

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系

王佳俊^{1,2,3}, 田瀚鑫^{1,2,3}, 周磊^{1,2,3}, 徐德福^{1,2,3*}, 张建伟⁴, 彭措次仁⁵

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 4. 南京信息工程大学数理与统计学院, 南京 210044; 5. 拉鲁湿地国家级自然保护区管理局, 拉萨 850000)

摘要: 植物的多样性对湿地生态系统的完整性和稳定性具有重要的意义. 以拉鲁湿地为研究对象, 采用野外调查、现场监测与室内分析相结合, 重点分析了拉鲁湿地不同区域植物多样性的变化及其与水环境因子之间的关系. 结果表明拉鲁湿地出现 18 种水生植物, 各区域 Margalef 物种丰富度指数为 M(中西部) > W(西部) > E(东部) > N(北部) > S(南部); 物种丰富度由大到小排序为 W(11) > M(11) > N(8) > E(7) > S(6); Shannon-Wiener 指数依次排序为 M(1.9) > W(1.89) > S(1.63) > E(1.26) > N(1.18); Simpson 指数依次排序为 N(0.44) > E(0.34) > M(0.24) > S(0.21) > W(0.18); Pielou 指数依次排序为 S(0.91) > M(0.79) > W(0.78) > E(0.65) > N(0.56). RDA 分析表明, 拉鲁湿地水生植物多样性受溶解氧、pH、水温、总氮、浊度等水环境因子的影响. 拉鲁湿地以金鱼藻、杉叶藻、水蓼、水葱、菖蒲和灯芯草等为优势种, 呈现由非耐污种演替为耐污种趋势.

关键词: 拉鲁湿地; 水生植物; 多样性; 水质; 冗余分析(RDA)

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1657-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910083

Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland

WANG Jia-jun^{1,2,3}, TIAN Han-xin^{1,2,3}, ZHOU Lei^{1,2,3}, XU De-fu^{1,2,3*}, ZHANG Jian-wei⁴, PEN CUO Ci-ren⁵

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China; 3. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China; 4. School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 5. Lhalu Wetland National Nature Reserve, Lhasa 850000, China)

Abstract: Plant diversity plays an important role in the integrity and stability of wetland ecosystems. Lhalu Wetland is the highest wetland in the world and is the largest urban natural swamp in China. It plays an important role in ecological balance, increasing air humidity, improving the urban climate, and purifying the water environment in Lhasa. The changes in plant diversity in different areas of the Lhalu Wetland and its relationship with water environmental factors were analyzed via field investigation, field monitoring, and indoor analysis. Results showed that 18 species of aquatic plants were found in the Lhalu Wetland. The Margalef species richness index was in the order M (Middle west) > W (West) > E (East) > N (North) > S (South). Index of species richness ranked of W (11), M (11) > N (8) > E (7) > S (6). Index of Shannon-Wiener followed that of M (1.9) > W (1.89) > S (1.63) > E (1.26) > N (1.18). Index of Simpson ranked of N (0.44) > E (0.34) > M (0.24) > S (0.21) > W (0.18). The order of Pielou index was that of S (0.91) > M (0.79) > W (0.78) > E (0.65) > N (0.56). Redundancy analysis showed that the diversity of aquatic plants in the Lhalu Wetland was affected by dissolved oxygen, pH, water temperature, total nitrogen, and turbidity. The dominant species in the Lhalu Wetland are *Ceratophyllum demersum* L., *Hippuris vulgaris*, *Polygonum hydropiper*, *Sagittaria arifolia*, *Acorus calamus*, and *Juncus effusus*, which show a trend of non-pollution-resistant species succession to pollution-resistant species.

Key words: Lhalu Wetland; aquatic plant; diversity; water quality; redundancy analysis(RDA)

西藏作为中国国土海拔最高的区域,其土地面积约为 1.2 亿 hm^2 ,约占国土总面积的八分之一,其省会拉萨市位于中国西南边陲.西藏既是南亚、东南亚地区的“江河源”与“生态源”,也是中国乃至东半球气候的“启动与调节区”,作为青藏高原的主要城市,西藏所包含的地貌种类较多,地貌大致可分为喜马拉雅山区,藏南谷地,藏北高原和藏东高山峡谷区.湿地被誉为“地球之肾”,其具有调节生态多样性、改善水质的功能,地处于西藏拉萨市的拉鲁湿地是整个青藏高原地区生态环境维护重要区域^[1~4].

拉鲁湿地是世界上海拔最高、我国面积最大的城市天然沼泽地,其在生态平衡、增加空气湿度、改善拉萨市的城市气候和净化拉萨水环境等方面都起着极其重要的作用^[5].

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2019-11-09

基金项目: 拉萨市城关区拉鲁湿地生态专题项目(2018h309); 江苏省自然科学基金项目(BK20141477); 江苏高校“青蓝工程”项目(20161507); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-057)

作者简介: 王佳俊(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为湿地生态修复与评价, E-mail: wangjiajunx@163.com

* 通信作者, E-mail: defuxu1@163.com

水生植物群落与环境因子之间是相互作用的,环境因子的变化将影响植物群落的变化.为此,很多学者都开展环境因素变化对植物群落的影响研究.如赵敏等^[6]研究了基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系.王东波等^[7]报道了冰封期呼伦湖浮游藻类群落结构及其与水环境因子的关系.刘晓玲等^[8]分析了氮磷供应条件对黄河三角洲滨海湿地植物群落结构的影响.在拉鲁湿地植物群落研究方面,李春^[9]认为拉鲁湿地中新的植物群落的入侵和定居已使拉鲁湿地植物群落由早期的单一化向多样化变化发展,早期以芦苇群落和苔草群落占绝对优势的特征已经不复存在,拉多等^[5]则针对拉鲁湿地植物物种组成与环境因子的关系做了相关研究,王丽等^[10]研究了拉鲁湿地不同水位梯度下植物的多样性特征.上述研究多集中在10年前的研究或通过控制水位梯度研究植物组成的变化,然而有关拉鲁湿地植物多样性变化及其与水环境因子之间的相互关系研究鲜见报道.为此,本研究调查了拉鲁湿地水生植物群落和水环境因子,采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)方法,分析了水生植物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数等变化及其与水环境因子之间的关系,旨在为未来该区域的生态修复与环境污染治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

