

DOI: 10.20103/j.stxb.202502080252

师艳丽, 闫祯, 张依章, 平令文, 陈振宇, 张佳文, 李旭. 黄河中游典型丘陵沟壑区着生藻类群落特征及驱动因素. 生态学报, 2025, 45(22): - .
Shi Y L, Yan Z, Zhang Y Z, Ping L W, Chen Z Y, Zhang J W, Li X. Characteristics and driving factors of periphytic algae communities in typical hilly and gully areas of the middle reaches of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

黄河中游典型丘陵沟壑区着生藻类群落特征及驱动因素

师艳丽¹, 闫 祯^{1,*}, 张依章^{1,2}, 平令文¹, 陈振宇¹, 张佳文¹, 李 旭¹

1 天津市滨海新区环境创新研究院, 天津 300450

2 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:为探究黄河中游陕北黄土高原地区典型流域着生藻类群落结构及其影响因素,于2023年11月(秋季)和2024年3月(春季)对延安市境内黄河流域一、二级支流共8条重点河流布设69个监测断面进行采样分析,首次探索该区域着生藻类构成,并分析水环境因子与群落之间的关系。结果表明,共检出着生藻类6门137种,硅藻门、绿藻门、蓝藻门分别占56.2%、20.4%、19.0%,着生藻类物种数春季>秋季;优势种共计3门36种,主要为硅藻类;秋、春季着生藻类平均密度分别为 3.88×10^5 个/cm²、 2.57×10^5 个/cm²,秋季密度高于春季;秋季维持群落稳定的关键种为针状菱形藻(*Nitzschia acicularis*)、针状拟指球藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、漂浮泽丝藻(*Limnothrix planctonica*),春季为湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*);春季着生藻群落之间相互作用较秋季强,群落稳定性和恢复性也更强;流速是秋、春季影响着生藻类群落结构共同的主要环境因子,此外, NH₃-N、DO、TP是秋季影响着生藻类群落结构的主要环境因子,水温、pH是春季影响着生藻类群落结构的主要环境因子。研究结果对流域水生态管理制度的制定、水生态系统稳定性与水生生物多样性维持提供了科学数据支撑,对促进黄河流域生态文明建设和高质量发展具有重要意义。

关键词:着生藻类;黄河中游;延安;多样性;生态网络分析

Characteristics and driving factors of periphytic algae communities in typical hilly and gully areas of the middle reaches of the Yellow River

SHI Yanli¹, YAN Zhen^{1,*}, ZHANG Yizhang^{1,2}, PING Lingwen¹, CHEN Zhenyu¹, ZHANG Jiawen¹, LI Xu¹

1 Research Institute for Environmental Innovation (Binhai, Tianjin), Tianjin 300450, China

2 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Yan'an City, as an important area in the middle reaches of the Yellow River Basin, and it belongs to the Loess Plateau region in northern Shaanxi, China. This study took eight watersheds of Yan'an (i.e. the first tributaries are Qingjian River, Yanhe River, Yunyan River, Shiwang River and Jushui River, and the second tributaries are Beiluo River, Hulu River and Juhe River) as the objects to explore the community structure of periphytic algae and its influencing factors. Sampling analysis was conducted at 69 monitoring sections in 8 key rivers of the first and second tributaries of the Yellow River in Yan'an City in November 2023 (autumn) and March 2024 (spring). This was the first time to explore the community structure composition of periphytic algae in this area and analyze the relationship between water environmental factors and community. The results showed that a total of 137 species of periphytic algae belonging to 6 phyla were identified, among which the phyla Bacariophyta, Chlorophyta, and Cyanophyta accounted for 56.2%, 20.4%, and 19.0%,

基金项目:国家重点研发计划课题(2023YFC3205702)

收稿日期:2025-02-08; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanzhen0818@outlook.com

respectively, the number of periphytic algae species was higher in spring than in autumn. A total of 36 species belonging to 3 phyla were identified as dominant species, mainly diatoms. The average density of periphytic algae in autumn and spring was $3.88 \times 10^5 \text{ ind/cm}^2$ and $2.57 \times 10^5 \text{ ind/cm}^2$, respectively, and the density in autumn was significantly higher than that in spring. The key species maintaining the stability of the community in autumn were *Nitzschia acicularis*, *Dactylococcopsis acicularis*, and *Nothrix planctonica*, while in spring, it was *Pseudanabaena limnetica*. The interaction between the periphytic algae communities in spring was stronger than that in autumn, and the stability and resilience of the communities were also stronger in spring. The flow rate was not only the main environmental factor influencing the structure of the periphytic algae community in autumn and spring, but also a common environmental factor that affects the structure of periphytic the algae community in autumn and spring. In addition, ammonia nitrogen, dissolved oxygen, and total phosphorus were the main environmental factors affecting the structure of the living algae community in autumn, and water temperature and pH value were the main environmental factors affecting the structure of the algae community in spring. The research results provided scientific data support for the formulation of water ecological management systems in the basin, the stability of water ecosystems and the maintenance of aquatic biodiversity. It was of great scientific significance for understanding water ecological functions and promote the construction of ecological civilization and high-quality development of the Yellow River Basin.

Key Words: periphytic algae; middle reaches of the Yellow River; Yan'an; diversity; ecological network analysis

在黄河流域生态保护和高质量发展成为重大国家战略的背景下,确保黄河流域的生态功能和生物多样性保护是环保工作的重点,黄河流域干旱、半干旱地区,自然生态本底脆弱且敏感,生态系统类型复杂多样^[1-2],恢复难度大且过程缓慢。黄河中游属水土流失最严重区域,加之人类活动频繁,对水质及淡水生态系统产生重大影响^[3],导致河流生态系统生境破碎化,进而影响水生生物的生存和繁衍^[4],致使水生生物群落结构特征、多样性和稳定性在一定程度上发生改变,面临较大的环境压力。水环境、水生态、水生生物多样性调查研究是国内外学者关注的焦点^[5-6]。延安市地处黄河中游,属典型的黄土高原丘陵沟壑区,区域内特殊的自然地理条件,河流生态环境脆弱^[7],社会经济的快速发展,人类对流域的干扰逐渐增加,生态功能降低,生物多样性受损,生态系统健康受到严重影响。着生藻类是一种生活在水体基质上的附着生物,是水生态系统中重要的生物组成部分和初级生产者之一^[8],其生境相对较为稳定,对环境变化响应快,群落变化趋势可预测性强^[9],是研究河流水环境氮、磷等营养盐要素的重要指示物种,为评估生态完整性提供了一种流动/滞留水体全年性的有效评价方法,尤其适合当其他指示生物无法生存时的敏感指标。着生藻类群落与水环境因子之间关系密切,在河流生态系统评价中的作用受到日益重视^[10]。了解并掌握着生藻类群落结构、时空动态及影响因素,对流域维持水生生物多样性和水生态系统的管理与维护具有重要意义。

目前关于延安市生态环境方面的研究主要集中于生态治理修复^[11-12]、生态环境质量^[13]、土地利用及生境^[14-15]、浮游动植物^[16-19]、鱼类多样性^[20]等方面,且有关水生生物多样性的研究主要聚焦在延河流域,如李亚妮等^[16]于2014年鉴定出浮游生物38种;谢海莎等^[17]2019年丰水期鉴定出浮游植物7门49种,浮游动物4门19种,从上游到下游浮游生物优势种呈增多状态;卢悦等^[18]于2021年春、秋季共检出浮游植物7门253种,贺瑶等^[19]于2021年春、秋季共鉴定出底栖动物4门113种,王鹤等^[20]检出浮游植物7门61种,浮游动物4门41种,鱼类1目2科6属。以上学者对延河流域浮游动植物、底栖和鱼类物种多样性开展不同程度的调查,弥补了水生生物资源空白,为保护延河生态提供科学参考,但对于延安市境内延河及其他流域着生藻类群落分布情况的调查尚未见相关报道,缺乏针对区域层面的系统性调查,水生生物多样性地域特征揭示依然不够。鉴于着生藻类对水生态系统健康具有良好的指示作用及填补延安市水生生物数据空白,本研究于2023年秋季和2024年春季针对延安市境内重点流域进行着生藻类与水环境因子野外调查,研究着生藻类物种组成、多样性、群落稳定性,探讨着生藻类群落结构与水环境之间的相关性,以期为该区域乃至黄河中游黄土高

原区水生生物保护和恢复提供科学依据,对于促进黄河流域生态文明建设具有重要意义。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

