

DOI: 10.5846/stxb201810242298

田玉清, 石道良, 张淑倩, 龚旭昇, 汪正祥, 李中强. 河西走廊水生植物多样性格局、群落特征及影响因素. 生态学报, 2020, 40(1): 202-212.

Tian Y Q, Shi D L, Zhang S Q, Gong X S, Wang Z X, Li Z Q. Biogeographic pattern, main community types, and the influencing factors of aquatic macrophytes in the Hexi Corridor of Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 202-212.

河西走廊水生植物多样性格局、群落特征及影响因素

田玉清¹, 石道良², 张淑倩¹, 龚旭昇¹, 汪正祥¹, 李中强^{1,*}

1 湖北大学资源环境学院; 区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 武汉 430062

2 湖北省野生动植物保护总站, 武汉 430079

摘要: 水生植物是湿地生态系统重要组成部分, 研究水生植物多样性分布格局及其影响因素对地区水生植物资源保护具有重要意义。通过野外调查并结合气候等环境因素, 研究了河西走廊主要水生植物群落类型、数量特征、水生植物多样性分布格局及影响因素, 并对中域效应假说进行了验证。研究表明: (1) 河西走廊地区共有水生植物 29 科 42 属 84 种, 群落的聚类分析可将河西走廊水生植物群落划分为 15 个主要群落类型; (2) 河西走廊水生植物群落类型主要受到水温、海拔、经纬度等环境因子影响, 群落物种多样性指数与盐度以及溶解性固体总量呈显著性相关; (3) 河西走廊水生植物多样性空间格局呈现出“ \cap ”型的单峰格局, 中域效应模型能较好地解释该地区水生植物多样性水平的纬度格局及海拔垂直分布格局, 对该区域水生植物物种丰富度在纬度和海拔梯度上的变异解释率分别为 57.56%、63.5%。分析表明, 河西走廊水生植物物种丰富度格局由几何(边界)限制和随机过程及其他未知因素共同控制, 且几何(边界)限制和随机过程贡献率较大; 同时本研究中未考虑的环境异质性、气候、人为干扰等因素也对河西走廊水生植物多样性空间分布产生重要影响。

关键词: 多样性格局; 中域效应假说; 群落类型; 水生植物; 河西走廊

Biogeographic pattern, main community types, and the influencing factors of aquatic macrophytes in the Hexi Corridor of Northwest China

TIAN Yuqing¹, SHI Daoliang², ZHANG Shuqian¹, GONG Xusheng¹, WANG Zhengxiang¹, LI Zhongqiang^{1,*}

1 Faculty of Resources and Environment, Hubei University; Hubei Province Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Wuhan 430062, China

2 Wildlife Conservation Chief Station of Hubei Province, Wuhan 430079, China

Abstract: Aquatic plants are an important part of wetland ecosystems. Studies about the distribution pattern of aquatic plants and its influencing factors can provide important background for the regional protection of aquatic plant resources. In this study, the main aquatic plant community types, quantitative characteristics, species richness patterns, and influencing factors of aquatic plants in the Hexi Corridor were studied using field investigation data. The mid-domain effect hypothesis was used to explain geographical diversity patterns of aquatic macrophytes in the region. The main results are as follows: (1) there were 84 species belonging to 42 genera of 29 families of aquatic plants in the Hexi Corridor. Cluster analysis of the community showed that there were 15 main aquatic plant community types in this region; (2) the aquatic plant community types in the Hexi Corridor were mainly affected by environmental factors such as water temperature, elevation, latitude, and longitude. The community species diversity index was significantly correlated with salinity and total dissolved solids; (3) the spatial pattern of aquatic plant diversity in the Hexi Corridor exhibited a unimodal pattern. The mid-domain effect model better explained the latitudinal pattern and the vertical distribution pattern of aquatic plant diversity in the

基金项目: 湖北省教育厅项目(T201701); 科学技术部资助项目(2013FY112300); 国家自然科学基金面上项目(31570366)

收稿日期: 2018-10-24; 网络出版日期: 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhq@hubu.edu.cn

region, with explanation rates reaching 57.56% and 63.5%, respectively. These results indicate that the patterns of aquatic macrophyte species richness in the Hexi Corridor were determined by geometric (boundary) constraints, random processes, and other unknown processes. Geometric (boundary) constraints and random process showed a higher contribution rate on geographic richness gradients. Also, we highlight that unmeasured factors including environmental heterogeneity, climate, and human disturbance may greatly affect aquatic plant species richness in the Hexi Corridor of Northwest China.