拉鲁湿地国家级自然保护区位于西藏自治区首府拉萨市市区西北,呈东西带状分布.地理坐标介于E91°03'41"~91°06'48", N29°39'25"~29°42'08"之间.拉鲁湿地北面为高山;东面与拉萨市城关区拉鲁

乡居民区接壤;东北面与流沙河相接,流沙河发源于拉萨市西北部中低山区,由夺底和娘热两条山沟支流汇合而成,是一条典型的季节性河流;南面紧邻拉萨市城区,以拉萨河引水的中干渠和当热路为界,西面至加油站.中干渠补给水引自献多水电站尾水,引用流量为 $55.44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.西面则以当热路和与北面高山的交接处为终点.拉鲁湿地被通往西藏自治区党校的鲁定北路分为东西两片湿地,两片湿地之间通过涵洞相连.

1.2 取样方法

拉鲁湿地总体上从东北向西南略为倾斜,从东至西地面坡度为3‰~5‰,水从东部流入东部湿地,然后一部分从鲁定公路下的涵洞流入西部湿地,并从西部湿地西南角流出,另一部分从鲁定公路右侧流出湿地.因此,根据拉鲁湿地的地形特征和水流状况,将拉鲁湿地分为5个区域,分别为东部(E)、南部(S)、北部(N)、中西部(M)和西部(W).东部靠近拉萨市城关区拉鲁乡居民区;北部为流沙河补给水流经的湿地区域;南部为中干渠进水流经湿地区域;中西部为鲁定公路两侧,且由东部流经西部的涵洞区;西部为西部湿地.

2019年5月进行了植物调查,具体方法为,沿湿地边缘且有水域地带由西到东布置采样样方.西部设11个样方,包括采样点1~11号;中西部设6个样方,包括采样点12~16号和47号;南部设12个样方,包括采样点36~46号和48号;北部设10个样方,分别是17~26号采样点;东部设9个样方,分别是27~35号采样点,具体的采样点见图1.样方大小均为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,调查并记录每个样方的植物的种类、株数、株高、冠幅、盖度和生物量(干重),然后计算出各植物种类的重要值和物种多样性指数,

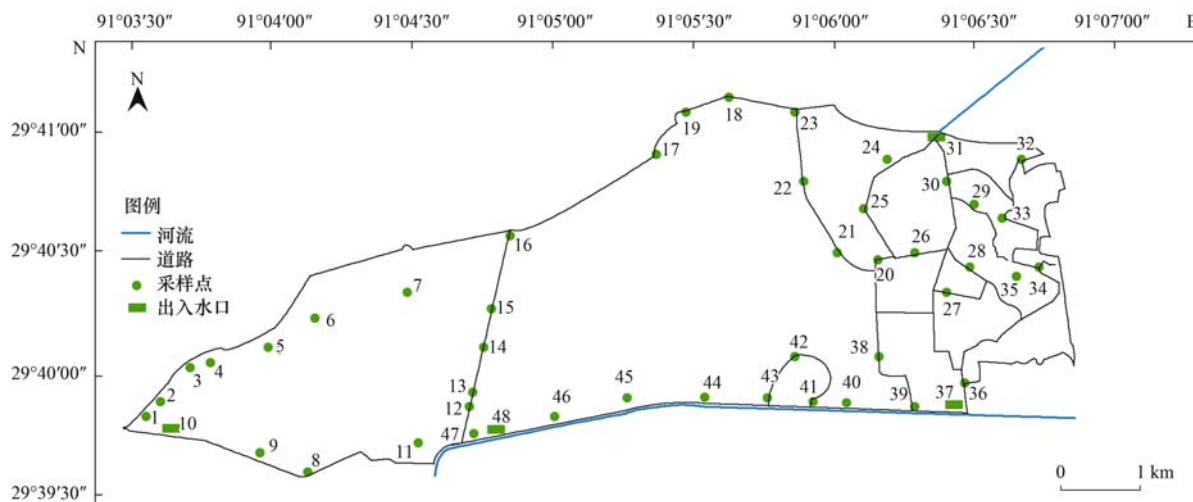


图1 拉鲁湿地采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Lhalu Wetland

同时测定每个样方的水质。

1.3 水质指标检测方法

采用便携式多参数水质仪(美国 YSI ProDSS)现场监测了拉鲁湿地各采样点的 DO、pH、温度、电导率和浊度。每个采样点测 3 次,并取其平均值,代表该样点测量值。采用文献[11]的方法分析水样的总氮、氨氮和总磷。

1.4 数据处理

每个样方分别统计其植物种类、所属的科与属,并统计每个种在样方中的数量。相对密度、相对频度和相对盖度计算方法如下:

(1)密度和相对密度按下列公式计算^[12]

密度 = 个体数量/样地面积

相对密度 = $\frac{\text{一个种的密度}}{\text{所有种的密度}} \times 100\%$ 。

(2)频度和相对频度按下列公式计算^[12]

频度 = 包含该种的样地数/样地总数

相对频度 = $\frac{\text{一个种的频度}}{\text{所有种的总频度}} \times 100\%$ 。

(3)盖度和相对盖度按下列公式计算^[12]

