

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应

郭善嵩¹, 胡恩², 丁一桐¹, 张嘉渭³, 孙长顺², 卢悦¹, 潘保柱^{1*}

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 3. 西交利物浦大学理学院, 苏州 215123)

摘要: 为探究不同土地利用类型影响下, 无定河流域浮游植物群落特征变化及主要环境影响因子, 于 2021 年春季(4~5 月)和秋季(9~10 月)对无定河干支流及典型淤地坝水体进行系统的水生态调查. 共鉴定浮游植物 273 种, 隶属于 7 门 90 属, 春季(241 种)高于秋季(189 种), 春和秋两季浮游植物密度、生物量均值分别为 $479.95 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $6.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $171.29 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 流域优势种以硅藻门的梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、简单舟形藻(*Navicula simplex*)和谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)为主, 裸藻(*Euglena* spp.)为淤地坝水体特有优势种. Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数显示春季高于秋季, Pielou 均匀度指数变化相对较小. 采样点 1000 m 河岸带缓冲区土地利用类型以耕地和草地为主. 环境因子中水温(WT)、浊度(Turb)、pH、溶解氧(DO)、总氮(TN)和总磷(TP)浓度时空变化显著. 结构方程模型(SEM)表明: 不同土地利用类型通过影响环境因子而间接影响浮游植物群落特征, 春季影响浮游植物群落特征的主要环境因子是水温、流速、pH、溶解氧和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 而在秋季是浊度、水温和溶解氧.

关键词: 无定河流域; 浮游植物; 土地利用; 环境因子; 结构方程模型(SEM)

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2211-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304202

Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin

GUO Shan-song¹, HU En², DING Yi-tong¹, ZHANG Jia-wei³, SUN Chang-shun², LU Yue¹, PAN Bao-zhu^{1*}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, China; 3. School of Science, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract: In order to investigate the changes in phytoplankton community characteristics and the main environmental impact factors in the Wuding River Basin under the influence of different land use types, a systematic aquatic ecological survey was conducted in the spring (April-May) and autumn (September-October) of 2021 on the main stream and tributaries of the Wuding River and typical check dam water bodies. A total of 273 phytoplankton species belonging to seven phyla and 90 genera were identified, with higher numbers in spring (241 species) than in autumn (189 species). The mean values of phytoplankton density and biomass were $479.95 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ and $6.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $171.29 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ and $2.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in spring and autumn, respectively. The dominant species in the basin were mainly *Cyclotella meneghiniana*, *Synedra acus*, *Navicula simplex*, and *Nitzschia palea*, and *Euglena* spp. was the dominant species specific to the check dam water bodies. The Shannon-Wiener diversity index and Margalef richness index showed higher values in spring than in autumn and there was relatively little variation in the Pielou evenness index. The land use types in the 1000 m riparian zone buffer at the sampling site were mainly cultivated land and grassland. The temporal and spatial variations in water temperature (WT), turbidity (Turb), pH, dissolved oxygen (DO), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) concentrations in environmental factors were significant. Structural equation modeling (SEM) showed that different land use types indirectly influenced phytoplankton community characteristics by affecting environmental factors, and the main environmental factors affecting phytoplankton community characteristics were WT, velocity of flow (v), pH, DO, and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) in spring, whereas Turb, WT, and DO were the main factors in autumn.

Key words: Wuding River Basin; phytoplankton; land use; environmental factors; structural equation modeling (SEM)

黄河是我国重要的生态安全屏障, 同时黄河流域也广泛分布着多类型的生态脆弱敏感区域, 其中黄河中游黄土高原地区是代表性区域之一^[1]. 该区是黄河流域主要的产沙区, 受水土流失影响较大, 严重的水土流失导致土壤退化, 造成了河道淤积^[2], 加剧了水环境污染, 对黄河水生态保护与修复产生重大挑战. 无定河作为黄河流域中游水土流失区域典型河流, 发源于榆林市定边县, 由西北向东南注入黄河, 全长 491 km, 总汇流面积达 30 260 km². 无定河流域地处风沙-黄土交错带, 水土流失和水资源短缺等系列产品导致流域生态环境十分敏感和脆

弱^[3]. 自 20 世纪 80 年代以来, 无定河流域开展了小流域综合治理、退耕还林、水土保持生态修复、重点治理、坡改梯工程和淤地坝建设等^[4,5]. 其中, 淤地坝建设是无定河流域水土流失治理的主要措施之一, 主要作用为蓄水削洪和减蚀拦沙, 淤地造田^[6], 直接减少入河泥沙, 缓解了黄河夹带泥沙的现象^[7],

收稿日期: 2023-04-23; 修订日期: 2023-06-25

基金项目: 陕西省重点研发计划重点产业链(群)项目(2021ZDLSF05-10)

作者简介: 郭善嵩(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生生物学, E-mail: 1170921726@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

然而改善泥沙的同时对水文情势有着一定影响。

浮游植物作为初级生产者,是水生态系统中物理、化学和生物过程的实践者,是食物网的基础一环,在水生态系统的能量流动和物质循环方面发挥着关键作用^[8,9].浮游植物群落特征变化可以及时反映出水生态环境现状^[10].水体中环境因子,如营养盐和溶解氧浓度,以及水文指标的变化会直接影响浮游植物群落的组成及其分布变化^[11].由人类活动引起的流域土地利用类型通过影响环境因子间接影响浮游植物.由此可见,浮游植物群落特征及变化是时空差异条件下多种环境因子相互作用的结果^[12],因此浮游植物可作为评估水生态环境质量的重要指示生物,对水体浮游植物群落特征变化情况研究可以为水环境治理和修复工作提供理论参考^[13,14].

目前虽然无定河流域水生生物群落的调查研究已有零星报道,但对浮游植物群落特征与水环境关系的研究极为匮乏.仅有赵鑫等^[15]于2020年8月对无定河流域源头区浮游生物和底栖动物群落特征进行过研究.尚未见无定河全流域尺度上的浮游植物生态学报道,无定河全河段水文、泥沙和环境差异较大,且作为黄土高原地区典型河流,摸清其生态现状,明确人为干扰下其河流生态系统的响应情况是十分必要的,同时典型旱区河流的研究将有助于人们进行科学合理的旱区河流生态保护与修复工作.本研究基于2021年春秋两季无定河流域水环境、

水生生态调查数据和采样点1 000 m河岸带缓冲区土地利用数据,对浮游植物群落特征及其与环境因子响应关系进行探究,以期为无定河流域水生态系统保护和修复提供基础数据资料.