Key Words: species richness pattern; mid-domain effect hypothesis; main community types; aquatic macrophytes; Hexi Corridor

水生植物是湿地生态系统重要组成成分,在维持生物多样性、湿地生态系统结构和功能方面具有十分重要作用^[1]。近年来,国外对水生植物多样性的研究多集中于多样性保护^[2]、全球气候变化响应^[3]以及外来种入侵影响^[4]等方面。我国对水生植物的研究多集中在水生植物的生理生态^[1]、湖泊水生植物多样性、变化及影响因素^[5]、水生植物群落生态学等方面^[1,6]。这些研究大多集中在较小尺度,如是一个湖泊等,对于较大尺度水生植物多样性分布格局及影响因素的研究较少。已有研究表明尺度对植物多样性格局影响显著,不同尺度下植物多样性格局及主要影响因子不同,小尺度上的水生植物多样性影响因子可能是生境中环境因子如水体盐度、pH 等^[7],较大尺度多样性格局主要影响因子可能是气候因素^[8-9]。因此应加强较大尺度上水生植物多样性的格局及影响因素研究。

物种多样性的空间格局及其形成机制是生物地理学和生态学领域的核心议题之一,其研究可为全球及区域物种多样性的保护提供重要参考,对生物多样性保育和可持续利用具有重要意义^[10]。最近几十年,生物地理学家提出了上百种关于物种多样性格局形成机制的假说,且新假说仍不断出现^[11]。20 世纪 90 年代后,随机性因素被应用于解释生物多样性格局,其中中域效应假说是最受关注假说之一^[12]。该假说认为在一个具有边界限制的区域,物种的分布范围和分布中心是随机的,由于边界对物种分布的限制,不同物种分布在边界附近的重叠程度较小,在中心区域较大,从而造成了物种多样性在中间高于边缘的单峰格局^[12-14]。相对于陆生生态系统而言,水生生态系统具有明确和稳定的边界,更加适合关于物种多样性分布格局中域效应假说的验证。但目前关于该假说的物种多样性分布格局的验证都集中在陆生植物,对水生植物分布格局的中域效应假说验证未见报道。

河西走廊位于甘肃省西部,属于典型的内陆干旱区,为温带荒漠气候,其植物种类贫乏,种类趋向于集中在少数大科及中小型科中,区系的优势现象明显^[7]。目前对河西走廊水生植物多样性研究相对较少,仅见有关水生植物种类^[15];多样性、威胁和保护^[7]等方面的研究,未见对多样性分布格局及影响因素等方面的报道。近年来河西走廊地区自然湿地资源因为受气候变暖,蒸发量增加等自然因素和人为因素的影响,呈现不断减少且减少速度不断加大的趋势。湿地生境的消失严重影响水生植物多样性及群落结构,因此研究河西走廊地区水生植物多样性分布格局及其影响因素,对于该地区的水生植物资源保护具有重要参考价值。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

河西走廊地区(93°20'—104°00'E, 37°10'—42°50'N)位于甘肃省黄河以西地区,属于东疆荒漠、青藏高原、黄土高原和蒙古高原的过渡地带,行政区划上包括甘肃省张掖、武威、酒泉 3 个地区和金昌、嘉峪关 2 个地级市,总面积 2.755×10⁵km²。该区域地势南高北低,大地构造轮廓由南部祁连山地,中部走廊平原和北部戈壁、沙漠地区 3 部分组成。其内部以黑山、宽台山和大黄山为界,分隔成石羊河、黑河和疏勒河 3 大内流水系。该地区湿地资源丰富、类型多样,面积 170 余万 hm²,其中,自然湿地面积为 165 万 hm²,占湿地总面积的 97.11%,包含河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地 4 大类中的 16 个湿地类型。

1.2 采样及群落命名方法

本研究于 2016 年 7 月至 9 月在河西走廊进行水生植物调查,本次调查水生植物是指所有蕨类植物亚门(蕨及其近缘类群)和种子植物亚门中那些光合作用部分永久地或至少一年中数月沉没于水中或浮在水面的植物^[16]。

调查采用沿线调查和重点调查结合方式,在整个区域共选取 89 个样点,具体信息见附录 1。样点分布范围为 94°58′—102°54′E,37°32′—40°31′N,海拔高度范围位于 1067—2855m 之间。调查水体包括河流、湖泊、水库、池塘、沟渠等。