延安市(107°38′59″E—110°34′46″E, 35°20′39″N—37°53′31″N)位于陕西省北部,黄河中游,黄土高原中南部^[21],总面积3.7万 km²,占全省总面积的18%。属半湿润半干旱大陆性季风气候,北部和南部分别属半干旱、半湿润地区,多年平均降水量为562.1 mm,降雨集中在7—9月,且多为暴雨^[15],年平均气温9.9℃,年平均最高温和最低温分别为17.2℃和4.3℃,最热月(7月)月均温23.1℃,最冷月(1月)月均温-5.5℃。地势西北高东南低,平均海拔1200 m左右,属于典型的黄土丘陵沟壑区,北部以黄土梁峁、沟壑为主,占全市总面积72%,南部以黄土塬沟壑为主,占总面积19%。境内河流均属黄河流域水系,河流主要特征顺应地形总趋势,支、毛、冲沟极为发达,大多属季节性沟道,河段多弯曲,主要河流平均弯曲系数在1.47—1.5之间。

为全面了解延安市境内河流着生藻类群落结构特征,根据《水生态监测技术要求 淡水着生藻类(试行)》(2022年)及监测断面实际情况,研究区涉及延安市境内黄河流域一级支流(清涧河、延河、云岩河、仕望河、淤水河)及二级支流(北洛河、葫芦河、沮河)8条重点河流,于干、支流共布设监测断面69个(图1)。

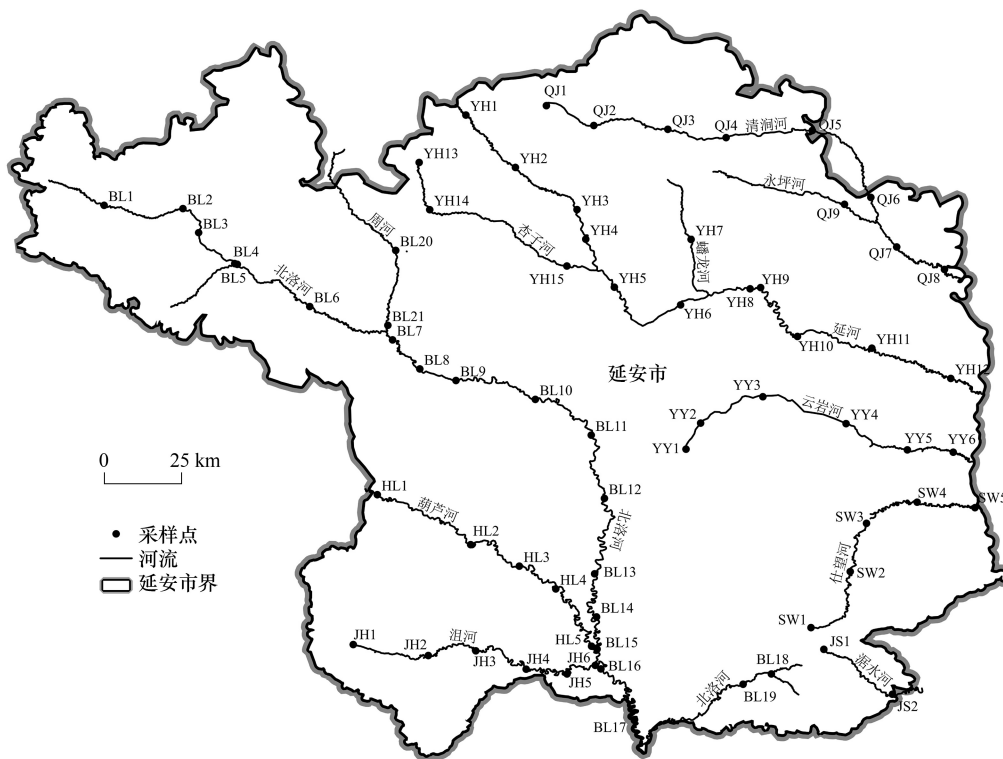


图1 延安市重点流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in key river basins of Yan'an City

1.2 样品采集

分别于2023年10月秋季(平水期)及2024年3月春季(枯水期)开展8条重点河流69个监测断面水质及着生藻类调查采样。水样利用采水器采集0—20 cm地表水,收集于聚乙烯塑料瓶,4℃保存,水样容器使用前用10%(质量分数)HNO₃浸泡8 h后洗净烘干。着生藻类采集在河流各采样点上下游50 m范围内,挑选5块石头,用硬毛牙刷刮取15.9 cm²(用直径为4.5 cm的圆形塑料环比量)的着生藻类,持续刮刷30秒以上,用蒸馏水冲洗入白瓷盘中,然后移至100 mL广口塑料瓶中,加入体积分数为5%的甲醛溶液固定,送至实验室鉴

定分析,依据形态学鉴定方法,利用显微镜对提取的藻种进行观察,根据细胞形态的大小、形状、颜色等分类,藻种鉴定参考文献^[22—26]。

1.3 水体理化指标分析

水温($T, ^\circ\text{C}$)、流速($V, \text{m/s}$)、pH、溶解氧($\text{DO}, \text{mg/L}$)现场测定;高锰酸盐指数($\text{COD}_{\text{Mn}}, \text{mg/L}$)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}, \text{mg/L}$)、总氮($\text{TN}, \text{mg/L}$)、总磷($\text{TP}, \text{mg/L}$)样品低温保存运送至实验室 48 h 内完成测试,方法如表 1。

表 1 水体理化指标分析方法
Table 1 Analysis method of physical and chemical index of water

水质参数 Water quality parameters	测定方法及依据 Determination methods and standards	检出限 Detection limit	单位 Unit
水温 Water temperature	水质 水温的测定 温度计或颠倒温度计测定法 GB/T 13195—1991 (温度计法)	/	$^\circ\text{C}$
流速 Flow velocity	流速仪(FP111)	/	m/s
水体 pH Water pH	水质 pH 值的测定 电极法 HJ 1147—2020	/	无量纲
溶解氧 Dissolved oxygen	水质 溶解氧的测定 电化学探头法 HJ 506—2009	/	mg/L
高锰酸盐指数 Permanganate index	水质 高锰酸盐指数的测定 GB/T 11892—1989	0.5	mg/L
氨氮 Ammonia nitrogen	水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法 HJ 535—2009	0.025	mg/L
总氮 Total nitrogen	水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 HJ 636—2012	0.05	mg/L
总磷 Total phosphorus	水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法 GB/T 11893—1989	0.01	mg/L

1.4 数据分析

研究区采样点分布图绘制使用 ArcGIS 10.5,着生藻类群落结构图绘制采用 Origin 2017, Mcnaughton 优势指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)^[27—28]及 Margalef 丰富度指数(D)^[29]分别对着生藻类优势种、多样性、均匀度、丰富度进行分析,选取优势度指数 $Y>0.02$ 的为优势种。采用 SPSS 27.0 方差分析(ANOVA)对不同时期水环境因子差异进行比较;Canoco 5.0 进行冗余分析(RDA)或典型相关分析(CCA)探讨着生藻类与水环境因子的关系,且除 pH 值外,所有数据均采用 $\lg(x+1)$ 转换,分析前先对物种信息进行 DCA 分析,若梯度长度 >3 采用 CCA 分析,梯度长度 <3 采用 RDA 分析^[30]。生态网络分析为探索复杂群落中的生态相互作用提供了一个有力的工具,该分析采用基于 RMT(随机矩阵理论)的方法^[31],着生藻群落在秋季和春季独立构建生态网络,采用 Gephi 0.9.2 软件进行网络可视化,最高中心度节点为关键种^[32]。为了评估生态网络的鲁棒性,每个节点的丰度加权平均相互作用强度($w\text{MISi}$)^[33],式中, b_j 表示物种 j 的相对丰度, S_{ij} 表示物种 i 与 j 的关联强度,用 Pearson 相关系数量化;将 $w\text{MISi}$ 值 ≤ 0 的节点排除在网络之外,剩余节点的比例作为网络的鲁棒性。

$$w\text{MISi} = \frac{\sum_{j \neq i} b_j S_{ij}}{\sum_{j \neq i} b_j}$$

2 结果与分析

2.1 水体理化指标时空分布特征

单因素方差分析表明,秋季流域之间总氮呈显著性差异($P<0.05$),其他指标在空间上差异不显著(表 2)。春季流域之间水温、pH、 COD_{Mn} 、总氮呈极显著差异($P<0.01$),流速、DO、氨氮、总磷呈显著性差异($P<0.05$)(表 3)。调查流域秋季、春季水温、流速、pH、DO 呈极显著差异($P<0.01$),氨氮呈显著性差异($P<0.05$), COD_{Mn} 、总氮、总磷在 $P<0.01$ 或 $P<0.05$ 水平上则未显示出季节性差异(表 4)。