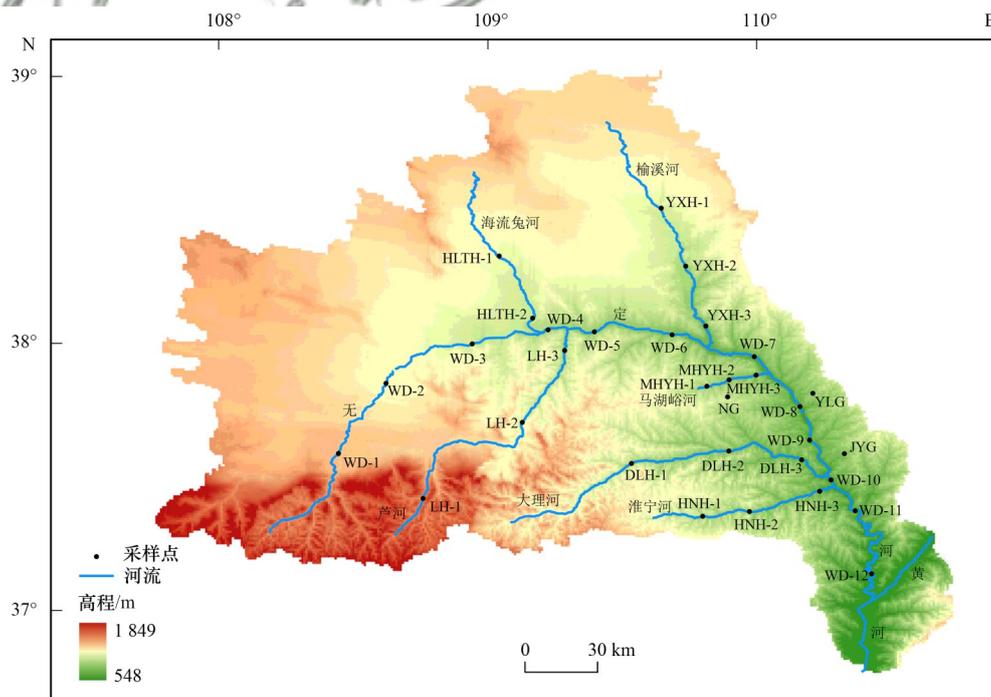
1 材料与方法

1.1 样点布设与采样时间

无定河流域属于典型不对称水系,根据《淡水浮游生物调查技术规范》^[16]对设置采样点的要求,并综合考虑其河道地形和水文环境等因素,本研究共设置40个采样点(图1),每个样点取3个平行样.其中无定河干流设12个采样点(上游采样点为WD-1~WD-4,中游采样点为WD-5~WD-9,下游采样点为WD-10~WD-12),海流兔河设置2个采样点(HLTH-1~HLTH-2),芦河(LH-1~LH-3)、榆溪河(YXH-1~YXH-3)、马湖峪河(MHYH-1~MHYH-3)、大理河(DLH-1~DLH-3)和淮宁河(HNH-1~HNH-3)各设3个采样点,此外南沟淤地坝水体设5个采样点(NG-1~NG-5),榆林沟淤地坝水体(YLG-1~YLG-3)和韭园沟淤地坝水体(JYG-1~JYG-3)均设置3个采样点.并于2021年4~5月(春季)和9~10月(秋季)对无定河流域的40个采样点进行2次采样.

1.2 环境因子测定

在水环境参数测量方面,水温(WT)、电导率(EC)、溶解氧(DO)和pH这4个水质参数采用哈希HQ40D便携式多参数分析仪现场测定;浊度(Turb)



NG. 南沟淤地坝, YLG. 榆林沟淤地坝, JYG. 韭园沟淤地坝

图1 无定河流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Wuding River Basin

采用哈希 2100Q 便携式浊度仪现场测定; 流速(v)采用 Global Water FP211 直读式流速仪测定. 在采样点的表、底层取水样等体积混合, 带回实验室分析, 根据《中华人民共和国国家环境保护标准》(HJ 636-2012)、《中华人民共和国国家标准》(GB 11893-89)、《中华人民共和国国家环境保护标准》(HJ 535-2009)和《中华人民共和国环境保护行业标准》(HJ/T 346-2007)^[17-20]分别测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度. 根据《湖泊富营养化调查规范》(第二版)^[21], 测定水体叶绿素 a(Chl-a)浓度.

1.3 浮游植物样品采集和鉴定

水样采集时在每个采样点取 3 个平行样, 各平行样均取水样 1 L, 现场加入 15 mL 鲁哥氏溶液进行固定后放实验室静置 48 h, 用虹吸管吸去上清液至留下含沉淀物的水样 50 mL. 进行浮游植物定量分析时, 将样品瓶摇匀后用移液枪吸取 0.1 mL 样品, 滴于 0.1 mL 计数框中, 使用光学显微镜 40 倍物镜进行浮游植物物种鉴定与细胞计数工作. 各断面所取的 3 瓶水样均做以上处理, 每次观察 100 个视野, 进行视野法计数并主要依据《淡水微型生物与底栖动物图谱》^[22]、《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[23]和《中国常见淡水浮游藻类图谱》^[24]鉴定浮游植物种类, 取计数平均值计算细胞密度, 并采用体积测量换算生物量.

1.4 土地利用数据

无定河流域土地利用数据为 2020 年 Landsat8 的 30 m 精度数据, 由 GlobeLand30: 全球地理信息公共产品(<http://www.globallandcover.com>)提供, 基于无定河流域 2020 年 DEM 数据, 利用 ArcGIS 10.3 对流域水系进行提取, 并以子流域划分方法对采样点 1 000 m 河岸带缓冲区的土地利用数据进行提取, 土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水体、人造地表、裸地和灌木地.

1.5 分析方法

群落特征参数主要包括各水体浮游植物的物种组成、密度、生物量和物种多样性及群落优势种. 优势种依据优势度(Y)确定:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种浮游植物的个数, N 为同一样品中所有物种的总个数, f_i 为第 i 个种群的出现频率, 其中优势度 $Y \geq 0.02$ 的物种即定为优势种.

Shannon-Wiener 多样性指数(H')计算公式:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \cdot \log_2 P_i \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数(D)计算公式:

$$D = \frac{(S - 1)}{\log_2 N} \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(J)计算公式:

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

式中, P_i 为第 i 个物种占总个体数的百分比, N 为同一样品中所有物种的总个数, S 为样品中所有物种的种类数.

采样点图在 ArcGIS 10.3 中完成. 通过 Excel 和 Origin 2 021 软件对浮游植物指标进行计算并绘图, 包括物种组成、生物密度、生物量等. 应用 IBM SPSS Statistics 26 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), LSD 分析法检验数据差异性, 多样性指数通过 R 语言“vegan”“picante”包进行计算. 考虑土地利用与环境因子的综合效应, 利用结构方程模型(structural equation model, SEM)评价环境因子对浮游植物细胞密度和 Chl-a 的影响, 其中物理因子包括: 水温、流速、浊度、透明度和电导率, 化学因子包括: pH、溶解氧、总磷、总氮、氨氮和硝酸盐氮, 通过 R 语言采用“plspm”包进行 SEM 分析. 为消除极值影响, 对环境因子数据(pH 除外)均进行 $\lg(x+k)$ 转换.

