and Influencing Factors of Water Pollution-Intensive Industries in the Yellow River Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(1):497-497.
- [23] 李文婧,周凌峰,赵晓丽,等.黄河流域水环境问题研究现状、挑战与展望[J].环境科学研究,2024,37(1):32-41.  
Li W J, Zhou L F, Zhao X L, et al. Current status and challenges in

- diagnostic research on water environment problems in the Yellow River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024,37(1):32-41.
- [24] 赵诚诚,潘亮虎.基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化 [J]. *生态学报*, 2022,42(17):6973-6984.  
Zhao C C, Pan J H. Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecological supply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):6973-6984.
- [25] 陆中柱,康 哲,李 巍等.黄河流域水稀缺风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(6):3455-3465.  
Lu Z G, Kang Z, Li W, et al. Water scarcity risk assessment in the Yellow River basin [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(6): 3455-3465.
- [26] 嵇晓燕,孙宗光,聂学军,等.黄河流域近 10a 地表水质变化趋势研究 [J]. *人民黄河*, 2016,38(12):99-102.  
Ji X Y, Sun Z G, Nie X J, et al. Study on surface water quality variation trend of Yellow River Basin in recent 10 years [J]. *Yellow River*, 2016, 38(12):99-102.
- [27] 吕振豫,穆建新.黄河流域水质污染时空演变特征研究 [J]. *人民黄河*, 2017,39(4):66-70,77.  
Lv Z Y, Mu J X. Study on spatial and temporal evolution feature of water quality in Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2017,39(4):66-70,77.
- [28] 李玉红.黄河流域干支流水污染治理研究 [J]. *经济问题*, 2021, (5):9-15.  
Li Y H. Study on water pollution control of mainstream and branches in the Yellow River Basin [J]. *On Economic Problems*, 2021,(5):9-15.
- [29] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].  
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [30] 杨 玖,代 佼,龚兴涛,等.基于多种方法的长江上游小流域水质综合评价 [J]. *中国环境监测*, 2023,39(S1):19-26.  
Yang J, Dai J, Gong X T, et al. Comprehensive evaluation of water quality in small watershed of upper Yangtze River based on multiple methods [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023,39(S1):19-26.
- [31] 黄 硕,郭青海.城市景观格局演变的水环境效应研究综述 [J]. *生态学报*, 2014,34(12):3142-3150.  
Huang S, Guo Q H. Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(12):3142-3150.
- [32] 翟 壮,张同亮,蔡文倩,等.祖厉河流域水质评价与时空变化分析 [J]. *环境污染与防治*, 2023,45(7):992-998,1006.  
Zhai Z, Zhang T L, Cai W Q, et al. Water quality evaluation and spatial-temporal variation analysis in Zuli River Basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2023,45(7):992-998,1006.
- [33] 黄 宏,商 栩,梅 琨,等.基于 Monte Carlo 模拟的河流水质评价——以温瑞塘河为例 [J]. 2019,39(5):2210-2218.  
Huang H, Shang X, Mei K, et al. River water quality assessment based on Monte Carlo simulation: A case study of Wen-Rui Tang River [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(5):2210-2218.
- [34] 赵增锋,付永亮,邱小琼,等.黄河流域宁夏段地表水氟污染特征与风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(11):5800-5811.  
Zhao Z F, Fu Y L, Qiu X C, et al. Characteristics and risk assessment of surface water fluorine pollution in Ningxia section of Yellow River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(11):5800-5811.
- [35] 米秋菊,边玉明,甄立鹏,等.土地利用结构与景观格局对黎河水质的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2024,45(3):78-85.  
Mi Q J, Bian Y M, Zhen L P, et al. Impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in Lihe River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024,45(3):78-85.
- [36] 李 雪,张 婧,于婉晴,等.京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响 [J]. *生态学报*, 2021,41(13):5242-5253.  
Li X, Zhang J, Yu W Q, et al. Impact of the urban landscape pattern in the Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal on the river aquatic environment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(13):5242-5253.
- [37] 王 凯,迪丽努尔·阿吉,李平平,等.土地利用结构与景观格局对开都河水质的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2025,46(1):45-57.  
Wang K, Dilinuer A J, Li P P, et al. Impact of land use structure and landscape pattern on the water quality of Kaidu River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2025,46(1):45-57.
- [38] 刘金宝,刘 轩,孙增慧,等.丹江口水库土地利用与水质变化响应关系研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2023,38(2):285-296.  
Liu J B, Liu X, Sun Z H, et al. Study on the relationship between land use and water quality change in Danjiangkou Reservoir [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023,38(2):285-296.
- [39] 尚婷婷,温 飞,黄 莉,等.黄河流域甘肃段面源污染估算与空间分析 [J]. *环境监控与预警*, 2022,14(3):27-34.  
Shang T T, Wen F, Huang L, et al. Estimation and spatial analysis of diffuse pollution in Gansu Section of Yellow River Basin [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2022,14(3):27-34.
- [40] 巩 杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(8):2153-2160.  
Gong J, Xie Y C, Zhao C X, et al. Landscape ecological risk assessment and its spatiotemporal variation of the Bailongjiang watershed, Gansu [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(8): 2153-2160.
- [41] 王力磊.跨流域调水生态环境影响模糊评价模型 [J]. *东北水利水电*, 2020,38(7):22-26,72.  
Wang L L. Ecological environment impact assessment model for inter-basin water transfer [J]. *Water Resources and Hydropower of Northeast China*, 2020,38(7):22-26,72.
- [42] 高健翎,高 燕,马红斌,等.黄土高原近 70a 水土流失治理特征研究 [J]. *人民黄河*, 2019,41(11):65-69,84.  
Gao J L, Gao Y, Ma H B, et al. Study on characteristics of soil and water loss control in Loess Plateau in recent 70years [J]. *Yellow River*, 2019,41(11):65-69,84.
- [43] 孙 静.甘肃省不同流域景观生态风险与高质量发展的相关性研究 [D]. 兰州:甘肃农业大学, 2023.  
Sun J. Study on correlation between landscape ecological risk and the high quality Development in different watersheds of Gansu Province [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
- [44] 赵晓同,苏军德,王 建,等.甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(10):4926-4941.  
Zhao X J, Su J D, Wang J, et al. A study on the relationship between supply-demand relationship of ecosystem services and impact factors in Gansu Province [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(10): 4926-4941.
- [45] 吕丽霞.黄河甘肃段水体总磷的变化趋势研究 [J]. *甘肃水利水电技术*, 2020,56(1):16-20.  
Lv L X. Study on the trend of total phosphorus in the water body of Gansu section of the Yellow River [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2020,56(1):16-20.
- [46] 马 凯.黄河甘肃段水质风险评价及其与土地利用类型响应关系研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2023.  
Ma K. Water quality risk evaluation of the gansu section of the Yellow River and its relationship with the response of land use types [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [47] 王 昱,王 旭,冯 起,等.黄河甘肃段底栖动物群落结构及水质评价 [J]. *中国沙漠*, 2023,43(4):146-156.  
Wang Y, Wang X, Feng Q, et al. Macroenthos community structure and water quality evaluation in Gansu section of Yellow River Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2023,43(4):146-156.

**作者简介:** 张晋博(2003-),男,甘肃天水人,中国科学院大学硕士研究生,主要从事流域水资源评价与管理方向研究.zhangjinbo24@mails.ucas.ac.cn.