盖度 = $\frac{\text{样方内一个种的植株或灌丛的冠幅}}{\text{样方面积}}$

相对盖度 = $\frac{\text{一个种的盖度}}{\text{样方内所有种的总盖度}} \times 100\%$ 。

(4)物种重要值和多样性指数按下列公式计算^[12]

重要值 = $\frac{\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}}{3}$

Margalef 指数(R): $R = \frac{S-1}{\ln N}$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数(J): $J = \frac{H}{\ln S}$

Simpson 指数(D): $D = \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$

式中, S 为样方内所有物种数, N 为个体总数, P_i 是第 i 种的个体数, n_i 占总个体数 N 的比例,即 $P_i = n_i/N$ 。

1.5 数据分析

应用 EXCEL 2007 对所取样方内植物种类、株数、生物量、株高和盖度等进行统计并计算出相应物种多样性指数,并采用 Origin 9.0 绘制水质箱线图。采用 SPSS 20 分析了拉鲁湿地不同区域水质的变化,另外,采用 Canoco 4.5 对 5 个区域的植物因子与环境因子进行 DCA 分析,并通过选择线性模型冗余

分析(RDA)^[13]方法,分析植物多样性与水环境因子间的关系,且采用蒙特卡洛(Monte Carlo)进行显著性检验^[14]。

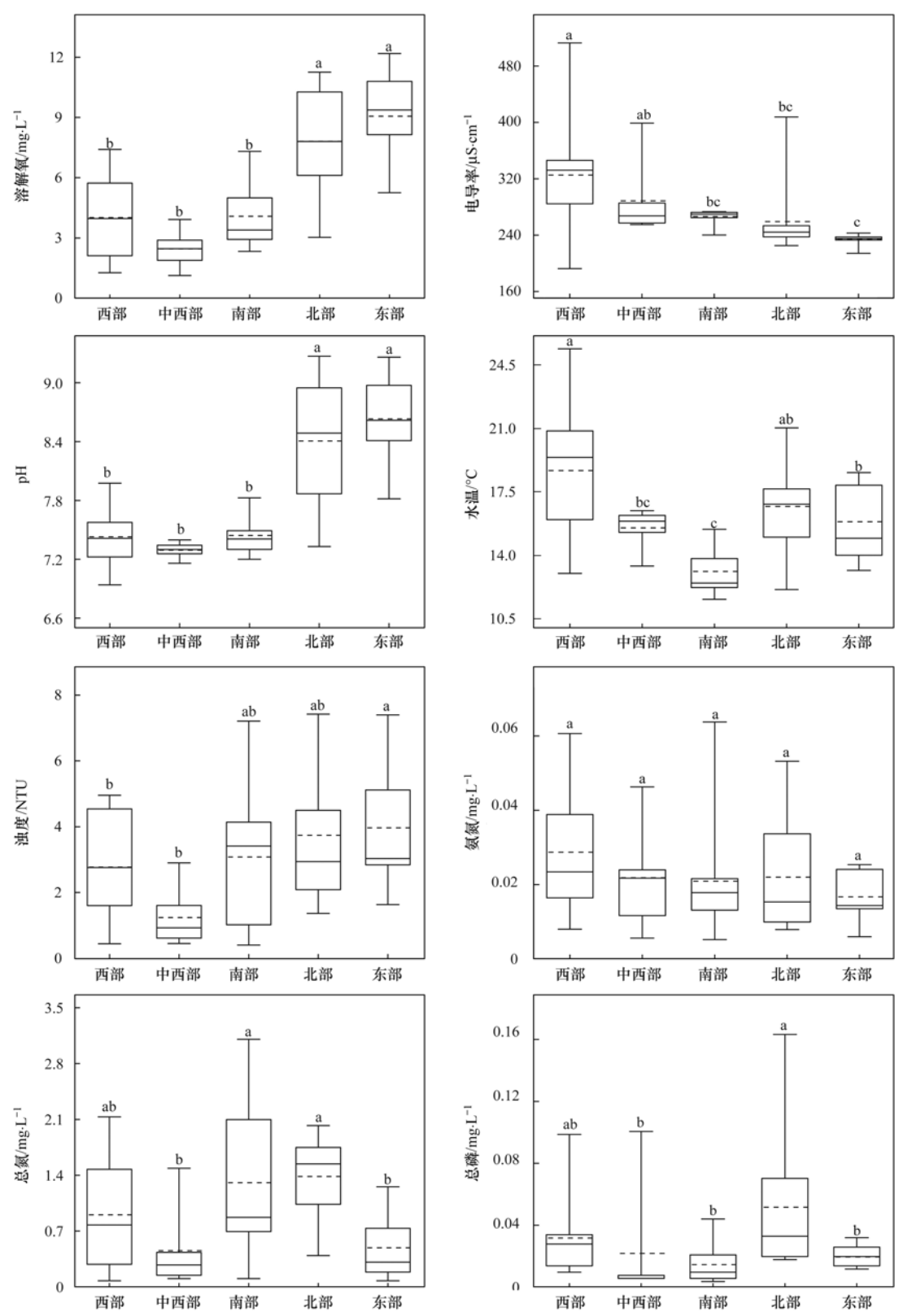
2 结果与分析

2.1 拉鲁湿地不同区域水环境因子特征

拉鲁湿地水质变化如图 2 所示,从中可以看出,对于 DO 含量,东部(平均为 $9.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和北部(平均为 $7.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)比较高,中西部(平均为 $2.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)比较低,且东部显著高于中西部($P < 0.05$)。对于电导率,西部较高(平均为 $325.46 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$),中西部(平均为 $288.60 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)其次,南部(平均为 $266.46 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)、北部(平均为 $259.32 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)和东部(平均为 $234.29 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)均比较低,且西部显著高于东部($P < 0.05$)。对于 pH,北部(平均为 8.41)和东部(平均为 8.63)较高,中西部(平均为 7.29)较低,其东部显著高于中西部($P < 0.05$)。对于水温,西部(平均为 18.02°C)较高,南部(平均为 13.11°C)较低;中西部(平均为 15.52°C)、北部(平均为 16.70°C)和东部(平均为 15.85°C)差异性不显著,但其西部显著高于南部($P < 0.05$)。对于浊度,东部(平均为 3.97 NTU)和北部(平均为 3.74 NTU)显著高于中西部(平均为 1.24 NTU)($P < 0.05$),西部(平均为 2.77 NTU)和南部(平均为 3.08 NTU)差异性不显著。对于水中氨氮,西部(平均为 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)则较高,东部(平均为 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)则较低,各个区域之间差异性不大。对于水中总氮,南部(平均为 $1.306 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与北部(平均为 $1.384 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较高,中西部(平均为 $0.453 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较低,南部与北部显著高于中西部和东部($P < 0.05$);对于水中总磷,北部(平均为 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较高,南部(平均为 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)较低,各区域之间差异性不大。