表 2 延安市重点流域秋季水环境指标特征

Table 2 Characteristics of water environmental indicators of key River Basins in Yan'an City in autumn

指标 Indicator	清涧河 Qingjian River	延河 Yanhe River	云岩河 Yunyan River	仕望河 Shiwang River	淤水河 Jushui River	北洛河 Beiluo River	葫芦河 Hulu River	沮河 Juhe River	<i>P</i>
水温 Water temperature	14.4±2.3	15.7±1.5	14.1±2.3	13.9±1.8	11.3±0.7	13.5±2.7	12.8±2.0	15.4±2.3	0.05
流速 Flow velocity	0.5±0.4	0.5±0.2	0.6±0.4	0.8±0.5	0.3±0.3	0.5±0.3	0.6±0.2	0.7±0.4	0.26
pH Water pH	8.5±0.3	8.3±0.2	8.4±0.2	8.4±0.3	8.2±0.1	8.4±0.4	7.9±0.6	8.6±0.2	0.07
DO Dissolved oxygen	9.9±1.0	8.6±2.2	10.7±1.8	10.0±0.7	9.5±2.1	9.2±1.1	8.6±0.5	9.7±1.2	0.10
COD _{Mn} Permanganate index	3.4±1.3	2.8±0.4	3.0±0.6	2.2±0.8	3.0±1.4	2.6±0.8	2.6±0.5	2.3±0.5	0.11
氨氮 Ammonia nitrogen	0.50±0.74	0.36±0.25	0.14±0.12	0.22±0.17	0.15±0.01	0.27±0.21	0.11±0.05	0.16±0.08	0.27
总氮 Total nitrogen	7.44±6.51	3.68±1.50	3.79±1.40	1.86±1.75	3.47±0.57	5.34±3.29	2.62±1.55	1.73±1.26	<0.05
总磷 Total phosphorus	0.07±0.06	0.06±0.04	0.02±0.01	0.08±0.04	0.03±0.02	0.07±0.06	0.03±0.01	0.03±0.03	0.11

表中监测指标单位同表 1;DO:溶解氧 Dissolved oxygen;COD_{Mn}:高锰酸盐指数 Permanganate index

表 3 延安市重点流域春季水环境指标特征

Table 3 Characteristics of water environmental indicators of key River Basins in Yan'an City in spring

指标 Indicator	清涧河 Qingjian River	延河 Yanhe River	云岩河 Yunyan River	仕望河 Shiwang River	淤水河 Jushui River	北洛河 Beiluo River	葫芦河 Hulu River	沮河 Juhe River	<i>P</i>
水温 Water temperature	5.8±4.1	4.6±2.1	-3.2±4.0	1.6±6.6	4.7±2.2	6.2±2.9	6.4±3.4	9.0±2.0	<0.01
流速 Flow velocity	0.5±0.5	0.4±0.3	0.5±0.3	0.7±0.5	0.3±0.2	0.3±0.1	0.3±0.1	0.4±0.2	<0.05
pH Water pH	8.4±0.4	8.0±0.6	8.7±0.1	8.5±0.3	8.2±0.1	7.9±0.5	7.8±0.4	7.4±0.5	<0.01
DO Dissolved oxygen	9.1±3.4	9.5±2.9	3.8±3.3	6.6±5.0	6.0±4.2	8.5±2.8	9.2±2.5	6.3±2.3	<0.05
COD _{Mn} Permanganate index	4.1±1.1	2.6±0.8	2.3±0.5	2.6±1.1	1.5±0.7	2.3±0.8	1.8±0.4	2.8±1.1	<0.01
氨氮 Ammonia nitrogen	0.62±0.51	0.46±0.25	0.19±0.04	0.18±0.01	0.17±0.07	0.43±0.26	0.16±0.03	0.43±0.21	<0.05
总氮 Total nitrogen	5.60±2.35	3.87±1.45	3.09±1.03	3.24±1.70	1.0±0.14	6.02±3.23	2.39±0.54	2.52±1.65	<0.01
总磷 Total phosphorus	0.09±0.07	0.05±0.07	0.01±0.0	0.05±0.08	0.01±0.0	0.02±0.02	0.01±0.0	0.03±0.02	<0.05

表 4 延安市重点流域秋、春季水环境指标整体特征

Table 4 Overall characteristics of water environment indicators in key basins of Yan 'an City in autumn and spring

指标 Indicator	秋季 Autumn	春季 Spring	<i>P</i>
水温 Water temperature	14.2±2.3	4.8±4.4	<0.01
流速 Flow velocity	0.5±0.3	0.4±0.3	<0.01
pH Water pH	8.4±0.3	8.1±0.5	<0.01
DO Dissolved oxygen	9.3±1.5	8.1±3.4	<0.01
COD _{Mn} Permanganate index	2.7±0.8	2.6±1.1	0.37
氨氮 Ammonia nitrogen	0.28±0.33	0.40±0.30	<0.05
总氮 Total nitrogen	4.30±3.50	4.33±2.62	0.95
总磷 Total phosphorus	0.06±0.05	0.04±0.05	0.05

2.2 着生藻群落结构特征

延安市境内 8 条重点流域共鉴定出着生藻类 6 门 61 属 137 种(图 2),其中硅藻类 77 种,绿藻 28 种,蓝藻 26 种,裸藻 4 种,金藻和隐藻类各 1 种;秋季检出着生藻类 6 门 38 属 76 种,秋季除淤水河未检出金藻和裸藻外,其他流域 6 大门类均有检出,淤水河物种数(64 种)显著低于其他流域,其余各流域之间物种数相差较小,为 75 种或 76 种;春季检出 4 门 41 属 90 种,金藻和裸藻均未检出,8 条流域硅藻、蓝藻、绿藻和裸藻 4 大门类均有检出,淤水河(67 种)和仕望河(79 种)物种数显著低于其他流域(84—90 种)。秋季和春季各流域均以硅藻为主要藻类,其次为绿藻和蓝藻,整体上物种数春季>秋季。

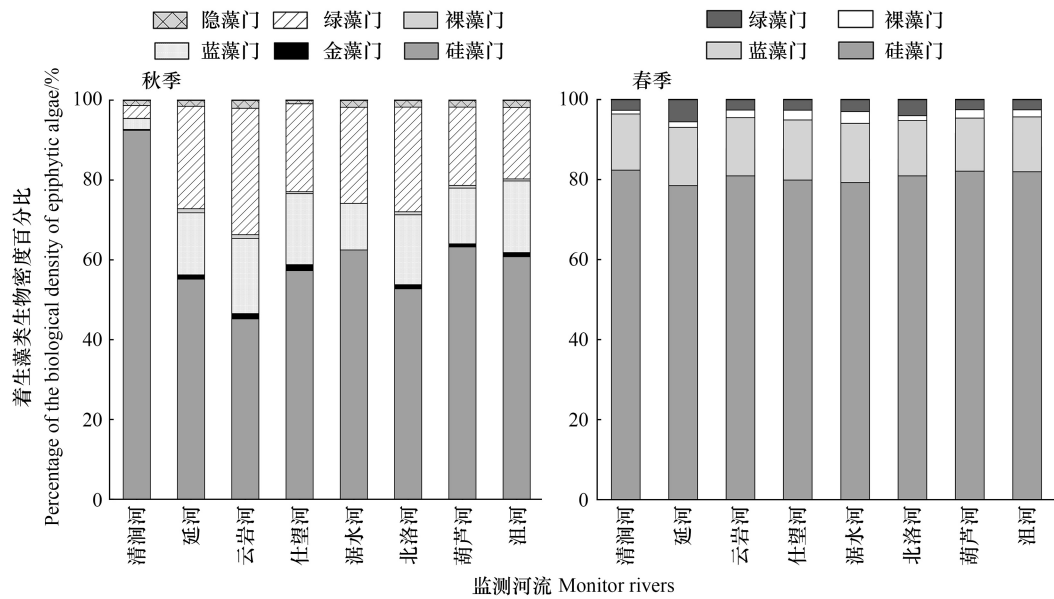


图 2 延安市重点流域着生藻类物种数
Fig.2 Number of algae species in key watersheds of Yan'an City