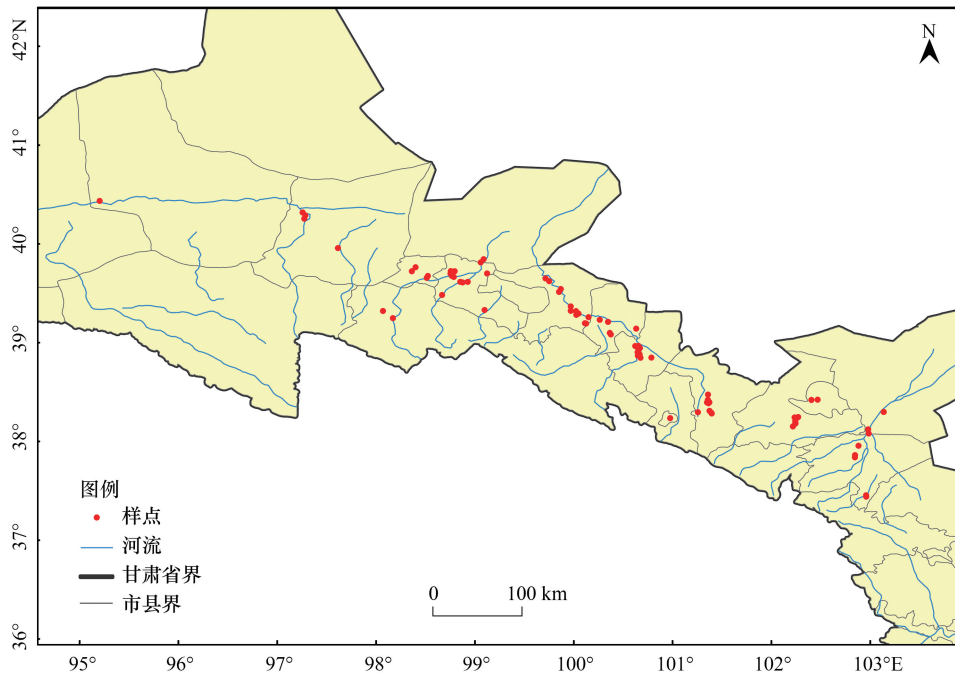


图 1 水生植物采样点

Fig.1 Map showing the surveyed sites for aquatic macrophytes, and the location of the studied area in China

水生植物群落调查参照“植物群落清查的主要内容、方法和技术规范”^[17],调查内容包括水生植物种类、分布面积、生物量、多度、盖度、株高等。其中分布面积为目测法获得;生物量采集为 1m² 面积内所有植物鲜重,根据分布面积进行估算;多度采用目测估计法;盖度采用投影盖度进行目测估算获得;植物株高为随机选取 10 株植物的平均高度。同时利用 GPS 确定海拔和经纬度,水质检测仪 YSI 测定水体理化因子如 pH、温度、盐度、TDS(溶解性固体总量)和电导率等;水位定位仪测定水深。

群落的命名采用优势度原则,用各群丛优势种名称来命名该群丛^[18]。相同层次的优势种之间用“+”连接,不同层次的优势种之间用“-”连接。优势种的确定采用重要值方法,其中:

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对多度}) / 3$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某一种植物的盖度} / \text{全部植物的盖度之和}) \times 100\%$$

$$\text{相对频度} = (\text{某一种植物的频度} / \text{全部植物的频度之和}) \times 100\%$$

$$\text{相对多度} = (\text{某一种植物的个体数} / \text{全部种的个体数}) \times 100\%$$

运用 SPSS 19.0 对水生植物群落进行聚类分析,建立水生植物群落样方与物种重要值矩阵,进行水生植物群落的数量分类,得出主要水生植物群落。

α -多样性指数是用于测量群落内生物种类数量以及生物种类间相对多度的一种测量,本文选取 4 种测度指标^[18]来分析群落物种多样性特征,分别是:物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数。计算方法分别为:

物种丰富度指数(S)=样方内物种数

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H): H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

$$\text{Simpson 指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

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

式中, S 为样方内的物种数量, P_i 为第*i*个种的个体数占样地中所有种的总个体数的比例。

1.3 数据分析

运用 Canoco 4.5 软件进行除趋势典范对应分析研究河西走廊主要水生植物群落中环境因子和群落类型之间的关系。利用 SPSS 19.0 相关性分析研究环境因子对水生植物群落多样性指数的影响。

水生植物多样性分布格局的解释采用中域效应假说模型进行分析,通过中域效应分析软件 RangeModel^[19]经 1000 次 Monte Carlo 随机预测,得到 95% 置信区间内的多样性平均值作为预测值,对预测值及调查值经对数转换,利用 SPSS 19.0 进行线性回归分析,得出几何(边界)限制和随机过程对水生植物多样性分布的影响。