2.2 拉鲁湿地不同区域物种组成

本次调查,拉鲁湿地调查区域内有 17 科 17 属共 18 种水生植物,包含草本 17 种,灌木 1 种。从表 1 可以看出,湿地西部地区据统计共有 11 种,其中杉叶藻和水葱为优势种,其物种重要值由高到低依次为杉叶藻、水葱、菖蒲、空心莲子草、香蒲、灯芯草、芦苇、金鱼藻、萍蓬草、眼子菜和狐尾藻。湿地中西部共有 11 种,其中金鱼藻为优势种,其物种重要值由高到低依次为金鱼藻、水蓼、狐尾藻、菖蒲、水葱、芦苇、空心莲子草、萍蓬草、灯芯草、沿阶草和菹草。湿地南部地区共有 6 种,其中水蓼为优势种,其按物种重要值由高到低依次为水蓼、菖蒲、水葱、芦苇和杉叶藻。



不同者小写英文字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$) ; 箱体代表上四分位数到下四分位数, 两端须线代表最值, 箱体内部实线代表中位数, 虚线代表平均值

图 2 拉鲁湿地不同区域之间的水因子特征

Fig. 2 Characteristics of water factors in different regions of the Lhalu Wetland

和水苦荬;湿地北部地区共有 8 种,其中水蓼为优势种,其按物种重要值由高到低依次为水蓼、灯芯草、水葱、香附草、绿萍、眼子菜、酸木和芦苇;湿地东部

地区共有 7 种,其中水葱为优势种,其按物种重要值由高到低依次为水葱、灯芯草、菖蒲、香蒲、眼子菜、水蓼和芦苇。

表 1 拉鲁湿地物种组成与重要值
Table 1 Species composition and important values
in the Lhalu Wetland

样地	植物	科属	重要值
西部 (W)	杉叶藻	杉叶藻科杉叶藻属	23.56
	水葱	莎草科藨草属	21.91
	菖蒲	天南星科菖蒲属	11.39
	空心莲子草	苋科莲子草属	9.99
	香蒲	香蒲科香蒲属	6.46
	灯芯草	灯芯草科灯芯藻属	6.45
	芦苇	禾本科芦苇属	5.99
	金鱼藻	金鱼藻科金鱼藻属	5.85
	萍蓬草	睡莲科萍蓬草属	4.72
	眼子菜	眼子菜科眼子菜属	2.29
	狐尾藻	小二仙草科狐尾藻属	1.40
中西部 (M)	金鱼藻	金鱼藻科金鱼藻属	21.16
	水蓼	蓼科蓼属	17.05
	狐尾藻	小二仙草科狐尾藻属	15.69
	菖蒲	天南星科菖蒲属	15.45
	水葱	莎草科藨草属	7.57
	芦苇	禾本科芦苇属	7.43
	空心莲子草	苋科莲子草属	4.11
	萍蓬草	睡莲科萍蓬草属	3.47
	灯芯草	灯芯草科灯芯藻属	3.29
	沿阶草	百合科沿阶草属	2.54
	菹草	眼子菜科眼子菜属	2.23
南部 (S)	水蓼	蓼科蓼属	28.97
	菖蒲	天南星科菖蒲属	22.96
	水葱	莎草科藨草属	19.45
	芦苇	禾本科芦苇属	14.36
	杉叶藻	杉叶藻科杉叶藻属	9.28
	水苦荬	玄参科婆婆纳属	4.97
北部 (N)	水蓼	蓼科蓼属	30.57
	灯芯草	灯芯草科灯芯藻属	26.68
	水葱	莎草科藨草属	13.66
	香附草	莎草科莎草属	9.10
	绿萍	满江红科满江红属	8.46
	眼子菜	眼子菜科眼子菜属	6.62
	酸木	杜鹃花科酸模属	2.63
	芦苇	禾本科芦苇属	2.28
东部 (E)	水葱	莎草科藨草属	46.15
	灯芯草	灯芯草科灯芯藻属	18.20
	菖蒲	天南星科菖蒲属	16.49
	香蒲	香蒲科香蒲属	5.51
	眼子菜	眼子菜科眼子菜属	5.20
	水蓼	蓼科蓼属	3.51
	芦苇	禾本科芦苇属	2.98

2.3 拉鲁湿地不同区域植物多样性

拉鲁湿地不同区域植物丰富度如表 2 所示. 从中可以看出,各区域按物种丰富度由大到小排序为 (W、M) > N > E > S, Margalef 物种丰富度指数依次 M > W > E > N > S,说明湿地中西部的植物种类最多;按 Shannon-Wiener 指数依次排序为 M > W > S > E > N,说明中西部的植物群落所包含的植物信息量大,群落的复杂程度较其他地区高;按 Simpson 指数

依次排序为 N > E > M > S > W,说明西部的植物群落中以水葱、杉叶藻为主的优势度最大;按 Pielou 指数依次排序为 S > M > W > E > N,说明南部植物群落分布最均匀.