2 结果与分析

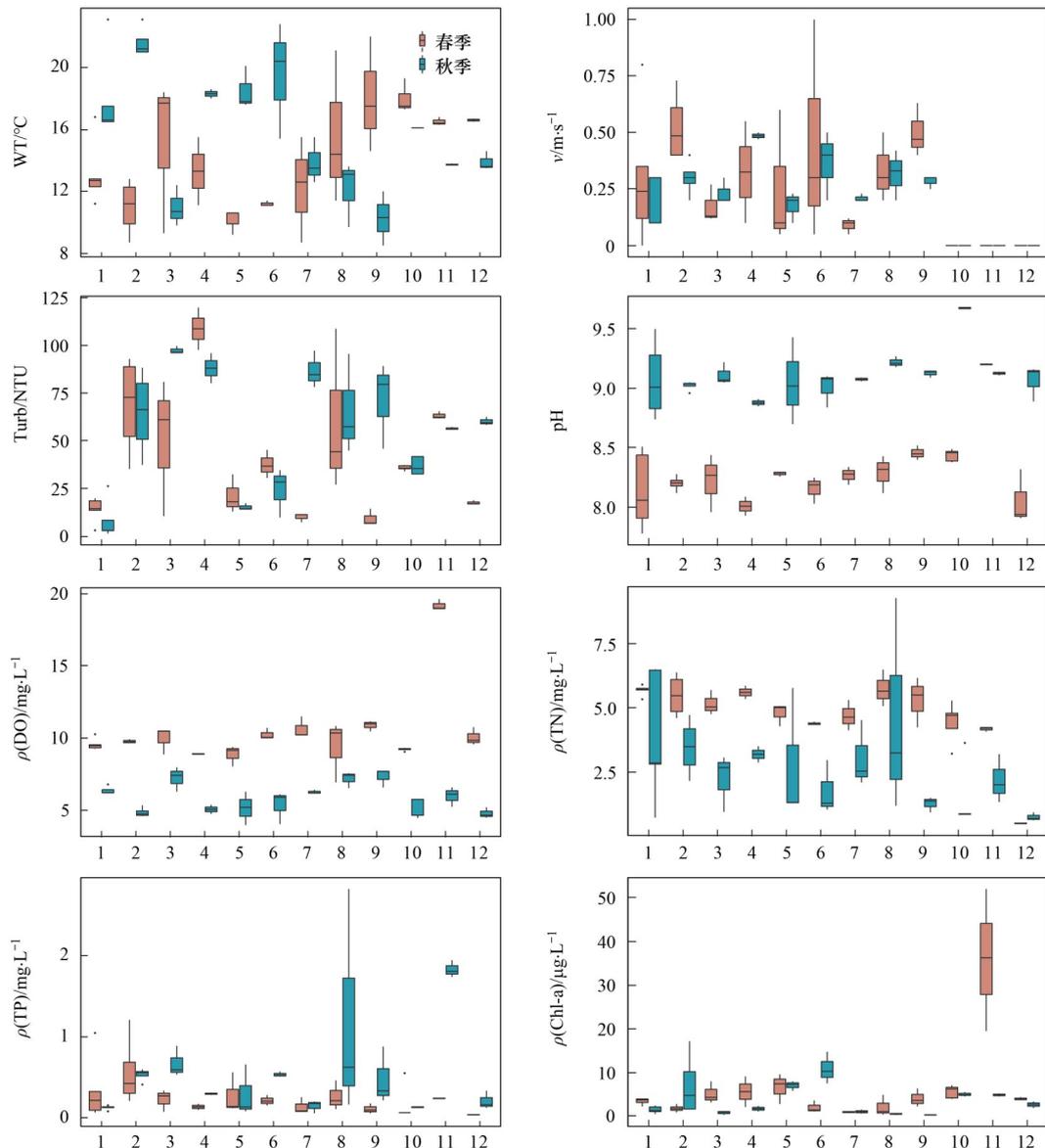
2.1 水体环境因子和土地利用类型

调查期间无定河流域水体环境因子见图 2, 水温和流速在春季及秋季平均值分别为 14.31°C 和 $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及 15.81°C 和 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 方差分析结果表明, 水温和流速在两季差异不显著($P > 0.05$). 浊度、pH 和 DO、TN、TP 在春季的平均值和浓度分别为 38.66 NTU 、 8.31 和 $10.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $4.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 秋季的平均值和浓度分别为 52.28 NTU 、 9.15 和 $5.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DO、TN 浓度在春季显著高于秋季($P < 0.01$), 浊度、pH 和 TP 浓度在秋季显著高于春季($P < 0.05$). 无定河流域环境因子存在显著的空间异质性, 在春季各采样水体中水温、浊度、pH 与 DO、TN、Chl-a 浓度存在极显著差异($P < 0.01$), 流速存在较为显著差异($P < 0.05$); 在秋季各采样水体中水温、流速、浊度、pH 与 DO、TP、Chl-a 浓度存在极显著差异($P < 0.01$).

无定河流域采样点 1 000 m 河岸带缓冲区土地利用类型以耕地和草地为主, 面积占比表现为(图 3): 耕地>草地>人造地表>裸地>水体>灌木地>林地.

2.2 浮游植物的种类组成

两次调查共鉴定出浮游植物 273 种, 隶属于 7



1. 干流上游, 2. 干流中游, 3. 干流下游, 4. 海流兔河, 5. 芦河, 6. 榆溪河, 7. 马湖峪河, 8. 大理河, 9. 淮宁河, 10. 南沟淤地坝, 11. 榆林沟淤地坝, 12. 韭园沟淤地坝

图2 无定河流域水环境因子

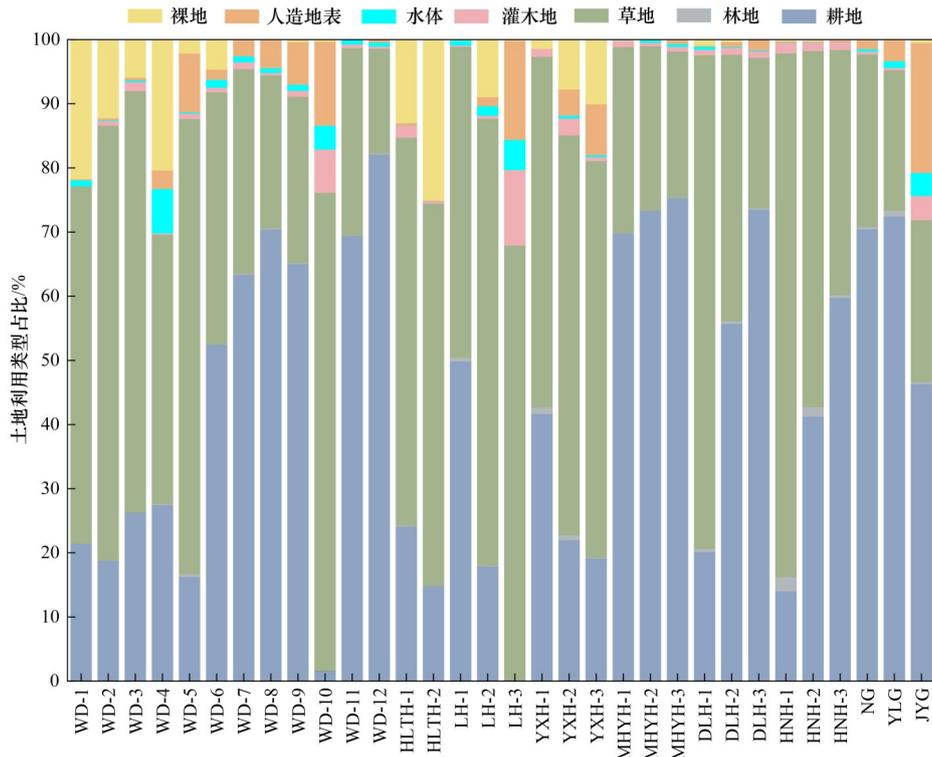
Fig. 2 Water environment factors in the Wuding River Basin

门90属.其中硅藻门29属114种,占41.76%;绿藻门33属92种,占33.70%;蓝藻门14属29种,占10.62%;裸藻门6属28种,10.26%;此外甲藻门4属5种,隐藻门2属3种,金藻门2属2种,共占3.66%.从时间上看,2021年春季共鉴定浮游植物7门81属241种,其中硅藻门105种占43.57%,绿藻门83种占34.44%,蓝藻门20种占8.30%,裸藻门24种占9.96%,其余藻类共占3.73%;秋季共鉴定浮游植物7门74属189种,其中硅藻门85种占44.97%,绿藻门54种占28.57%,蓝藻门26种占13.76%,裸藻门14种占7.41%,其余藻类共占5.29%.由此可见,春季浮游植物总种类数大于秋季.从空间分布上看,各水体两季度浮游植物种类数差异较大(图

4),两季浮游植物种类数最高值均在无定河干流中游段,分别为128种、115种;春季最低值出现在榆林沟淤地坝水体,共62种;秋季最低值出现在南沟淤地坝水体,共27种.

2.3 浮游植物密度和生物量

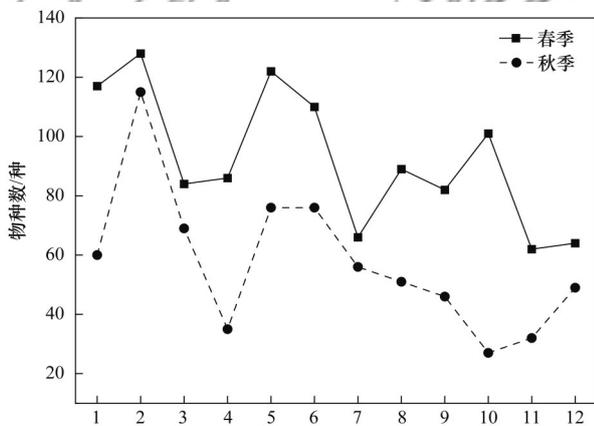
无定河流域干支流及淤地坝水体浮游植物密度和生物量及其对应占比见图5,两季度的各采样水体浮游植物密度变化范围为 $49.58 \times 10^4 \sim 1\,390.06 \times 10^4$ cells·L⁻¹,春季密度平均值(479.95×10^4 cells·L⁻¹)高于秋季密度平均值(171.29×10^4 cells·L⁻¹),两季度浮游植物密度平均值最高为榆林沟淤地坝水体(815.57×10^4 cells·L⁻¹),最低为马湖峪河(105.88×10^4 cells·L⁻¹).两季度的各采样水体浮游植物生物量介于