选取优势度指数 $Y>0.02$ 的着生藻类为优势种,8 条重点流域秋、春季优势种共 3 门 36 种,硅藻为 25 种。其中秋季 3 门 19 种(表 5),主要为硅藻(11 种),其次为蓝藻、绿藻,各 4 种;春季 3 门 21 种(表 6),主要为硅藻(17 种),其次蓝藻(3 种),绿藻仅 1 种。秋、春季共有优势种为微细转板藻(*Mougeotia parvula*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)、淡绿舟形藻(*Navicula viridula*),秋、春季优势种重叠物种较少。

表 5 延安市重点流域秋季着生藻类优势种
Table 5 Dominant algae species in key basins of Yan'an City during autumn

优势种 Dominant species	清涧河 Qingjian River	延河 Yanhe River	云岩河 Yunyan River	仕望河 Shiwang River	淤水河 Jushui River	北洛河 Beiluo River	葫芦河 Hulu River	沮河 Juhe River
卵形双菱藻 <i>Surirella ovata</i>	+	+		+	+	+	+	+
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>	+	+			+	+	+	+
链状弯壳藻 <i>Achnanthyidum catenatum</i>	+	+			+		+	+
系带舟形藻 <i>Navicula cincta</i>	+			+				+
小型异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i>	+				+			
池生菱形藻 <i>Nitzschia stagnorum</i>			+	+				
淡绿舟形藻 <i>Navicula viridula</i>	+							
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>			+					
微型舟形藻 <i>Navicula minima</i>				+				
中型脆杆藻 <i>Fragilaria intermedia</i>				+				
窗纹藻属 <i>sp.Epithemia sp.</i>					+			
假鱼腥藻属 <i>sp.Pseudanabaena sp.</i>	+			+				
漂浮浮丝藻 <i>Limnithrix planctonica</i>			+					
针晶拟指球藻 <i>Dactylococcopsis raphidioides</i>				+				
湖泊浮鞘丝藻 <i>Lyngbya limnetica</i>								+
卷曲纤维藻 <i>Ankistrodesmus convolutus</i>			+					
微细转板藻 <i>Mougeotia parvula</i>			+					
波吉卵囊藻 <i>Oocystis borgei</i>				+				
钝鼓藻 <i>Cosmarium obtusatum</i>					+			

表格中“+”表示该优势种在流域中有检出

表 6 延安市重点流域春季着生藻类优势种

Table 6 Dominant algae species in key basins of Yan'an City during spring

优势种 Dominant species	清涧河 Qingjian River	延河 Yanhe River	云岩河 Yunyan River	仕望河 Shiwan River	淤水河 Jushui River	北洛河 Beiluo River	葫芦河 Hulu River	沮河 Juhe River
异极藻属 <i>sp. Gomphonema sp.</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
淡绿舟形藻 <i>Navicula viridula</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
等片藻属 <i>sp. Diatoma sp.</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
冬生等片藻 <i>Diatoma hiemale</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
窄双菱藻 <i>Surirella angustata</i>	+	+	+		+	+	+	+
偏肿内丝藻 <i>Encyonema ventricosum</i>	+	+	+		+	+	+	+
短小舟形藻 <i>Navicula exigua</i>	+	+	+		+	+	+	+
纤细等片藻 <i>Diatoma tenue</i>	+	+	+		+	+	+	+
小环藻属 <i>sp. Cyclotella sp.</i>	+	+	+		+	+	+	+
微小双菱藻 <i>Surirella minuta</i>	+	+	+		+	+	+	+
小型异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i>		+	+			+		+
窄异极藻 <i>Gomphonema angustatum</i>		+	+		+			
短线脆杆藻 <i>Fragilaria brevistriata</i>	+		+					
美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>			+				+	
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>			+					
明晰双肋藻 <i>Amphipleura pellucida</i>			+					
镰头颤藻 <i>Oscillatoria brevis</i>	+	+	+		+	+	+	+
伯氏长孢藻 <i>Dolichospermum bergii</i>	+	+	+		+	+	+	+
拟短形颤藻 <i>Oscillatoria subbrevis</i>	+	+	+					
微细转板藻 <i>Mougeotia parvula</i>				+				

秋季仕望河、清涧河、淤水河优势种居多,分别占 42%、37%、32%,卵形双菱藻(*Surirella ovata*)除云岩河非优势种外,在其他 7 条流域均为优势种;淡绿舟形藻(*Navicula viridula*)仅为清涧河优势种,梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、漂浮泽丝藻(*Limnithrix planctonica*)、卷曲纤维藻(*Ankistrodesmus convolutus*)、微细转板藻(*Mougeotia parvula*)仅为云岩河优势种,微型舟形藻(*Navicula minima*)、中型脆杆藻(*Fragilaria intermedia*)、针晶拟指球藻(*Dactylococcopsis raphidioides*)、波吉卵囊藻(*Oocystis borgei*)仅为仕望河优势种,窗纹藻属 *sp.*(*Epithemia sp.*)、钝鼓藻(*Cosmarium obtusatum*)仅为淤水河优势种,湖泊浮鞘丝藻(*Lyngbya limnetica*)仅为沮河优势种。

春季异极藻属 *sp.*(*Gomphonema sp.*)、双头辐节藻(*Stauroneis anceps*)、淡绿舟形藻(*Navicula viridula*)、等片藻属 *sp.*(*Diatoma sp.*)、冬生等片藻(*Diatoma hiemale*) 在 8 条流域均优势种;窄双菱藻(*Surirella angustata*)、偏肿内丝藻(*Encyonema ventricosum*)、短小舟形藻(*Navicula exigua*)、纤细等片藻(*Diatoma tenue*)、小环藻属 *sp.*(*Cyclotella sp.*)、镰头颤藻(*Oscillatoria brevis*)、伯氏长孢藻(*Dolichospermum bergii*)、微小双菱藻(*Surirella minuta*)除仕望河外,在其他 7 条流域均为优势种;谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、明晰双肋藻(*Amphipleura pellucida*)仅为云岩河优势种,微细转板藻(*Mougeotia parvula*)仅为仕望河优势种;云岩河优势物种数最多占 95%,仕望河最少占 29%。

延安市重点流域着生藻类平均密度如图 3,秋季平均密度为 3.88×10^5 个/cm²,各流域平均密度范围为 2.34×10^5 — 5.93×10^5 个/cm²,表现为仕望河>云岩河>延河>北洛河>沮河>清涧河>淤水河>葫芦河;春季为 2.57×10^5 个/cm²,各流域平均密度范围为 1.76×10^5 — 4.47×10^5 个/cm²,表现为云岩河>清涧河>仕望河>沮河>葫芦河>淤水河>北洛河>延河。秋、春季各流域硅藻密度占比最大,秋季各流域硅藻范围(45%—92%)、金藻(0—1%)、蓝藻(3%—19%)、裸藻(0—1%)、绿藻(3%—32%)、隐藻(1%—2%),硅藻密度占比最大的为清涧

河 92%, 云岩河最小 45%; 清涧河和淤水河金藻均为 0, 其他流域均为 1%; 蓝藻云岩河占比最大 19%, 清涧河最小 3%; 延河、云岩河、北洛河、葫芦河裸藻均为 1%, 其他流域为 0; 绿藻云岩河最大 32%, 清涧河最小 3%; 隐藻清涧河和仕望河为 1%, 其他为 2%。春季各流域硅藻密度占比 (78%—82%), 相差较小; 蓝藻 (13%—15%); 裸藻 (1%—3%); 绿藻 (3%—6%), 延河最大, 其次北洛河 4%, 其他流域均为 3%。