2.4 拉鲁湿地水环境因子与植物多样性之间的关系

本研究的 5 个区域的 4 个轴中梯度最大值分别为 1.450、0.791、0.868、1.214 和 0.264,且均小于 3,符合线性模型,因此选用 RDA 方法探究植物多样性与水环境因子间的关系. RDA 分析结果如表 3 所示,从中可以看出,在西部、中西部、南部、北部和东部地区的第一排序轴和第二排序轴分别解释了植物与环境间关系的 81.4% 和 18.3%、96.1% 和 3.4%、88.3% 和 10.9%、96.7% 和 3% 及 95.2% 和 4.6%,表明第一排序轴和第二排序轴均包含了绝大部分排序信息,为此,可用前两轴的数据对水环境因子与植物多样性间的关系进行解释.

植物多样性与水环境因子 RDA 分析结果表明 (表 4),水环境因子与坐标轴的相关系数越高则水环境因子对植物多样性的相关性越强,影响越大.如西部第一排序轴反映了浊度的变化,该因子与第一排序轴的相关系数为 0.674 6,从左到右逐渐增加;第二排序轴反映了水温 (0.643 7) 的变化,从上到下逐渐减小.中西部第一排序轴反映了总氮 (-0.945 7) 的变化,从左到右逐渐减小,第二排序轴反映了溶解氧 (0.947 4)、电导率 (0.751 7)、氨氮 (0.671 5)、总磷 (0.776 1) 和浊度 (0.861 2) 的变化,溶解氧、电导率、氨氮、总磷和浊度从上到下均逐渐减小.因此,在本研究中,拉鲁湿地不同区域植物多样性受水环境因素的影响.西部为水温和浊度;中部为电导率、溶解氧、浊度、总氮、总磷和氨氮;南部为 pH、电导率、水温和溶解氧;北部为溶解氧、电导率、pH、水温、氨氮、总氮和总磷;东部为溶解氧、电导率、pH、水温和浊度、总氮、总磷和氨氮.

拉鲁湿地不同区域的植物多样性指数与水环境因子的相关性如图 3 所示,从中可以看出,北部区域溶解氧和 pH 分别与 D 呈正相关,与 H、J 和 R 呈负相关 (蒙特卡洛检验: $P < 0.05$);该区域水温与 H、J 和 R 呈正相关,与呈 D 负相关 ($P < 0.05$).在拉鲁湿地西部,浊度与 R、H 和 J 呈显著正相关,与 J 呈显著负相关 ($P < 0.05$).在中西部,总氮与 D 呈显著正相关,与 R、H 和 J 呈显著负相关 ($P < 0.05$).在东部,总氮和氨氮分别与 D 呈弱正相关,与 R、H 和 J 呈弱负相关.在南部,pH 和溶解氧分别与 J 呈弱正相关,总氮与 D 呈弱正相关.上述结果说明拉鲁湿地溶解氧、pH、水温、总氮和浊度等是影响植物的多样性的的重要因素.

表 2 拉鲁湿地物种多样性指数

Table 2 Species diversity indices in the Lhalu Wetland

样地	群落类型	物种丰富度 (S)	Margalef 物种 丰富度指数(R)	Shannon-Wiener 指数(H)	Simpson 指数(D)	Pielou 均匀度 指数(J)
西部(W)	杉叶藻+水葱群落	11	1.27	1.89	0.18	0.78
中西部(M)	金鱼藻群落	11	1.36	1.90	0.24	0.79
南部(S)	水蓼群落	6	0.66	1.63	0.21	0.91
北部(N)	水蓼群落	8	0.80	1.18	0.44	0.56
东部(E)	水葱群落	7	0.82	1.26	0.34	0.65

表 3 不同区域植物与水环境因子的 RDA 结果

Table 3 Results of redundancy analysis between plants and water environmental factors in different regions

项目	西部		中西部		南部		北部		东部	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.739	0.166	0.961	0.033	0.883	0.109	0.967	0.029	0.952	0.047
物种-环境相关性	0.943	1	1	1	1	1	1	1	1	1
物种累计百分比方差/%	73.9	90.4	96.1	99.5	88.3	99.2	96.7	99.7	95.2	99.8
物种-环境累计百分比方差/%	81.4	99.7	96.1	99.5	88.3	99.2	96.7	99.7	95.2	99.8
总特征值	1		1		1		1		1	
总典范特征值	0.907		1		1		1		1	

表 4 RDA 前两轴与水环境因子之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between the first two axes of RDA and the water environment factor