2 结果分析

2.1 河西走廊物种多样性及群落特征

调查发现河西走廊地区现有水生植物 29 科 42 属 84 种。其中蕨类植物 1 科 1 属 1 种,被子植物 28 科 41 属 83 种。根据中国植被分类法^[20],聚类分析法结合群落排表分析和数量分类法表明河西走廊地区 112 个样方可划分为 15 类,依据中国植被分类法可将植物群落分为 15 个群丛(表 1),分别为:穿叶眼子菜群丛(*Potamogeton perfoliatus* Association)、丝叶眼子菜群丛(*P. filiformis* Association)、水马齿-毛茛群丛(*Callitriche stagnalis* -*Ranunculus japonicus* Association)、球穗莎草群丛(*Cyperus globosus* Association)、芦苇+香蒲群丛(*Phragmites australis* +*Typha angustifolia* Association)、眼子菜群丛(*P. distinctus* Association)、针蔺+水麦冬群丛(*Heleocharis valliculosa* +*Triglochin palustre* Association)、角果藻群丛(*Zannichellia palustris* Association)、蓖齿眼子菜-穿叶眼子菜+轮叶狐尾藻群丛(*Stuckenia pectinata* - *P. perfoliatus* + *Myriophyllum verticillatum* Association)、香蒲群丛(*T. angustifolia* Association)、莎草+蓼群丛(*Cyperus glomeratus* + *Polygonum hydropiper* Association)、芦苇+蓼群丛(*Phragmites australis* + *P. hydropiper* Association)、水麦冬群丛(*T. palustre* Association)、轮叶狐尾藻群丛(*M. verticillatum* Association)、水毛花+针蔺群丛(*Scirpus triangulatus* + *H. valliculosa* Association)。

多样性指数分析结果显示各水生植物群落间物种丰富度指数差异较大,其中芦苇+香蒲群落物种丰富度最高,达到 13 种,穿叶眼子菜群落、眼子菜群落物种数最少,仅有 3 个物种。水生植物群落 Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数变化趋势一致,这两个多样性指数均在芦苇+香蒲群落中最高,在穿叶眼子菜群落、角果藻群落、香蒲群落和轮叶狐尾藻群落中均较低。对 Pielou 均匀度指数而言,该指数值在芦苇+香蒲群落中最高,其次为蓖齿眼子菜-穿叶眼子菜+狐尾藻群落和水麦冬群落,在穿叶眼子菜群落该指数值最低(表 2)。

群落样地排序分析结果显示第一轴与第二轴群落类型—环境关系方差的累积解释量达到 96.6%(图 2)。从排序图中可以看出,第一轴总体反映了环境因子中水温(T)、pH 值和海拔(Alt)沿第一排序轴变化规律,结果显示水温和 pH 与该轴呈正相关,而海拔与该轴呈负相关;从群落类型在第一排序轴的分布来看,芦苇+香蒲群落与水毛花+针蔺群落与其生境中 pH 值、水温相关性较高,眼子菜群落则与海拔相关性较高。第二排序轴总体上反应出水生植物群落沿经度、纬度、水温和水深的变化趋势。经度与第二排序轴呈显著性正相关;而水温、纬度与第二排序轴均呈负相关。

群落类型与环境因子的排序结果显示环境因子对群落类型影响较大,特别是与水温、海拔和经纬度关系密切。

表 1 河西走廊主要水生植物群落类型

Table 1 Main aquatic plant community types in the Hexi Corridor

编号 Number	群落类型 Community type
1	穿叶眼子菜群落 (Ass. <i>P. perfoliatus</i>)
2	丝叶眼子菜群落 (Ass. <i>P. filiformis</i>)
3	水马齿-毛茛群落 (Ass. <i>C. Palustris-R. japonicus</i>)
4	球穗莎草群落 (Ass. <i>C. globosus</i>)
5	芦苇+香蒲群落 (Ass. <i>P. australis+T. angustifolia</i>)
6	眼子菜群落 (Ass. <i>P. distinctus</i>)
7	针蔺+水麦冬群落 (Ass. <i>H. valliculosa+T. palustris</i>)
8	角果藻群落 (Ass. <i>Z. palustris</i>)
9	蓖齿眼子菜-穿叶眼子菜+狐尾藻群落 (Ass. <i>S. Pectinata-P. perfoliatu+M. verticillatum</i>)
10	香蒲群落 (Ass. <i>T. angustifolia</i>)
11	莎草+蓼群落 (Ass. <i>C. glomeratus+P. hydropiper</i>)
12	芦苇+蓼群落 (Ass. <i>P. australis+P. hydropiper</i>)
13	水麦冬群落 (Ass. <i>T. palustris</i>)
14	轮叶狐尾藻群落 (Ass. <i>M. verticillatum</i>)
15	水毛花+针蔺群落 (Ass. <i>S. triangulatus+H. valliculosa</i>)