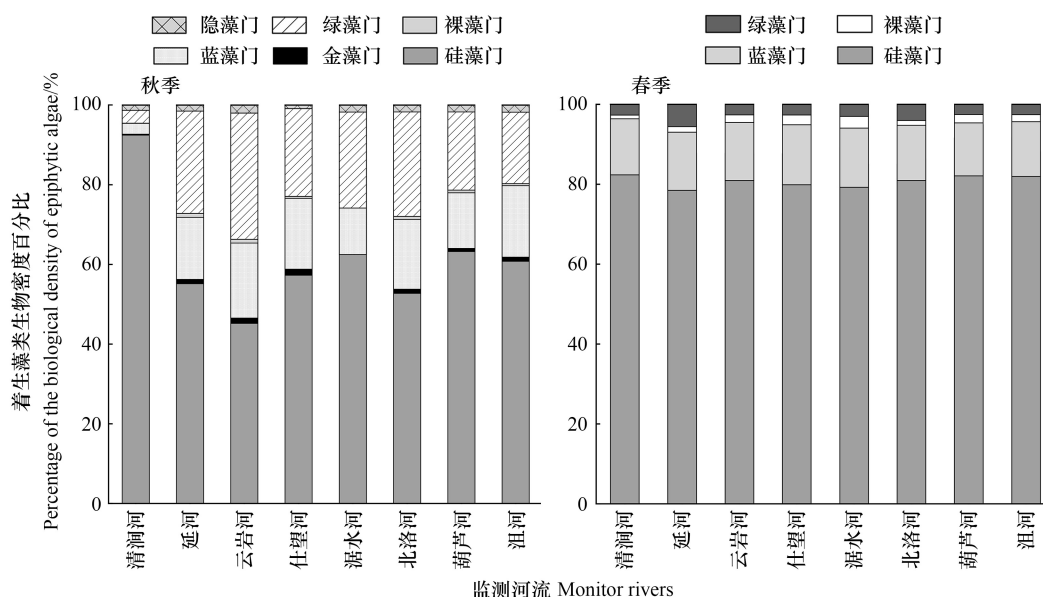


图3 延安市重点流域着生藻类密度百分比

Fig.3 Percentage of algae density in key watershed of Yan 'an City

延安市重点流域着生藻类多样性指数值如图 4, 秋季 H 平均值 4.95, 各流域变化范围 4.82—5.03; J 平均值 0.89, 变化范围 0.86—0.91; D 平均值 2.49, 变化范围 2.37—2.56。春季 H 平均值 5.00, 各流域变化范围 4.87—5.10, J 平均值 0.89, 变化范围 0.85—0.91; D 平均值 2.85, 变化范围 2.71—2.95。多样性指数值越高, 群落

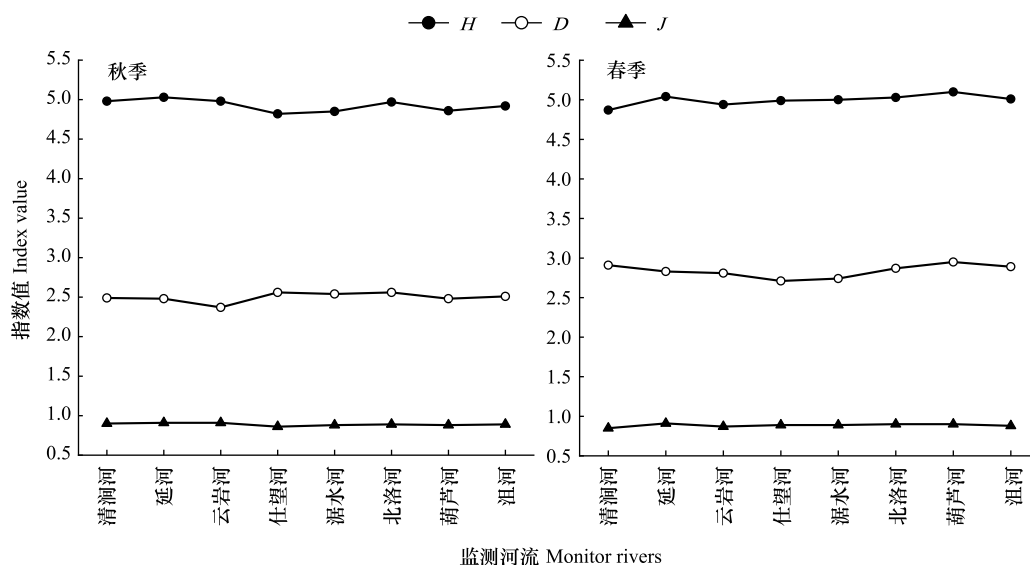


图4 延安市重点流域着生藻类多样性指数值

Fig.4 Diversity index value of algae in key watershed of Yan 'an City

H : Shannon-Wiener 多样性指数, J : Pielou 均匀度指数, D : Margalef 丰富度指数

稳定性越强,整体上,延安市境内重点流域春季多样性指数值高于秋季,春季群落稳定性更好。

2.3 生态网络与群落稳定性

构建了延安市重点流域秋季(图 5)和春季(图 6)的生态网络,探索着生藻类群落内部相互关系的演替,节点代表着生藻,边表示物种之间的相互作用,秋、春季的节点数分别为 32 和 44,边数分别为 60、75。节点数和边数均春季高于秋季,春季着生藻类生态网络结构较秋季复杂,说明春季着生藻群落之间相互作用较强,群落稳定性和恢复性较强。秋季关键种为针状菱形藻(*Nitzschia acicularis*)、针状拟指球藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、漂浮泽丝藻(*Limnithrix planctonica*);春季关键种为湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)。

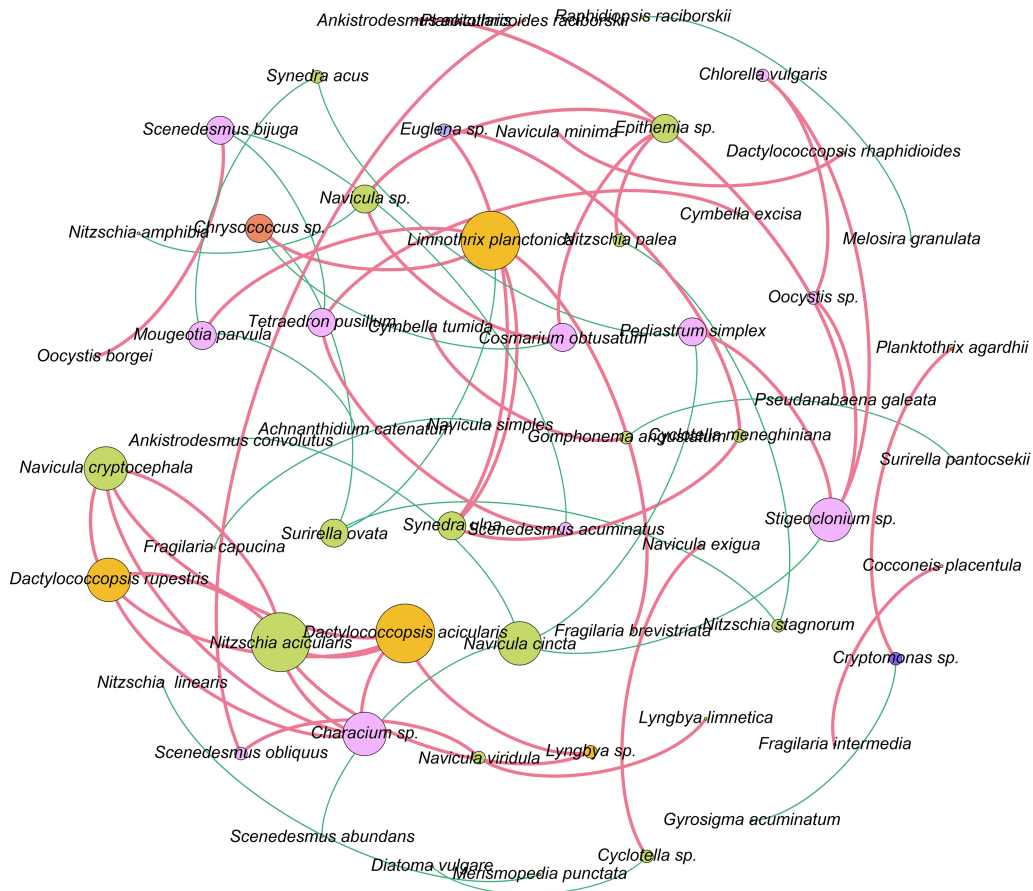
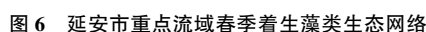