WD. 无定河干流, HLTH. 海流兔河, LH. 芦河, YXH. 榆溪河, MHYH. 马湖峪河, DLH. 大理河, HNH. 淮宁河, NG. 南沟淤地坝, YLG. 榆林沟淤地坝, JYG. 韭园沟淤地坝

图3 无定河流域采样点1 000 m河岸带缓冲区土地利用类型

Fig. 3 Land use types of riparian buffer zone at 1 000m sampling sites in the Wuding River Basin



1. 干流上游, 2. 干流中游, 3. 干流下游, 4. 海流兔河, 5. 芦河, 6. 榆溪河, 7. 马湖峪河, 8. 大理河, 9. 淮宁河, 10. 南沟淤地坝, 11. 榆林沟淤地坝, 12. 韭园沟淤地坝

图4 无定河流域浮游植物物种数

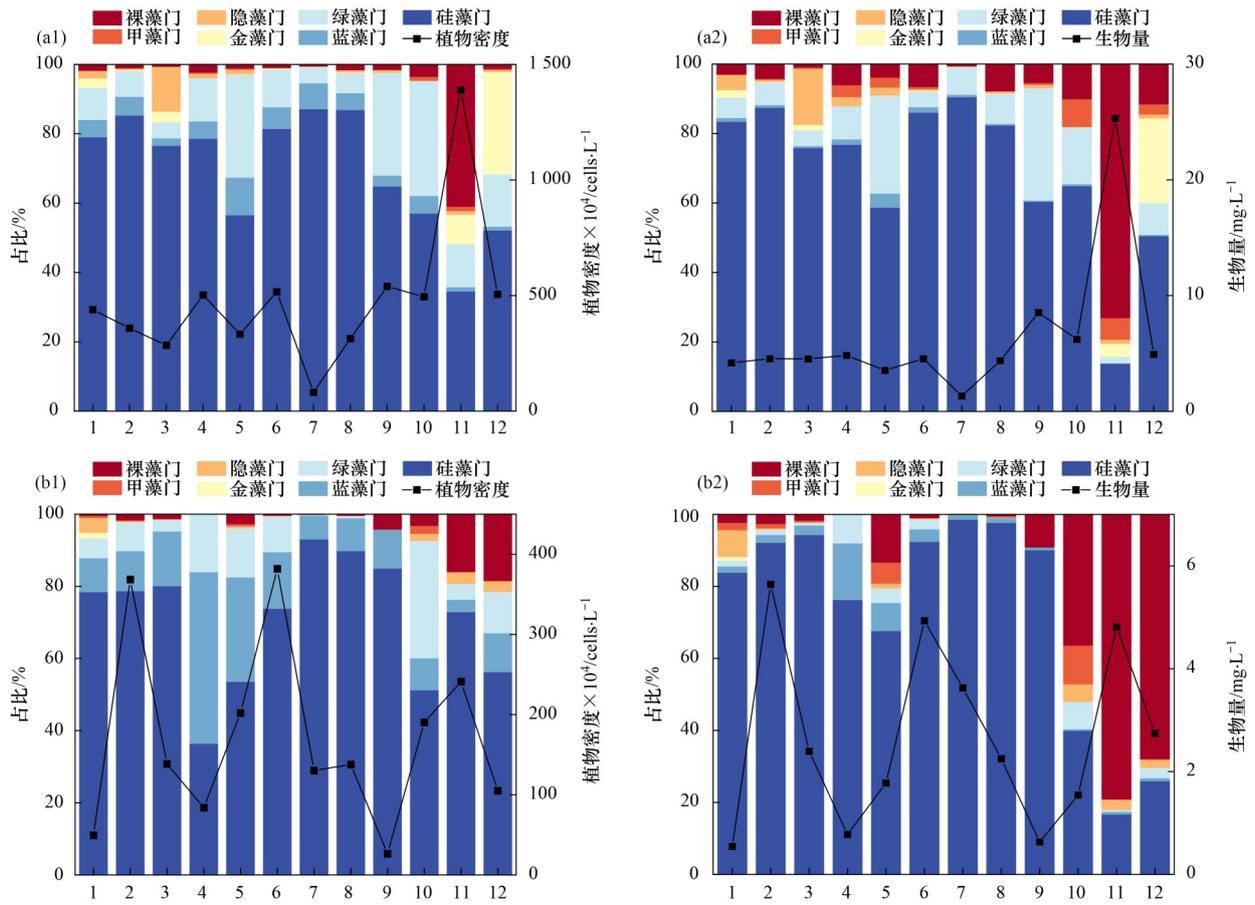
Fig. 4 Number of phytoplankton species in the Wuding River Basin

0.54 ~ 25.31 mg·L⁻¹之间, 春季生物量平均值(6.41 mg·L⁻¹)高于秋季生物量平均值(2.64 mg·L⁻¹), 其极值规律与密度相似, 两季度浮游植物生物量平均值最高为榆林沟淤地坝水体(15.06 mg·L⁻¹), 最低为无定河上游(2.37 mg·L⁻¹). 从时间上看, 浮游植物密度和生物量有较明显的季节差异性, 其中各水体两季度蓝藻门密度和生物量占比为春季低于秋季; 硅藻门、绿藻门和裸藻门等其余门类的密度和生物量呈

现出春季高于秋季的普遍规律. 从空间上看, 浮游植物密度和生物量的两季度平均值体现为: 淤地坝水体>干流>支流的分布规律. 淤地坝水体中裸藻门春和秋两季密度在总量中的占比(24.73%和11.85%)均低于硅藻门(43.01%和62.03%), 但裸藻门生物量占比(53.93%和68.42%)高于硅藻门(27.55%和23.51%), 这与干支流中硅藻门两季生物量占比均为最高不一致, 表明浮游植物密度和生物量在淤地坝水体和干支流水体中存在差异.

2.4 浮游植物优势种和多样性指数

以 Y ≥ 0.02 为标准, 两次调查无定河流域浮游植物优势种共 51 种, 其中硅藻门 21 种, 占优势种类的 43.75%; 绿藻门 15 种, 占优势种类的 31.25%. 调查水体春季优势种 27 种, 秋季优势种 30 种, 硅藻门在两季优势种占比上有绝对的优势, 不同水体浮游植物优势种及优势度见表 1, 其中无定河干流水体优势种以梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、尖针杆藻 (*Synedra acus*)、简单舟形藻 (*Navicula simples*)、谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*)、小席藻 (*Phormidium acutissimum*) 和四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 为主; 淤地坝水体以梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、尖针杆藻 (*Synedra acus*) 和裸藻 (*Euglena spp.*) 为主.