项目	西部		中西部		南部		北部		东部	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
DO	0.168	0.344 0	-0.235 4	0.947 4	-0.077 8	0.789 7	0.975 4	0.154 6	-0.687 1	-0.682 4
COND	0.452 5	0.182 5	-0.624 9	0.751 7	-0.538 0	0.451 0	-0.713 4	-0.301 1	0.664 7	-0.745 6
pH	0.315 9	0.296 1	-0.300 9	0.173 6	0.315 5	0.655 0	0.977 1	-0.056 9	-0.345 0	0.710 0
WT	0.089 7	0.643 7	-0.287 0	0.232 0	-0.113 3	0.578 1	-0.909 1	0.034 5	0.427 0	-0.828 7
NTU	0.674 6	0.091 8	-0.264 6	0.861 2	-0.184 0	0.295 7	-0.337 6	-0.396 2	-0.426 0	-0.817 2
NH ₄ ⁺ -N	-0.038 1	0.101 5	-0.536 5	0.671 5	-0.115 1	0.037 5	0.232 3	-0.937 0	-0.8588	-0.502 6
TN	0.151 4	-0.183 7	-0.945 7	-0.115 1	0.393 6	-0.000 5	-0.401 8	-0.911 7	-0.844 1	-0.014 6
TP	-0.249 3	0.132 9	-0.597 9	0.776 1	0.035 8	-0.094 9	-0.608 3	-0.698 0	-0.317 7	-0.842 1

3 讨论

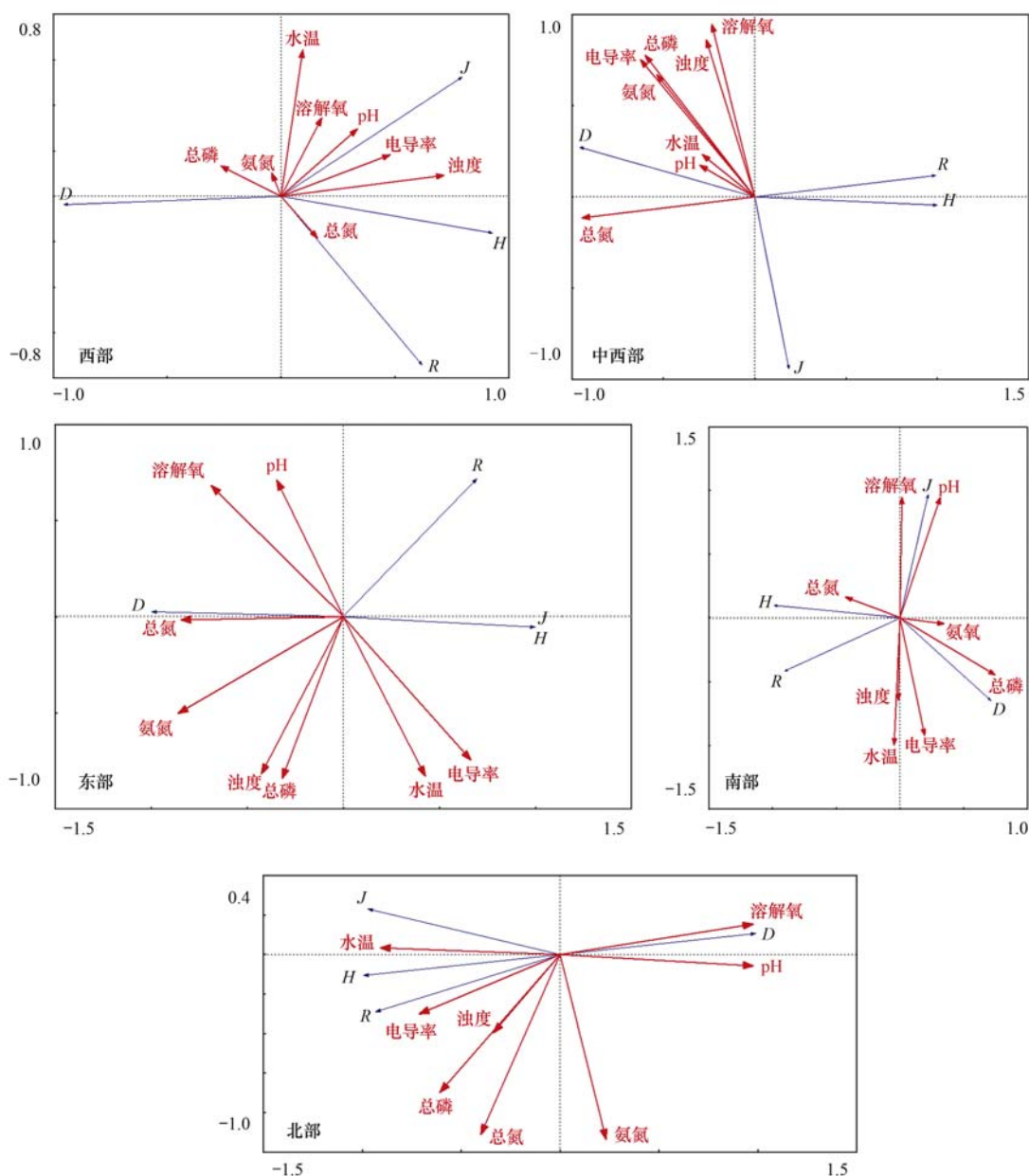
3.1 拉鲁湿地不同区域植物群落组成变化

丰富度指数反映物种的数目. Margalef 物种丰富度指数的数值越大,反映出该群落或生境的物种丰富度越高,物种数目越多^[14, 15]. 在拉鲁湿地中,不同区域的 Margalef 物种丰富度指数依次: M > W > E > N > S,说明拉鲁湿地中西部区域物种丰富度高,而南部区域物种丰富度较低. Shannon-Wiener 多样性指数是用来描述物种个体出现的紊乱和不确定性的,指数的值越大,不确定性越大,物种分配越平均^[15]. 拉鲁湿地不同区域的 Shannon-Wiener 指数依次排序为 M ≈ W > S > E > N,说明中西部和西部区域的植物群落不确定性高,物种个体分配的均匀程度高,物种多样性高. Simpson 指数又称优势度指数,反映物种种类出现的概率程度^[16]. 拉鲁湿地不同区域的 Simpson 指数依次排序为 N > E > M > S > W,说明拉鲁湿地北部区域的植物群落内物种分布的均匀

程度最高,而西部区域植物群落内优势种明显,优势种的分布集中,以水葱、杉叶藻为优势种. Pielou 指数是物种均匀度的指标,一般用来表征群落中物种空间分布的均匀程度,指数的计算值越大,说明植物分布越均匀^[17]. 拉鲁湿地不同区域的 Pielou 指数依次排序为 S > M > W > E > N,说明拉鲁湿地南部区域植物群落中的各物种在空间分布的均匀程度最高,北部区域最低. 彭映辉等^[18]的研究认为,水生植物群落多样性的丰富程度与所受干扰强度呈负相关,而群落多样性的丧失程度与所受干扰强度呈正相关. 这说明拉鲁湿地北部、东部和南部区域所受的干扰强度高于西部区域.