图 5 延安市重点流域秋季着生藻类生态网络

Fig.5 Ecological network of algae in autumn in key watershed of Yan'an City

Ankistrodesmus acicularis: 针形纤维藻; *Planktothricoides raciborskii*: 拉氏拟浮丝藻; *Raphidiopsis raciborskii*: 拉氏尖头藻; *Synedra acus*: 尖针杆藻; *Chlorella vulgaris*: 小球藻; *Scenedesmus bijuga*: 双对栅藻; *Euglena* sp.: 裸藻属 sp.; *Navicula minima*: 微型舟形藻; *Epithemia* sp.: 窗纹藻属 sp.; *Dactylococcopsis raphidioides*: 针晶拟指球藻; *Navicula* sp.: 舟形藻属 sp.; *Nitzschia amphibia*: 两栖菱形藻; *Chrysococcus* sp.: 金粒藻属 sp.; *Cymbella excisa*: 切断桥弯藻; *Melosira granulata*: 颗粒直链藻; *Limnithrix planctonica*: 漂浮泽丝藻; *Tetraedron pusillum*: 微小四角藻; *Mougeotia parvula*: 微细转板藻; *Oocystis borgei*: 波吉卵囊藻; *Ankistrodesmus convolutus*: 卷曲纤维藻; *Cymbella tumida*: 膨胀桥弯藻; *Achnanthisidium catenatum*: 链状弯壳藻; *Navicula cryptocephala*: 隐头舟形藻; *Surirella ovata*: 卵形双菱藻; *Fragilaria capucina*: 钝脆杆藻; *Dactylococcopsis rupestris*: 石生拟指球藻; *Nitzschia acicularis*: 针状菱形藻; *Nitzschia linearis*: 线形菱形藻; *Synedra ulna*: 肘状针杆藻; *Nitzschia palea*: 谷皮菱形藻; *Cosmarium obtusatum*: 钝鼓藻; *Navicula simplex*: 简单舟形藻; *Oocystis* sp.: 卵囊藻属 sp.; *Pediastrum simplex*: 单角盘星藻; *Planktothrix agardhii*: 阿氏浮丝藻; *Pseudanabaena galeata*: 洋假鱼腥藻; *Gomphonema angustatum*: 窄异极藻; *Cyclotella meneghiniana*: 梅尼小环藻; *Scenedesmus acuminatus*: 尖细栅藻; *Surirella pantocsekii*: 双菱藻; *Stigeoclonium* sp.: 毛枝藻属 sp.; *Navicula exigua*: 短小舟形藻; *Fragilaria brevistriata*: 短线脆杆藻; *Nitzschia stagnorum*: 池生菱形藻; *Navicula cincta*: 系带舟形藻; *Characium* sp.: 小柱藻属 sp.; *Scenedesmus obliquus*: 斜生栅藻; *Lyngbya limnetica*: 湖泊浮鞘丝藻; *Cocconeis placentula*: 扁圆卵形藻; *Cryptomonas* sp.: 隐藻属 sp.; *Fragilaria intermedia*: 中型脆杆藻; *Navicula viridula*: 淡绿舟形藻; *Scenedesmus abundans*: 丰富栅藻; *Diatoma vulgare*: 普通等片藻; *Lyngbya* sp.: 鞘丝藻属 sp.; *Gyrosigma acuminatum*: 尖布纹藻; *Cyclotella* sp.: 小环藻属 sp.; *Merismopedia punctata*: 点形平裂藻



Nitzschia sublinearis: 近线形菱形藻; *Cymbella leptoceros*: 细角桥弯藻; *Euglena geniculata*: 膝曲裸藻; *Encyonema* sp.: 内丝藻属 sp.; *Sellaphora pupula*: 瞳孔孔型藻; *Stauroneis gracilis*: 细长辐节藻; *Navicula menisculus*: 弯月形舟形藻; *Oscillatoria neglecta*: 易略颤藻; *Microspora pachyderma*: 厚壁微孢藻; *Ulothrix oscillatoria*: 颤丝藻; *Nitzschia frustulum*: 碎片菱形藻; *Meridion circulare*: 环状扇形藻; *Synedra tabulata*: 平片针杆藻; *Cymbella compacta*: 紧密桥弯藻; *Nitzschia sigmoidea*: 类 S 型菱形藻; *Cymbella pusilla*: 细小小桥弯藻; *Amphiprora alata*: 翼茧形藻; *Stauroneis anceps*: 双头辐节藻; *Pseudanabaena limnetica*: 湖泊假鱼腥藻; *Microspora floccosa*: 丛毛微孢藻; *Euglena viridis*: 绿色裸藻; *Spirogyra pulchrifigurata*: 美纹水绵; *Nitzschia obtusa*: 钝端菱形藻; *Tryblionella* sp.: 盘杆藻属 sp.; *Oedogonium* sp.: 鞘藻属 sp.; *Cymbopleura amphicephala*: 双头弯肋藻; *Leptolyngbya* sp.: 细鞘丝藻属 sp.; *Gomphonema* sp.: 异极藻属 sp.; *Pinnularia* sp.: 羽纹藻属 sp.; *Diatoma hiemale*: 冬生等片藻; *Oscillatoria subbrevis*: 拟短形颤藻; *Surirella linearis*: 线形双菱藻; *Chroococcus* sp.: 色球藻属 sp.; *Navicula placentula*: 扁圆舟形藻; *Oscillatoria* sp.: 颤藻属 sp.; *Diatoma tenue*: 纤细等片藻; *Cymbella subtruncata*: 近平截桥弯藻; *Cocconeis pediculus*: 虱形卵形藻; *Nitzschia fossilis*: 化石菱形藻; *Diatoma* sp.: 等片藻属 sp.; *Fragilaria* sp.: 脆杆藻属 sp.; *Aphanizom enongracile*: 柔细束丝藻; *Dolichospermum bergii*: 伯氏长孢藻; *Bacillaria paradoxa*: 奇异杆状藻; *Surirella minuta*: 微小双菱藻; *Amphipleura pellucida*: 明晰双肋藻; *Euglena intermedia*: 中型裸藻; *Asterionella formosa*: 美丽星杆藻; *Botryococcus protuberans*: 隆起葡萄藻; *Surirella angustata*: 窄双菱藻

2.4 着生藻群落结构特征与水质因子的关系

<http://www.ecologica.cn>

大,相关性越弱(锐角为正相关,钝角为负相关),环境因子表征射线越长,作用越显著^[35]。RDA 分析表明,第一、第二排序轴对秋、春季着生藻类群落结构的累积解释变量分别为 17.93%、14.6%。藻类群落结构分布是不同生境条件共同作用的结果,秋、春季延安市重点流域主要影响因子存在差异(图 8)。

秋季影响着生藻类群落结构的主要环境因子为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO、TP、流速,其次为 TN、水温, COD_{Mn} 、pH 影响较小。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与着生藻物种数、 H 、 D 、 J 均呈正相关,与密度相关性不显著;DO、TP 与着生藻密度、物种数、 D 均呈显著正相关,与 H 、 J 呈负相关;流速、水温与着生藻密度均呈正相关,与物种数、 H 、 J 、 D 均呈负相关;TN 与着生藻密度、物种数、 D 呈显著性正相关,与 H 、 J 相关性不显著; COD_{Mn} 与 H 、 J 呈显著性正相关,与其它多样性指数呈显著负相关;pH 与着生藻多样性指数均呈负相关。春季影响着生藻类群落结构的主要环境因子为水温、pH、流速,其次为 DO、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} ,TP 影响较小。水温、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 H 、 J 均呈显著正相关,与着生藻密度、物种数、 D 呈负相关;流速、 COD_{Mn} 与 J 呈正相关,与其他指数呈负相关;pH 与密度呈正相关,与其他指数呈负相关,DO、TN、TP 与 H 、 D 、物种数呈正相关,与密度、 J 呈负相关。

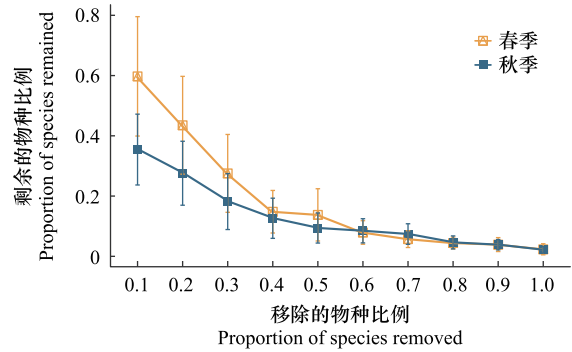


图 7 延安市重点流域秋、春季着生藻类鲁棒性分析

Fig.7 Robustness analysis of algae in autumn and spring in key watershed of Yan'an City