(a) 春季, (b) 秋季; 1. 干流上游, 2. 干流中游, 3. 干流下游, 4. 海流兔河, 5. 芦河, 6. 榆溪河, 7. 马湖峪河, 8. 大理河, 9. 淮宁河, 10. 南沟淤地坝, 11. 榆林沟淤地坝, 12. 韭园沟淤地坝

图5 春季和秋季无定河流域浮游植物生物密度和生物量

Fig. 5 Phytoplankton biological density and biomass in the Wuding River Basin in spring and autumn

表1 无定河流域浮游植物优势种及优势度¹⁾

Table1 Dominant species and degree of phytoplankton in the Wuding River Basin

季节	优势种	干流上游	干流中游	干流下游	海流兔河	芦河	榆溪河	马湖峪河	大理河	淮宁河	南沟	榆林沟	韭园沟	
春季	梅尼小环藻	0.56	0.26	0.12	0.33	0.18	0.44	0.04	0.14	0.17	0.13	0.06	0.06	
	广缘小环藻	—	*	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	
	钝脆杆藻	—	*	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	—	
	两头针杆藻	*	*	—	—	—	*	—	—	*	—	—	0.03	
	尖针杆藻	0.06	0.08	0.03	0.07	0.05	0.10	0.04	0.08	0.05	0.12	0.15	0.29	
	美丽星杆藻	—	0.02	—	0.06	0.02	0.06	0.02	—	—	0.02	—	—	
	简单舟形藻	—	0.04	—	—	—	—	0.03	0.02	—	—	—	*	
	系带舟形藻	—	—	—	—	—	—	0.04	0.04	—	—	—	*	—
	双头舟形藻	—	—	0.03	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—
	扁圆舟形藻	—	—	0.03	—	—	*	—	0.03	—	—	*	*	
	小头菱形藻	—	—	0.03	—	—	—	—	—	*	—	*	*	
	谷皮菱形藻	—	0.04	0.09	0.033	0.03	—	0.03	0.11	0.07	0.03	0.03	—	
	茧形藻	*	—	—	—	—	—	*	—	0.03	—	—	*	
	小席藻	—	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	
	衣藻	—	—	—	*	*	*	*	*	0.03	—	*	*	
	球衣藻	—	—	—	—	0.03	—	*	*	*	—	*	—	
	拟菱形弓形藻	—	—	*	—	*	*	*	—	—	—	0.03	—	
	膨胀四角藻	—	*	*	*	—	—	*	*	*	0.10	—	—	
	湖生卵囊藻	—	—	*	—	—	—	*	*	*	0.04	*	—	
	二形栅藻	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	—	
四尾栅藻	—	—	—	—	0.03	0.02	—	—	—	0.02	—	—		

续表 1

季节	优势种	干流上游	干流中游	干流下游	海流兔河	芦河	榆溪河	马湖峪河	大理河	淮宁河	南沟	榆林沟	韭园沟	
春季	针形纤维藻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06	
	分歧锥囊藻	—	—	—	*	—	—	*	—	*	—	0.04	0.30	
	卵形隐藻	—	—	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	梭形裸藻	—	—	*	—	—	—	*	—	—	—	0.16	*	
	敏捷扁裸藻	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.02	*	
	尖尾扁裸藻	*	*	*	*	*	—	*	—	*	—	0.03	*	
秋季	梅尼小环藻	—	0.19	0.11	*	0.06	0.33	—	0.05	0.09	*	*	—	
	广缘小环藻	*	—	0.02	*	*	—	*	—	—	*	*	—	
	尖针杆藻	0.39	0.18	0.18	0.06	0.19	0.23	0.07	0.06	0.10	0.46	0.47	0.05	
	微型舟形藻	0.02	0.03	—	—	—	—	0.05	0.29	0.02	—	—	—	
	简单舟形藻	—	0.05	0.06	0.03	—	0.04	0.09	0.07	0.10	—	—	—	
	喙头舟形藻	—	—	—	*	—	—	—	0.05	—	*	—	*	
	系带舟形藻	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	*	*	*	
	放射舟形藻	—	—	0.02	*	*	—	0.21	0.02	—	*	*	*	
	英吉利舟形藻	*	0.04	0.09	*	—	—	0.06	0.02	—	*	*	—	
	短小曲壳藻	*	—	—	*	*	—	*	—	—	*	0.19	*	
	弯端菱形藻	—	—	—	0.03	—	—	0.17	*	—	*	*	*	
	谷皮菱形藻	—	0.05	0.07	—	—	—	0.07	0.06	0.06	*	—	0.04	
	两栖菱形藻	—	—	*	*	*	*	*	*	*	*	—	0.03	
	端毛双菱藻	*	—	—	0.03	*	—	—	—	—	*	*	*	
	绿色颤藻	—	—	*	—	—	0.02	—	*	*	*	*	—	
	蓝纤维藻	—	—	—	*	—	0.07	0.05	—	—	*	—	*	
	小席藻	—	0.02	0.07	0.37	0.15	0.04	—	—	0.05	—	—	0.03	
	点形平裂藻	—	*	*	*	—	*	*	*	*	*	0.08	—	*
	小球藻	—	—	*	*	*	*	*	*	*	*	0.03	*	*
	硬弓形藻	*	*	*	0.06	*	*	*	*	—	*	—	*	*
	三角四角藻	—	*	—	*	—	*	—	*	*	*	0.03	—	—
	膨胀四角藻	—	*	—	*	—	*	—	*	*	*	0.05	—	—
	四尾栅藻	—	0.03	—	*	0.04	0.03	—	*	*	*	—	—	—
	光滑鼓藻	*	*	*	*	*	*	*	*	—	*	0.03	*	—
	钝鼓藻	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.08	*	—
	丛球韦斯藻	*	*	—	*	—	—	*	*	*	*	*	*	0.02
	针形纤维藻	*	—	—	—	—	—	—	*	*	*	0.03	—	—
	隐藻	*	*	*	*	—	*	*	*	*	*	—	0.03	—
	裸甲藻	—	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.02	—	—
	裸藻	—	—	*	*	—	*	*	*	*	*	0.03	0.16	0.12

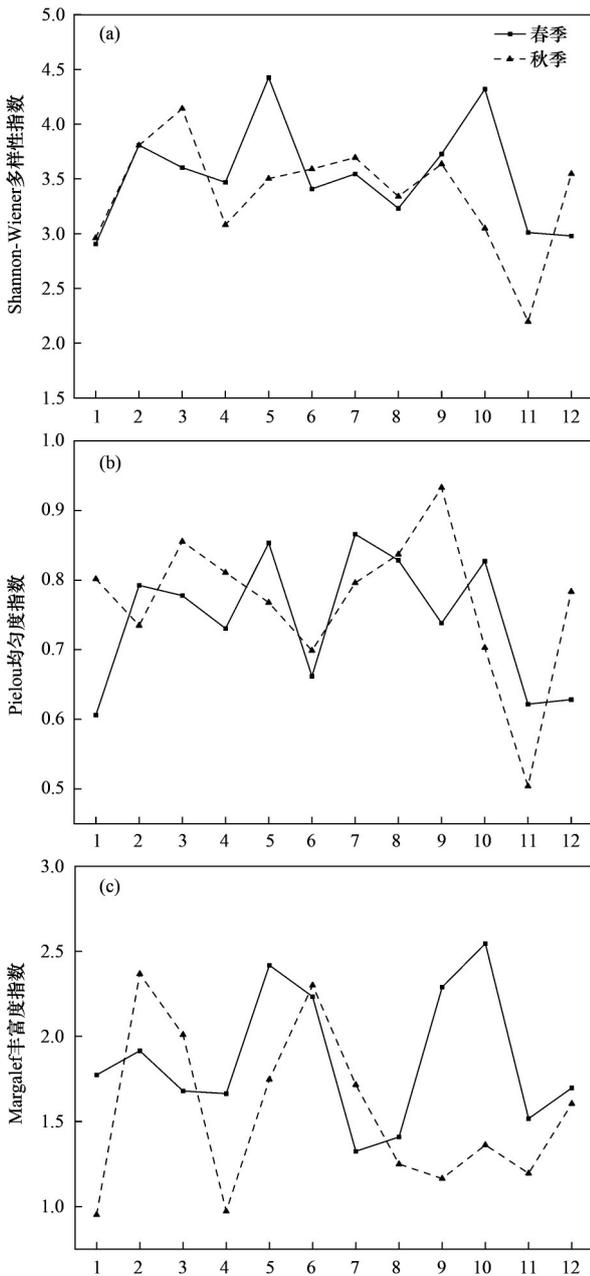
1) $Y \geq 0.02$ 的物种为优势种, “—”表示此物种优势度 $Y < 0.02$, “*”表示未鉴定出此物种

无定河流域春季和秋季 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 均值分别为 3.56 和 3.38, Pielou 均匀度指数 (J) 均值分别为 0.75 和 0.76; Margalef 丰富度指数 (D) 均值分别为 1.91 和 1.58. 随着季节的转变, 浮游植物 H' 和 D 均呈现降低的趋势, 而 J 变化则相对较小, 各季度无定河干支流浮游植物 H' 、 J 及 D 均值普遍高于淤地坝水体 (图 6).