3.2 拉鲁湿地植物群落多样性与水环境因子间的关系

水分影响了拉鲁湿地植物群落. 拉鲁湿地从东北向西南倾斜,从东至西地面坡度为 3‰~5‰,因此,拉鲁湿地西部地势较低,水位较高,能形成沉水植物(金鱼藻、狐尾藻)-漂浮植物(萍蓬草)和挺水



红色箭头代表水环境因子,蓝色箭头代表植物的多样性

图3 RDA 分析排序

Fig. 3 Ordination diagram of RDA

植物(水葱、菖蒲)群落。拉鲁湿地中西部是东部湿地和西部湿地之间的涵洞区域,水经涵洞从东部湿地进入西部湿地,涵洞出水口常年积水,水位较深,容易形成沉水植物(金鱼藻、狐尾藻、菹草)-漂浮植物(萍蓬草)和挺水植物(菖蒲)群落。拉鲁湿地北部和东部地势较高,受流沙河季节性进水的影响,属于间歇性水域,形成漂浮植物(眼子菜)-挺水植物(灯芯草)群落。在拉鲁湿地南部,紧靠拉萨市中干渠,以挺水植物(水蓼、菖蒲)群落为主。因此,拉鲁湿地北部和东部区域的植物多样性低于西部和中西部区域,可能与其水分含量较低有关,这与田应兵等的研究结果相似,即湿地水分的减少,植物群落类型发生演替,水生植物群落逐渐减少^[19]。

水质影响水生植物群落的变化。吴翠等^[20]认为湖水氮磷含量过高,水体富营养化,浮游藻类大量繁殖,造成水生植被覆盖率和生物量都大幅下降,植物群落结构简单化。郝孟曦等^[21]报道水体中 TN 和 TP 浓度越高,水生植物种类和分布越少。从图 1 可以看出,在本次调查中,拉鲁湿地东部、北部和南部区域未发现沉水植物,且植物多样性较低,可能与该区域氮、磷浓度和 pH 比较高有关。于丹^[22]的研究发现水体透明度严重影响沉水植物分布。从图 2 和表 1 可以看出,拉鲁湿地中西部和西部沉水植物(金鱼藻、狐尾藻)的生长良好,可能与该区域水体浊度低,透明度高有关。金鱼藻、菹草和狐尾藻为耐污的为优势种^[5, 23],大茨藻和小茨藻一般生长在比较洁

净的水环境中^[23],水芹和茭白为不耐污植物种^[20],杉叶藻具有良好的耐水淹耐旱能力^[17].在本次调查中,未发现茭白,而金鱼藻和杉叶藻等优势种,说明拉鲁湿地植物群落中,部分耐污种取代非耐污种;植物群落中优势种由耐污种为主,这在一定程度上说明了水环境的变化,将引发植被衰退.

4 结论

(1)拉鲁湿地不同区域植物群落变化大,靠近出水口的西部与中西部区域植物丰富度大且分布不均匀,以杉叶藻和金鱼藻为优势种的群落;位于入水口的南部与北部区域植物丰富度较低,南和北部区域以水蓼为优势种,且植物群落分布不均匀;东部区域为以水葱为优势种,植物丰富度较小的群落.

(2)拉鲁湿地各区域之间溶解氧、电导率、pH、水温和浊度的差异性较大,由西部到东部区域随着海拔高度的升高,水环境因子的大致变化为溶解氧含量逐渐增大,电导率逐渐减小,pH 逐渐增大,水温逐渐降低,浊度逐渐增大.

(3)溶解氧、pH、水温、总氮和浊度等影响了拉鲁湿地的植物群落,较高的氮、磷浓度和 pH 引起植物多样性减少,呈现耐污性物种逐渐成为拉鲁湿地优势种的趋势.

致谢:现场调查中得到了拉鲁湿地国家自然保护区管理局梁剑豫和尼琼的支持,在此一并致谢.

参考文献:

- [1] Wu J, Lu J, Luo Y M, *et al.* An overview on the organic pollution around the Qinghai-Tibet plateau: the thought-provoking situation[J]. *Environment International*, 2016, **97**: 264-272.
- [2] Yuan G L, Sun Y, Li J, *et al.* Polychlorinated biphenyls in surface soils of the central Tibetan Plateau: altitudinal and chiral signatures[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **196**: 134-140.
- [3] Wang Y G, Deng C Y, Liu Y, *et al.* Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 177-185.
- [4] Siles G, Voirin Y, Béné G B. Open-source based geo-platform to support management of wetlands and biodiversity in Quebec [J]. *Ecological Informatics*, 2018, **43**: 84-95.
- [5] 拉多, Birks J, 普布, 等. 拉萨市拉鲁湿地植物群落与环境因素之间的关系及其分布格局[J]. *西藏大学学报(自然科学版)*, 2009, **24**(1): 15-20.
Laduo, Birks J, Pubu, *et al.* The relationship between composition and distribution of vegetation and environmental factors in Lhalu Dhamra, Lhasa[J]. *Journal of Tibet University*, 2009, **24**(1): 15-20.
- [6] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 等. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, **39**(11): 4116-4126.
Zhao M, Zhao R F, Zhang L H, *et al.* Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(11): 4116-4126.
- [7] 王东波, 君珊, 陈丽, 等. 冰封期呼伦湖浮游藻类群落结构及其与水环境因子的关系[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(4): 59-66.
Wang D B, Jun S, Chen L, *et al.* Community structures of phytoplankton in the Hulun Lake during icebound season and its relation with environmental factors[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 59-66.
- [8] 刘晓玲, 王光美, 于君宝, 等. 氮磷供应条件对黄河三角洲滨海湿地植物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 801-809.
Liu X L, Wang G M, Yu J B, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus supply on plant community structure of coastal wetland in the Yellow river Delta [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 801-809.
- [9] 李春. 拉鲁湿地生态环境及动植物物种资源变化特征研究[J]. *自然资源学报*, 2005, **20**(1): 145-151.
Li C. Research on the variation characteristics of eco-environment and propagation resources in Lahu Wetland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, **20**(1): 145-151.
- [10] 王丽, 杨涛, 杜红霞, 等. 不同水位梯度下拉鲁湿地典型湿草甸植物群落特征[J]. *植物资源与环境学报*, 2018, **27**(1): 11-16.
Wang L, Yang T, Du H X, *et al.* Plant community characteristics of typical wet meadow in Lahu wetland under different water level gradients[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2018, **27**(1): 11-16.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.
- [12] 段遍红, 滕玉凤, 占玉芳, 等. 黑河桥湿地植物群落组成与多样性研究[J]. *林业科技通讯*, 2016, (12): 27-30.
Duan B H, Teng Y F, Zhan Y F, *et al.* Research on the plant community composition and diversity of Heihe Bridge wetland [J]. *Forest Science and Technology*, 2016, (12): 27-30.
- [13] 侯志勇, 谢永宏, 高大立, 等. 洞庭湖湿地典型植物群落生活型构成及其环境影响因子[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(6): 993-999.
Hou Z Y, Xie Y H, Gao D L, *et al.* The life form and environment factors of typical plant communities in the Dongting Lake wetlands[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2016, **22**(6): 993-999.
- [14] 吕晓燕, 于鲁冀, 王莉, 等. 淮河流域河南段水生植物多样性评价及其影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(6): 83-90.
Lyu X Y, Yu L J, Wang L, *et al.* The evaluation of the hydrophytes diversity and its influencing factors of the Huaihe River Basin Henan section [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(6): 83-90.
- [15] 李振基, 陈圣宾. 群落生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2011. 27-32.
Li Z J, Chen S B. Community ecology [M]. Beijing: Meteorological Press, 2011. 27-32.
- [16] 蔡在峰, 曲文馨, 洪宇薇, 等. 天津市北大港湿地自然保护区植物多样性特征分析[J]. *西北农业学报*, 2019, **28**(8): 1326-1334.
Cai Z F, Qu W X, Hong Y W, *et al.* Analysis of plant diversity characteristics in Beidagang Wetland Nature Reserve of Tianjin [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, **28**(8): 1326-1334.
- [17] 何彤慧, 程志, 张玉峰, 等. 银川平原沟渠植物多样性特征及影响因素[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(3): 352-358.

- He T H, Cheng Z, Zhang Y F, *et al.* Characteristics of plant diversity of canals and ditches and their influencing factors in Yinchuan Plain [J]. *Wetland Science*, 2013, **11** (3): 352-358.
- [18] 彭映辉, 简永兴, 王建波, 等. 湖北省五大湖泊水生植物多样性的比较研究[J]. *水生生物学报*, 2004, **28** (5): 464-470.
- Peng Y H, Jian Y X, Wang J B, *et al.* A comparative study on aquatic plant diversity in five largest lakes of Hubei province in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, **28** (5): 464-470.
- [19] 田应兵, 熊明标, 宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J]. *生态学杂志*, 2005, **24** (1): 21-25.
- Tian Y B, Xiong M B, Song G Y. Restoration succession of wetland soils and their changes of water and nutrient in Ruorgai Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24** (1): 21-25.
- [20] 吴翠, 唐万鹏, 史玉虎, 等. 长湖湿地水生植被演替研究[J]. *湿地科学*, 2007, **5** (2): 188-191.
- Wu C, Tang W P, Shi Y H, *et al.* The succession of aquatic vegetation on the Changhu Lake Wetland, Hubei Province [J]. *Wetland Science*, 2007, **5** (2): 188-191.
- [21] 郝孟曦, 杨磊, 孔祥虹, 等. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替[J]. *湖泊科学*, 2015, **27** (1): 94-102.
- Hao M X, Yang L, Kong X H, *et al.* Diversity and community succession of macrophytes in Lake Changhu, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27** (1): 94-102.
- [22] 于丹. 水生植物群落动态与演替的研究[J]. *植物生态学报*, 1994, **18** (4): 372-378.
- Yu D. Study on the dynamics and succession of aquatic macrophyte communities in the Zhushun Lake, Harbin [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, **18** (4): 372-378.
- [23] 祝国荣, 倪乐意, 方涛, 等. 巢湖东湖区入湖河流的水生植被群落结构和区系特征及其与环境因子的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18** (6): 889-896.
- Zhu G R, Ni L Y, Fang T, *et al.* Community structure and floristic compositions of aquatic plant communities in the inflowing rivers of East Chaohu Lake and their relationships to environmental factors [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2012, **18** (6): 889-896.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)