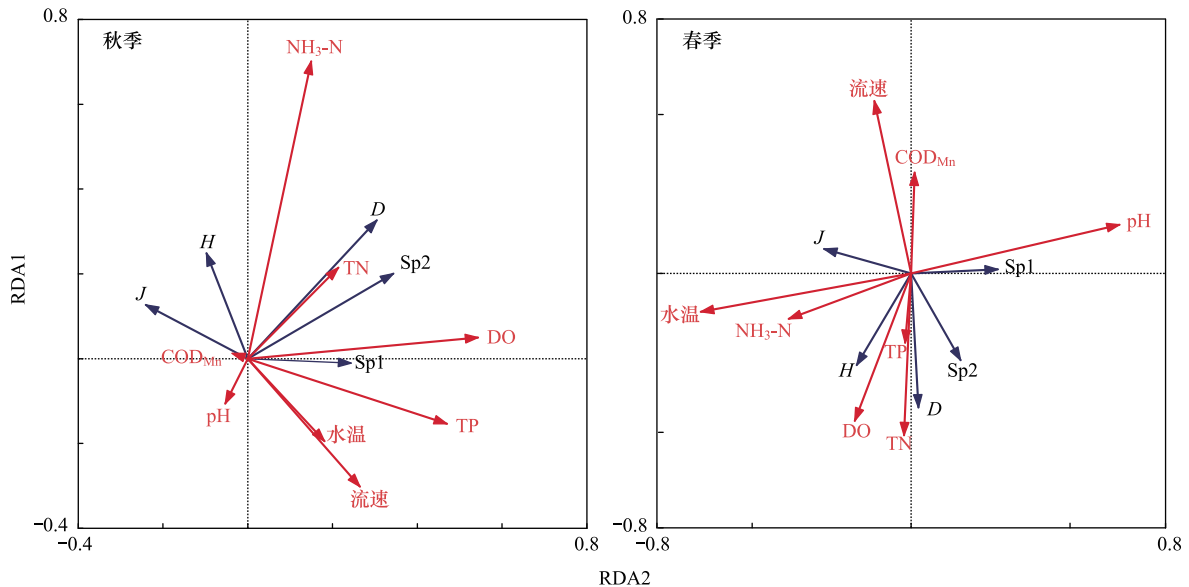


图 8 延安市重点流域秋、春季着生藻类群落结构与水环境因子 RDA 排序图

Fig.8 RDA sequence of algae community structure and water environmental factors in (a) autumn and (b) spring in key watershed of Yan'an City

Sp1: 着生藻类密度, Sp2: 着生藻类物种数, H : Shannon-Wiener 多样性指数, J : Pielou 均匀度指数, D : Margalef 丰富度指数; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis; TN: 总氮; TP: 总磷; DO: 溶解氧; COD_{Mn} : 高锰酸盐指数; $\text{NH}_3\text{-N}$: 氨氮

3 讨论

3.1 着生藻群落呈现季节性演替特征

延安市 8 条重点流域秋、春季共检出着生藻类 137 种, 主要为硅藻, 其次为绿藻、蓝藻, 金藻、隐藻等指示

清洁水体的物种较少,硅藻、绿藻和蓝藻均为河流中常见藻类,在秋、春季的总密度贡献率均超过所有藻类总密度的 95%,刘麟菲^[36]研究也表明黄河最大支流渭河流域着生藻主要为硅藻,其次为绿藻和蓝藻。着生藻对环境变化极为敏感,不同藻类对不同环境的耐受性、适应性存在差异,调查流域优势种从秋季到春季呈硅藻物种数增加,蓝藻和绿藻则减少;秋季优势度指数较高的优势种为硅藻门的卵形双菱藻(*Surirella ovata*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*),均在泾水河;春季为绿藻门的微细转板藻(*Mougeotia parvula*),出现在仕望河。谷皮菱形藻是典型富营养化的指示种,通常出现在污染较为严重的水体中^[37],秋季谷皮菱形藻在清涧河、延河、北洛河、泾水河、葫芦河、沮河均以优势种出现,春季仅在云岩河为优势种,表明秋季(平水期)调查水体有富营养化趋势;舟形藻也能表征水体富营养化趋势,春季调查区域 8 条流域均有舟形藻作为优势种出现,表明春季(枯水期)调查水体富营养化趋势较平水期更为显著;舟形藻、菱形藻、双菱藻为运动型藻属,可指示水体浑浊程度,这三类优势种/属在延安市重点流域秋、春季均有出现,延安市境内流域属黄河中游,区域内水土流失严重,河流泥沙较多,水体较为浑浊,适合这三类藻类生存;但浑浊水体中悬浮物较多,使水体透明度降低,影响着生藻类的光合作用,从而直接影响着生藻类生长繁殖的能力。调查区域秋、春季着生藻类平均密度分别为 3.88×10^5 个/cm²、 2.57×10^5 个/cm²,相对于赣江^[29]、太子河^[8]等流域较低,这可能与黄河中游水体泥沙含量高、水体浑浊有较大关系,泥沙通常会随河流流速和流量而发生不定期的沉浮,扰动着生藻类群落生境栖息地,使着生藻类群落在一定程度上难以形成较为稳定的结构,尤其是对优势种群扩大增长产生不利影响;空间上,云岩河和仕望河着生藻类平均密度较高,云岩河和仕望河位于延安市东南部,属温暖半湿润气候区,植被覆盖度较高,水体较为清澈,有利于着生藻繁殖。着生藻类多样性指数 H 和丰富度指数 D 从秋季到春季呈现上升趋势,均匀度指数 J 呈现下降趋势,整体变化较小,春季着生藻类更为丰富;调查流域内着生藻类多样性指数、丰富度指数较高,硅藻群落结构较为稳定,水体环境较好,黄河中游河流受泥沙扰动,抑制优势种扩增,减缓了种间的竞争压力,提升物种丰富度。生态网络分析也表明春季着生藻类生态网络结构复杂,群落之间相互作用较强,群落稳定性和恢复性较强。春季正值枯水期,流速较缓,河流冲刷作用小,为着生藻类繁殖提供一个稳定的栖息环境。

单个物种对生态系统稳定性既有积极的贡献,也有消极的贡献^[38],延安市重点流域秋季的关键种为针状菱形藻(*Nitzschia acicularis*)、针状拟指球藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、漂浮泽丝藻(*Limnothrix planctonica*),春季为湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*),这些物种在保持群落整体稳定性方面起着至关重要的作用,排除这些关键类群将导致生态网络不稳定。因此,在管理和保护工作中,应优先保护关键物种,以确保着生藻类群落的稳定性和复原力。通过关注关键物种,管理者和保护主义者可以实施有针对性的措施来保护它们的栖息地,保护着生藻类群落的稳定。虽然优势种可以表明物种的影响力,但根据其生态作用确定关键物种,确保更全面地了解它们在生态系统稳定性中的重要性,从而制定有效的保护策略和河流生态系统的可持续管理。

3.2 着生藻群落季节变化与水环境因子有一定相关性

环境因子变化影响着生藻群落结构和分布,不同流域环境影响因子存在差异,已有研究表明影响雅鲁藏布江下游着生藻类群落结构的主要水环境因子为水温、pH 和流速^[39];水温、pH 也是影响黄河流域着生硅藻分布的主要因子^[40];殷旭旺等^[41]研究表明,影响渭河流域着生藻类群落格局的环境因子为电导率和流量。本研究表明秋季影响延安市境内重点流域着生藻群落结构的水环境因子主要为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO、TP、流速,春季为水温、pH 和流速,共同的主要因子为流速。不同流域着生藻类的群落结构具有明显的空间异质性,不同水环境因子对着生藻类群落结构产生不同的促进或抑制作用,秋季(平水期)流速与着生藻密度呈正相关,春季(枯水期)与均匀度指数 J 呈正相关,与其他指数呈负相关,调查水体流速秋季、春季呈显著性差异($P < 0.01$),秋季平均流速(0.5 m/s)高于春季(0.4 m/s),调查流域以硅藻为主,硅藻具有极强的竞争优势和附着能力,在流速的驱动下秋季使生物量增加;春季流速较小,有利于主动能力弱的着生藻类群落生长繁殖,使其均匀度增加。水温通过光合作用直接影响着生藻类群落分布,秋季调查流域平均水温($14.2 \pm 2.3^\circ\text{C}$)较春季($4.8 \pm 4.$

4℃)高,有利于喜温藻类蓝藻和绿藻生长繁殖,春季水温较低,对喜温藻类繁殖产生抑制作用,调查流域蓝藻和绿藻优势种数秋季高于春季,秋季水温与着生藻类密度呈显著正相关,春季则呈负相关。DO 含量影响着生藻生理活动和群落结构,DO 含量下降会导致着生藻群落的死亡^[41],调查流域 DO 含量均达到 6 mg/L 以上,与着生藻类物种数和丰富度指数均呈正相关,表明流域水体 DO 含量对着生藻类生长产生抑制作用较小。着生藻类一般受 N、P 含量影响较多,调查流域秋、春季均有 99% 的点位 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 GB3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类及以上标准,水质良好,但总体春季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度高于秋季,秋季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与着生藻物种数、 H 、 D 、 J 均呈正相关,秋季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度显著促进大部分物种的生长,而春季则抑制部分物种的生长;秋、春季 TN 与着生藻物种数、丰富度、多样性指数均呈正相关,调查流域秋、春季分别有 76.8% 和 81.1% 的调查点位水质为 V 类或劣 V 类, TN 浓度较高,有利于菱形藻、舟形藻等耐污种生存; TP 浓度秋、春季均达到Ⅲ类及以上水质,浓度较低,秋、春季与着生藻物种数、丰富度指数均呈正相关,已有研究表明^[42],太子河流域 TP 对着生藻类最适值为 0.47—0.02 mg/L,异极藻属(*Gomphonema*)适宜栖息于 TP 较低的水环境中,该研究 TP 浓度适宜于优势种异极藻属生长繁殖。