采用 NMDS 方法对无定河流域春季和秋季浮游植物群落进行排序 (图 7), 结果显示干支流采样点与淤地坝水体采样点之间均呈现近乎分离状态, 表明干支流与淤地坝水体浮游植物群落结构差异较大.

2.5 浮游植物群落特征与环境因子的关系

通过结构方程模型确定土地利用和水体理化因子对浮游植物细胞密度和 Chl-a 的直接和间接影响, 其中土地利用类型对浮游植物的直接影响路径不显著, 并从模型中剔除. 春季和秋季结构方程 (图 8) 的拟合优度分别为 0.45 和 0.50. 春季模型表明, 土地利用类型对化学因子具有显著负效应, 标准化路径系数为 $-0.42 (P < 0.01)$, 其对耕地和草地的因子载荷分别为: -0.98 和 0.97 ; 物理因子对浮游植物有显著负效应, 标准化路径系数为 $-0.14 (P < 0.01)$, 其对 WT 和 v 的因子载荷分别为: -0.78 和 0.83 ; 化学因子对浮游植物有显著正效应, 标准化路径系数为 $0.59 (P$



1. 干流上游, 2. 干流中游, 3. 干流下游, 4. 海流兔河, 5. 芦河, 6. 榆溪河, 7. 马湖峪河, 8. 大理河, 9. 淮宁河, 10. 南沟淤地坝, 11. 榆林沟淤地坝, 12. 韭园沟淤地坝

图6 无定河流域浮游植物多样性指数

Fig. 6 Phytoplankton diversity index in the Wuding River Basin

<0.01), 其对 pH、DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的因子载荷分别为: 0.97, 0.86 和 0.65. 秋季模型表明, 土地利用类型对物理因子具有显著正效应, 标准化路径系数为 0.32 ($P<0.01$), 其对耕地和草地的因子载荷分别为: 0.98 和 -0.98; 化学因子对物理因子有显著正效应, 标准化路径系数为 0.64 ($P<0.01$); 物理因子对浮游植物有显著负效应, 标准化路径系数为 -0.31 ($P<0.05$), 其对 WT 和 Turb 的因子载荷分别为: -0.96 和 0.61; 化学因子对浮游植物有显著负效应, 标准化路径系数为 -0.45 ($P<0.01$), 其对 DO 的因子载荷为

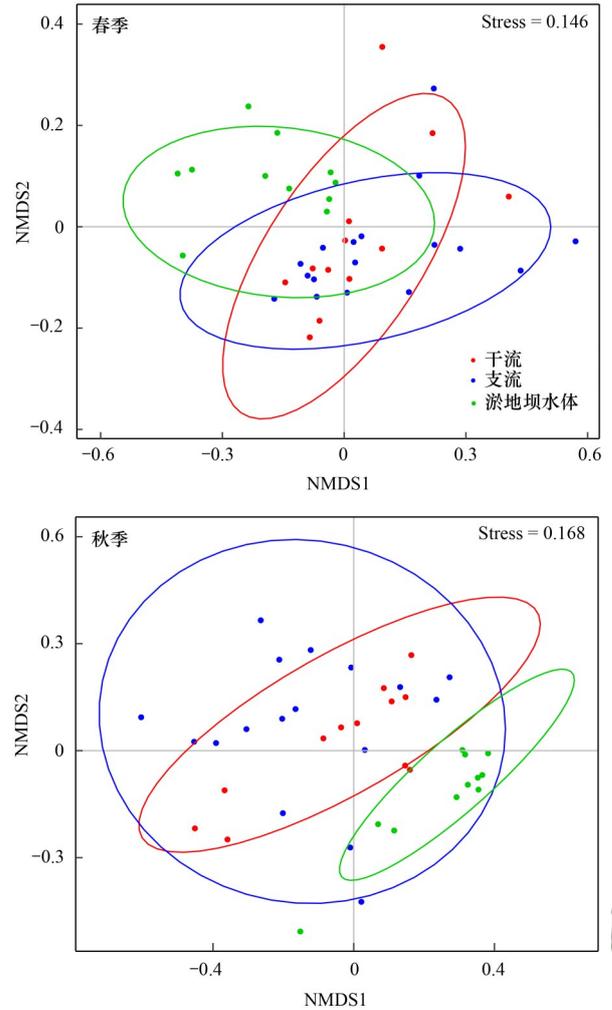


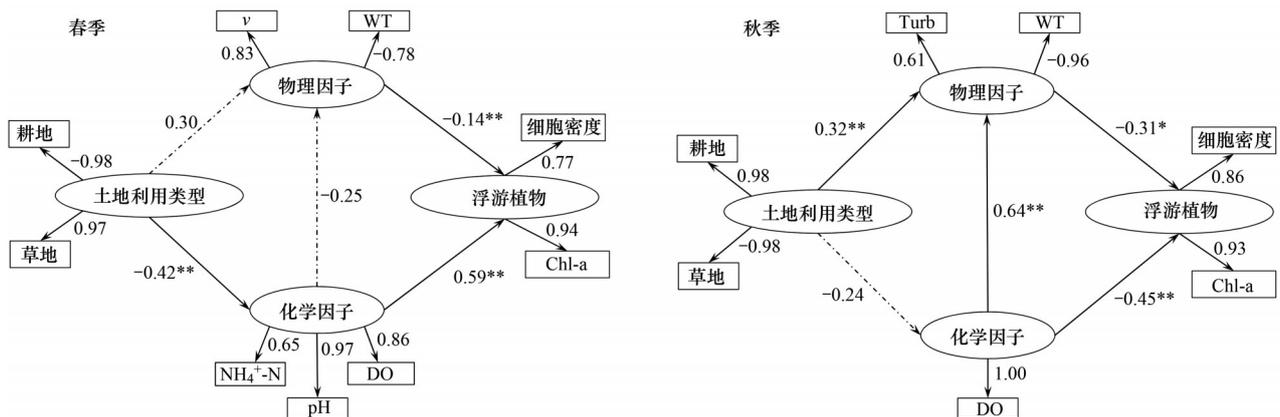
图7 无定河流域春季和秋季浮游植物群落结构的非度量多维标尺排序 (NMDS)

Fig. 7 Non-metric multidimensional scale (NMDS) ranking of phytoplankton community structure in spring and autumn in the Wuding River Basin

1.00.

3 讨论

浮游植物对水环境的敏感性导致其群落特征易受水体生态环境变化影响^[25], 通过对无定河流域干支流河道及淤地坝水体断面的春秋两季水生态调查显示, 其浮游植物群落特征表现出较明显的时空差异性. 从时间来看, 2021年春季共鉴定出浮游植物7门241种, 秋季共鉴定出7门189种, 浮游植物物种组成存在较大差异, 类似研究结果也出现在其他季节性河流中^[26]. 无定河流域春秋两季浮游植物物种组成整体表现为硅藻-绿藻-蓝藻型, 这与黄河干流^[27]和长江干流^[28]等研究结果基本一致, 表明无定河流域浮游植物种类组成具有一般河流的普遍性特征. 无定河流域浮游植物密度与优势门在春秋两季也有所不同. 春季浮游植物群落组成以硅藻门及绿藻门占主要优势, 秋季以硅藻门及蓝藻门占主要优



给出了模型的标准系数, 矩形框架中的内容表示可测变量, 椭圆框架中的内容表示潜在变量; 实线表示显著路径 (*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$); 虚线表示不显著路径

图8 基于土地利用数据、水体理化性质和浮游植物密度的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation model based on land use data physical and chemical properties of water bodies and phytoplankton density

势, 春季主要优势种密度远大于秋季, 可见春秋两季的浮游植物群落特征存在差异, 可能与春秋两季环境异质性有关. 除时间尺度外, 无定河干支流与淤地坝水体浮游植物群落结构也有较大的差异. 无定河干支流物种数较多, 优势种以硅藻、绿藻和蓝藻种类为主, 淤地坝水体物种数相对较少, 优势种以硅藻、绿藻和裸藻种类为主, 这与国内大多数淡水河流和湖泊中浮游植物群落特征相一致. 淤地坝水流流速接近于零, 水体相对静止且有机质含量随着泥沙淤积而逐渐增加, 相比于河流水体更适宜裸藻生存^[29], 因此, 裸藻门优势种在淤地坝水体中普遍出现且优势度逐渐增大.

物种多样性是衡量一定区域内群落演替方向和稳定程度的客观指标, 能够有效地反映水生态环境的变化^[30]. Isbell等^[31]研究指出: 在大多数多样性指数中, 组成群落的物种数量越多, 其多样性数值越大, 而重复性越小, 同时多样性指数大的群落, 其稳定性越强. Shannon-Wiener多样性指数(H')指群落中物种的数量, 群落中种类或个体数量越多, 群落结构越复杂, 同样指数越高, 对环境的反馈越稳定^[32]. Pielou均匀度指数(J)是用来衡量群落中每个物种生物量分类的均匀度, 在一定程度上反映物种生物群落的稳定性. Margalef丰富度指数(D)是通过浮游植物群落结构来反映环境稳定性, 指数越大, 其所反映出环境的稳定性也将越高. 随着春秋季节更替, 无定河流域 H' 和 D 均值普遍呈现降低的趋势, 而 J 值变化范围则相对较小, 这反映出春季无定河流域浮游植物多样性较高, 群落结构相对复杂且稳定性较强, 而秋季群落结构相对简单且抵御外界环境的能力越弱, 这与南水北调中线水源区^[33]的研究结果基本一致. 无定河干支流浮游植物 H' 、 J 及 D 均

值大部分高于淤地坝水体, 表明无定河干支流河道断面相比淤地坝断面浮游植物物种分布较为均匀, 种群分散程度大, 群落结构稳定性相对较高.

有研究表明, 浮游植物群落特征与其所处的生境特征紧密相关, 受水体营养盐浓度、水生生物捕食、水动力学特征及水文动态的直接作用^[34-36]. 土地利用类型同样是浮游植物群落特征的重要驱动因子, 其通过影响水体理化因子可间接影响浮游植物群落特征^[37]. 本研究结构方程模型结果表明, 水体理化因子对浮游植物群落特征有显著影响, 这与Gao等^[38]研究的结果一致. 本研究中, 春季影响浮游植物群落特征的水体理化因子主要有WT、 v 、 NH_4^+-N 、pH和DO. 余业鑫等^[39]研究发现, 水温能够影响藻类呼吸作用的强度和光合作用酶促反应的速率, 其变化直接影响着藻类的生长, 10~30℃下, 水温升高可以促进藻类生长^[40], 春季为浮游植物生长周期的复苏期, 随着温度的升高, 浮游植物密度及生物量会随之增大. 春季水体pH均值为8.31, 呈弱碱性, 有利于浮游植物通过吸收固定 CO_2 , 从而具有较高的初级生产力^[41]. 无定河流域采样点1000m河岸带缓冲区内耕地占比较高, 且春季为陕北地区主要耕灌时段, 坡面耕种等农业活动中氮肥的大量使用导致面源污染, 污染物通过径流、淋溶和侧渗等方式进入各接纳水体, 导致春季水体TN、含氮营养盐等平均浓度较高, 这与徐奇峰等^[42]研究的结果相似. NH_4^+-N 作为代表性含氮营养盐之一, 满足了浮游植物生长对营养盐的需求, 在适宜的pH、水温和光照条件下, 浮游植物会快速增殖并在水中形成一定的生物量. 春季水体DO与浮游植物生长呈正相关, 这与张云等^[43]研究的结果基本一致. 浮游植物通过光合作用提供氧气, 但在无光条件下, 其

会进行呼吸作用消耗氧气, 水体溶解氧浓度较高可以为浮游植物夜间生长提供有利条件. 春季河流流速普遍偏高, 水体快速流动削弱了浮游植物对光照的利用率^[44], 对浮游植物有一定负面影响, 但弱于其余环境因子对浮游植物的促进作用. 秋季影响浮游植物群落特征的水体理化因子主要有 Turb、WT 和 DO. 无定河流域处于陕北地区, 秋季侵蚀性降雨量大于春季^[45], 降雨对河床岸坡及耕地的冲刷会导致水体悬浮颗粒物含量增大^[46], 且降雨汇流引起水量的增加会稀释浮游植物细胞密度^[47]. 秋季水体浊度升高, 悬浮颗粒物对光照有遮蔽作用, 水体透明度降低, 导致水体光合有效辐射降低, 抑制了浮游植物光合作用. 秋季大量有机质伴随水土流失进入到水体中, 在微生物作用下, 有机质氧化分解消耗大量溶解氧且秋季水温高于春季, 随着水温升高, 水体溶解氧浓度逐渐降低^[48]. 在无法进行光合作用条件下, 水体溶解氧浓度降低会极大限制浮游植物生长和增殖. 本研究发现秋季 DO 对解释浮游植物群落特征的贡献呈负相关, 可见在不同季节影响下, DO 与浮游植物群落特征的相关性并不一致. 无定河流域作为黄河流域中游水土流失区域典型流域, 水体浊度普遍偏高, 与长江流域^[49]相比, 浊度作为特有影响因子对无定河流域浮游植物群落特征有着重要影响.

4 结论

(1) 无定河流域共鉴定出浮游植物 7 门 90 属 273 种, 其中春季物种数、密度及生物量均高于秋季, 优势度均为硅藻门种类最高. 随着季节转变, 浮游植物群落组成存在着由硅藻-绿藻型向硅藻-蓝藻型转变的趋势, 且淤地坝水体中裸藻门种类优势度逐渐增大.

(2) 生物多样性指数显示, 春季 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数高于秋季, 春季浮游植物群落结构相对复杂且稳定性较强. 两季均无绝对单一优势种, Pielou 均匀度变化相对稳定.

(3) 在不同季节, 土地利用类型和水体理化因子均能解释浮游植物群落组成的大部分变化. 影响无定河流域浮游植物群落特征的环境因子主要有 WT、 v 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、pH、DO 和 Turb, 且春季受化学因子影响较大, 秋季受物理因子影响较大.

参考文献:

[1] 高照良, 李永红, 徐佳, 等. 黄土高原水土流失治理进展及其对策[J]. 科技和产业, 2009, 9(10): 1-12.
Gao Z L, Li Y H, Xu J, *et al.* Research on eco-construction and control measures of soil and water loss in the loess plateau [J]. science Technology and Industry, 2009, 9(10): 1-12.

- [2] 张含玉. 黄河中游多沙粗沙区侵蚀产沙变化特征及影响因子分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
Zhang H Y. Spatiotemporal variation of soil erosion and its influence factors in the middle reaches of the Yellow River [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment), 2016.
- [3] 颜明, 孙莉英, 闫云霞, 等. 风水两相作用和人类活动对无定河粗泥沙输沙量的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 89-92.
Yan M, Sun L Y, Yan Y X, *et al.* Effects of interactive fluvial and aeolian processes along with human activities on coarse sediment yield in Wudinghe River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 89-92.
- [4] 唐润芒, 陈谦. 无定河重点治理工程的综合治理技术与成效[J]. 中国水土保持, 2002, (3): 32-34.
Tang R M, Chen Q. Comprehensive management technology and effects of key control works of wuding river [J]. Soil and Water Conservation in China, 2002, (3): 32-34.
- [5] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
Liu G B, Shanguan Z P, Yao W Y, *et al.* Ecological effects of soil conservation in loess plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19.
- [6] 李敏. 淤地坝在黄河中游水土流失防治中的作用[J]. 人民黄河, 2003, 25(12): 25-26.
Li M. Function of warping dams in prevention and management of soil and water loss in the middle Yellow River [J]. Yellow River, 2003, 25(12): 25-26.
- [7] 马煜栋, 杨帅, 韩静, 等. 陕西榆林地区无定河流域淤地坝遥感解释[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 786-791.
Ma Y D, Yang S, Han J, *et al.* Remote sensing interpretation of check dams in Wuding River Basin in Yulin area of Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 786-791.
- [8] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1833-1840.
Yang W, Zhu J Y, Lu K H, *et al.* The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1833-1840.
- [9] 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 等. 长江三口-西洞庭湖环境因子对浮游动物群落组成的影响[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(2): 23-32.
Yan G H, Yin X Y, Wang X, *et al.* Effects of environmental factors on zooplankton community composition in the three outlets of Yangtze River to West Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(2): 23-32.
- [10] 李然然, 章光新, 张蕾. 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2663-2673.
Li R R, Zhang G X, Zhang L. Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2663-2673.
- [11] 张庆吉, 王业宇, 王金东, 等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1648-1656.
Zhang Q J, Wang Y Y, Wang J D, *et al.* Succession pattern of phytoplankton and its drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1648-1656.
- [12] 孙亚玲, 刘进琪, 邹松兵. 渭河上游浮游植物群落结构对空间