4 结论

(1)首次探究延安市境内重点流域着生藻类物种多样性,秋、春两季 8 条重点流域共鉴定出着生藻类 137 种,主要为硅藻,占 56.2%,春季物种数多于秋季;优势种共有 36 种,春季占 58%,微细转板藻(*Mougeotia parvula*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)、淡绿舟形藻(*Navicula viridula*)为秋、春两季共有优势种。

(2)春季着生藻群落之间相互作用较秋季强,群落稳定性和恢复性强; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO、TP、流速是秋季影响着生藻类群落结构的主要环境因子,水温、pH、流速是春季影响着生藻类群落结构的主要环境因子;流速为秋、春季两季共同的关键驱动因子。

(3)秋季的关键种为针状菱形藻(*Nitzschia acicularis*)、针状拟指球藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、漂浮泽丝藻(*Limnithrix planctonica*),春季的关键种为湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)。

(4)重点流域在以恢复和维持水生生态群落稳定性为目标时,应充分考虑水量、水质变化与水生群落季节演替之间的耦合关系。

参考文献(References):

- [1] 张萌,陈小龙,狄乾斌. 黄河流域环境治理效率的区域差异、动态演进及影响因素. 环境工程技术学报, 2024, 14(6): 1763-1776.
- [2] 曹文洪,张晓明. 新时期黄河流域水土保持与生态保护的战略思考. 中国水土保持, 2020(9): 39-42.
- [3] 薛浩,孟凡生,郑丙辉,王业耀,姚志鹏,张铃松. 硅藻指数在嫩江支流甘河的适用性评估. 环境科学研究, 2020, 33(3): 617-625.
- [4] 鲍思敏,张凯,丁城志,陶捐,王军. 澜沧江下游补远江大型底栖动物群落结构的时空分布及其影响因素. 湖泊科学, 2024, 36(2): 536-550.
- [5] Wang J, Ding C Z, Tao J, Jiang X M, Heino J, Ding L Y, Su W, Chen M L, Zhang K, He D M. Damming affects riverine macroinvertebrate metacommunity dynamics: Insights from taxonomic and functional beta diversity. Science of The Total Environment, 2021, 763: 142945.
- [6] Wang J, Bao S M, Zhang K, Heino J, Jiang X M, Liu Z Y, Tao J. Responses of macroinvertebrate functional trait structure to river damming: From within-river to basin-scale patterns. Environmental Research, 2023, 220: 115255.
- [7] 杨子杰. 延河流域浮游动物群落特征及构建机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [8] 樊甜甜,杨柏贺. 太子河流域春季着生藻群落与水环境因子的关系. 水产学杂志, 2019, 32(2): 44-48.
- [9] 殷旭旺,渠晓东,李庆南,刘颖,张远,孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [10] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. Ecological Indicators, 2007, 7(1): 48-70.
- [11] 张瑞杰,张红娟,元凯军,刘精慧. 陕北黄土高原生态治理现状及发展趋势探究——以延安市为例. 环境生态学, 2024, 6(5): 93-100, 107.
- [12] 许忠洋,王琤,顾彤,王诗雨,裴晨阳,张青峰. 基于生态网络的生态修复关键区识别——以延安市为例. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1073-1083.

- [13] 薛桦, 刘萍. 基于 RSEI 的黄河中游地区生态环境质量时空演化特征及驱动因素——以延安市为例. 水土保持研究, 2024, 31(1): 373-384.
- [14] 李凯, 张北赢. 2000—2020 年延安市土地利用景观格局时空演变及驱动因子. 生态科学, 2023, 42(6): 74-83.
- [15] 王晶, 胡一, 李鹏, 白清俊. 沟沟造地背景下延安市生境质量时空演变特征. 生态学报, 2022, 42(23): 9808-9819.
- [16] 李亚妮, 刘彩琴, 黄鹏. 延河流域浮游生物群落多样性的调查. 延安大学学报: 自然科学版, 2014, 33(1): 61-64.
- [17] 谢海莎, 邵瑞华, 王际焱, 崔双虎, 师瑞, 肖懿. 延河丰水期浮游生物群落分布及其与环境因子的关系. 环境保护科学, 2022, 48(1): 108-114.
- [18] 卢悦, 胡恩, 丁一桐, 郭善嵩, 李刚, 潘保柱. 西北地区延河流域浮游植物群落结构特征及影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1669-1679.
- [19] 贺瑶, 孙长顺, 侯易明, 胡恩, 侯湘然, 冯治远, 张旭达, 潘保柱. 基于流域底栖动物完整性指数评价延河的水生态健康. 应用生态学报, 2024, 35(3): 806-816.
- [20] 王鹤, 朱龙, 轩晓博, 薛雪, 张国, 王在照. 延河流域水生生物资源调查与多样性分析. 家畜生态学报, 2022, 43(1): 36-42.
- [21] 高瑜, 李小平, 张钰超, 曹瑜函, 李涛, 杨涛, 王利军. 中国西部河谷型城市土壤与灰尘粒级组分分布特征. 干旱区地理, 2021, 44(2): 379-388.
- [22] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 邓坚, 水利部 水文局, 长江流域水环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [24] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [25] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(1-23-卷). 北京: 科学出版社, 1988-2018.
- [26] 刘威, 朱远生, 黄迎艳译. 欧洲硅藻鉴定系统. 广州: 中山大学出版社, 2012.
- [27] 苏文杭, 闫龙, 王海龙, 胡鹏, 胡龔航, 李鑫雨. 雅砻江干流着生藻类群落特征及生态位分析. 水利水电技术: 中英文, 2024: 1-17. (2024-10-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20241023.1927.009.html>.
- [28] 孟顺龙, 瞿建宏, 裘丽萍, 胡庚东, 范立民, 宋超, 吴伟, 陈家长, 徐跑. 富营养化水体降磷对浮游植物群落结构特征的影响. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1578-1582.
- [29] 肖妮娜, 张萌, 冯兵, 张敏, 徐军, 刘足根, 张秋根. 丰水期赣江流域着生藻类群落结构及其与水环境因子的关系. 长江流域资源与环境, 2020, 29(4): 900-910.
- [30] ter Braak C J F, Verdonschot P F M. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. Aquatic Sciences, 1995, 57(3): 255-289.
- [31] Deng Y, Jiang Y H, Yang Y F, He Z L, Luo F, Zhou J Z. Molecular ecological network analyses. BMC Bioinformatics, 2012, 13: 113.
- [32] 王金兰, 王小军, 刘文辉, 李文. 不同放牧方式对高寒草甸植物群落关键种的影响. 生态学报, 2024, 44(15): 6758-6768.
- [33] Wu J X, Liu X Y, Kong W J, Gu S S, Wang S P. Seasonal instability of phytoplankton community in extreme arid lake basin during interval period of large-scale ecological water transport. Science of The Total Environment, 2025, 958: 178119.
- [34] Tylianakis J M, Didham R K, Bascompte J, Wardle D A. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2008, 11(12): 1351-1363.
- [35] 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典. 西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例. 环境科学, 2018, 39(6): 2680-2687.
- [36] 刘麟菲. 渭河流域着生藻类群落结构与环境因子的关系[D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- [37] 白辰. 吉林省密江河着生藻类多样性及其与生态系统功能的关系研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
- [38] White L, O'Connor N E, Yang Q, Emmerson M C, Donohue I. Individual species provide multifaceted contributions to the stability of ecosystems. Nature Ecology & Evolution, 2020, 4(12): 1594-1601.
- [39] 刘惠秋. 雅鲁藏布江下游着生藻类群落多样性格局与水生生态环境质量评价[D]. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [40] 吕绪聪. 黄河流域着生硅藻多样性及格局分化的决定因素[D]. 新乡: 河南师范大学, 2023.
- [41] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. Freshwater Biology, 2000, 44(2): 279-301.
- [42] 杨璐, 李佳蹊, 钱璐毅, 殷旭旺, 阮贇杰. 太子河着生藻类群落与氮、磷营养盐的定量关系研究. 生态毒理学报, 2019, 14(6): 104-117.