- 环境响应的差异性研究[J]. 水利水电技术, 2019, **50**(7): 144-152.
- Sun Y L, Liu J Q, Zou S B. Study on difference of response from phytoplankton community structure to spatial environment in Upper Weihe River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, **50**(7): 144-152.
- [13] 屈宁, 邓建明, 张祯, 等. 2015~2020年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3097-3105.
- Qu N, Deng J M, Zhang Z, *et al.* Community structure of phytoplankton and environmental impact factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3097-3105.
- [14] 王俊颖, 夏雨, 于新平, 等. 赣江中下游浮游藻类时空分布特征及水质评价[J]. 生态与农村环境学报, 2023, **39**(8): 1031-1041.
- Wang J J, Xia Y, Yu X P, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and water quality evaluation of planktonic algae in the middle and lower reaches of Ganjiang River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, **39**(8): 1031-1041.
- [15] 赵鑫, 王琳, 郑帅, 等. 黄河中游支流无定河流域源头区浮游生物和底栖动物群落特征与环境因子分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(10): 121-132.
- Zhao X, Wang L, Zheng S, *et al.* Analysis on community characteristics and environmental factors of plankton and zoobenthos in headwater area of Wudinghe River Watershed: a tributary of mid Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, **52**(10): 121-132.
- [16] SC/T 9402-2010, 淡水浮游生物调查技术规范[S].
- [17] HJ 636-2012, 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [18] GB 11893-1989, 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].
- [19] HJ 535-2009, 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S].
- [20] HJ/T 346-2007, 水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法(试行)[S].
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱[M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [23] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China-systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [24] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [25] Stomp M, Huisman J, Mittelbach G G, *et al.* Large-scale biodiversity patterns in freshwater phytoplankton [J]. Ecology, 2011, **92**(11): 2096-2107.
- [26] 孙来康, 杨涛, 万旭昊, 等. 西安城市河流浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2023, **47**(4): 543-555.
- Sun L K, Yang T, Wan X H, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Xi'an urban rivers system [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, **47**(4): 543-555.
- [27] 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.
- [28] 钟可儿, 杨潇, 马吉顺, 等. 长江干流浮游植物群落结构空间异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(11): 2458-2472.
- Zhong K E, Yang X, Ma J S, *et al.* Spatial heterogeneity and driving factors of phytoplankton community structure in the Main Stem of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(11): 2458-2472.
- [29] 李飞鹏, 高雅, 张海平, 等. 流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 44-49.
- Li F P, Gao Y, Zhang H P, *et al.* Simulation experiment on the effect of flow velocity on phytoplankton growth and composition [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(1): 44-49.
- [30] 霍堂斌. 嫩江下游水生生物多样性及生态系统健康评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- Huo T B. The study on aquatic biodiversity and ecosystem health assessment in the downstream of Nenjiang River [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [31] Isbell F I, Polley H W, Wilsey B J. Biodiversity, productivity and the temporal stability of productivity: patterns and processes [J]. Ecology Letters, 2009, **12**(5): 443-451.
- [32] 韩谱, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(11): 2621-2631.
- Han X, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the Source region of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(11): 2621-2631.
- [33] 赵志楠, 王俊健, 张元娜, 等. 南水北调中线水源区浮游植物群落结构及其生物多样性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, **20**(5): 914-924.
- Zhao Z N, Wang J J, Zhang Y N, *et al.* Phytoplankton community structure and biodiversity in the water source area along the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, **20**(5): 914-924.
- [34] 肖利娟, 望甜, 韩博平. 流溪水库的盞形溞和舌状叶镖水蚤对浮游植物的牧食影响研究[J]. 生态科学, 2008, **27**(5): 362-367.
- Xiao L J, Wang T, Han B P. Grazing of *daphnia galeata* and *phylloidiaptomus tunguidus* on phytoplankton in Liuxihe Reservoir, South China; *in situ* bottle experiments [J]. Ecological Science, 2008, **27**(5): 362-367.
- [35] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 159-170.
- Yang S Q, Zu T X, Wang H B, *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(1): 159-170.
- [36] 张海涵, 王娜, 宗容容, 等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(1): 181-190.
- Zhang H H, Wang N, Zong R R, *et al.* Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(1): 181-190.
- [37] Katsiapi M, Mazaris A D, Charalampous E, *et al.* Watershed land use types as drivers of freshwater phytoplankton structure [J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 121-131.
- [38] Gao X L, Song J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China

- [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(3): 327-335.
- [39] 余业鑫, 李艳, 向罗京, 等. 汉江下游干支流浮游植物群落特征及其对水质的指示评价[J]. *中国环境监测*, 2022, **38**(1): 124-135.
Yu Y X, Li Y, Xiang L J, *et al.* Phytoplankton assemblage characteristic and its indication on water quality in the lower reaches of the Hanjiang River [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, **38**(1): 124-135.
- [40] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 45-50.
Fang L J, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 45-50.
- [41] Jakobsen H H, Blanda E, Staehr P A, *et al.* Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2015, **473**: 81-89.
- [42] 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 等. 无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3174-3183.
Xu Q F, Xia Y, Li S J, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and source analysis of nitrate in surface water of Wuding River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3174-3183.
- [43] 张云, 马徐发, 郭飞飞, 等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 902-910.
Zhang Y, Ma X F, Guo F F, *et al.* Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahé Reservoir, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 902-910.
- [44] 朱宜平, 张海平, 李飞鹏, 等. 水动力对浮游生物影响的围隔研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 69-75.
Zhu Y P, Zhang H P, Li F P, *et al.* Enclosure experiments about the hydrodynamics effects on the plankton [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 69-75.
- [45] 胡琳, 苏静, 桑永枝, 等. 陕西省降雨侵蚀力时空分布特征[J]. *干旱区地理*, 2014, **37**(6): 1101-1107.
Hu L, Su J, Sang Y Z, *et al.* Spatial and temporal characteristics of rainfall erosivity in Shaanxi Province [J]. *Arid Land Geography*, 2014, **37**(6): 1101-1107.
- [46] 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(8): 2886-2894.
Liu R, Yu X X, Cai Q G, *et al.* Erosion process of loess slope and influencing factors in the loess hilly-gully region, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(8): 2886-2894.
- [47] 张萍, 国超旋, 俞洁, 等. 钱塘江干流夏季浮游植物群落结构特征及其对水文气象的响应[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(2): 418-432.
Zhang P, Guo C X, Yu J, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure and its response to hydro-meteorology in summer of Qiantang River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(2): 418-432.
- [48] 潘向忠, 高玉蓉, 李佳, 等. 钱塘江杭州段水体中溶解氧现状及影响因素[J]. *环境保护科学*, 2011, **37**(4): 13-16, 58.
Pan X Z, Gao Y R, Li J, *et al.* Dissolved oxygen in water and influencing factors of Qiantang River in Hangzhou section [J]. *Environmental Protection Science*, 2011, **37**(4): 13-16, 58.
- [49] 张静, 胡愈忻, 胡圣, 等. 长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2072-2082.
Zhang J, Hu Y X, Hu S, *et al.* Environmental driving factors and assessment on the aquatic ecosystem of periphytic algae of six inflow rivers in Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2072-2082.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)