表 2 河西走廊主要水生植物群落 α -多样性指数Table 2 α -diversity index of main aquatic plant communities in the Hexi Corridor

编号 Number	物种丰富度 Species richness	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
1	3	0.31	0.58	0.13
2	4	0.67	0.87	0.24
3	6	0.62	1.24	0.25
4	6	0.65	1.36	0.35
5	13	0.84	2.20	0.51
6	3	0.51	0.88	0.27
7	5	0.46	0.92	0.18
8	4	0.35	0.72	0.20
9	5	0.75	1.46	0.42
10	4	0.36	0.73	0.23
11	8	0.72	1.56	0.37
12	7	0.79	1.73	0.47
13	7	0.63	1.34	0.28
14	4	0.30	0.63	0.15
15	5	0.38	0.79	0.15

群落多样性指数与环境因子间相关性分析显示仅群落物种丰富度与盐度、溶解性固体总量间呈显著性正相关 ($P < 0.05$), 其他多样性指数与环境因子相关性不显著 (表 3)。

2.2 河西走廊水生植物多样性分布格局及其解释

河西走廊地区水生植物多样性分布格局在水平方向上呈现单峰型分布。该区域水生植物多样性的经向变化呈现出先上升后下降规律, 在 100°E 、 100.5°E 附近达到最高值, 低值出现在 94.5°E 至 96.5°E 之间 (图 3b); 在 95% 置信度的条件下, 线性回归分析显示调查值与预测值之间相关性不显著 ($P > 0.05$), 中域效应对该多样性格局解释力较低, 仅为 16.31%。在纬向变化规律上, 河西走廊水生植物多样性呈现出较好的单峰形态, 物种多样性自南向北先上升, 后下降, 在 38°N 至 39.5°N 之间达到最高 (图 3c); 95% 置信度情况下的线性回归分析结果显示调查值与预测值之间相关性显著 ($P < 0.05$), 中域效应对该区域水生植物纬度分布格局的解释力较高, 其值可达 57.56%。

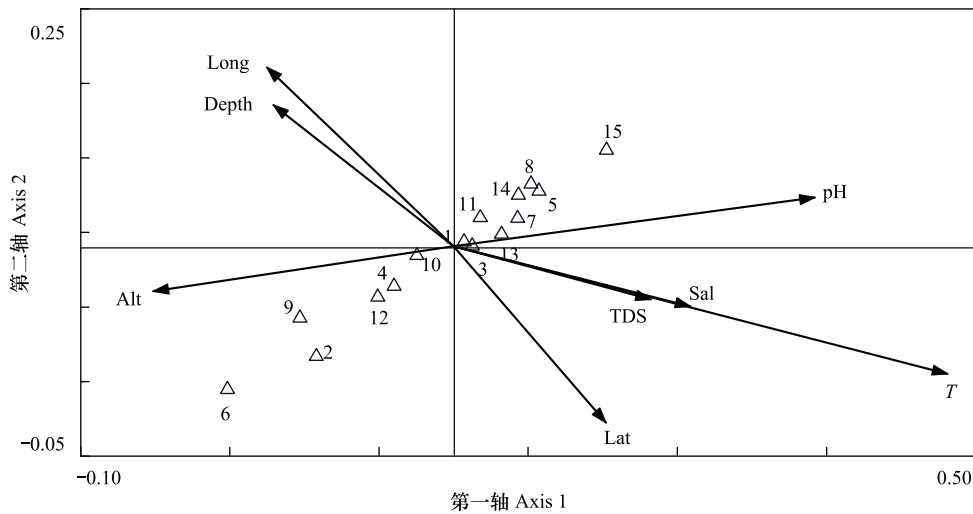


图 2 主要水生植物群落与环境因子 DCCA 二维排序图(图中数字为群落编号)

Fig.2 Two-dimensional sequence diagram of main aquatic plant community and environmental factor DCCA (numbered as community number in the figure)

Long: 经度, longitude; Lat: 纬度, latitude; Alt: 海拔, altitude; pH: 酸碱度; Sal: 盐度, salinity; T: 温度, temperature; TDS: 溶解性固体总量, Total dissolved solids; Depth: 水深

表 3 河西走廊主要水生植物群落多样性指数与环境因子 Spearman 相关性分析

Table 3 Spearman correlation analysis between diversity index and environmental factors in the Hexi Corridor

	物种丰富度指数 Species richness index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
Long	-0.116	-0.043	-0.107	0.086
Lat	0.247	0.157	0.204	0.007
Alt	-0.398	-0.214	-0.036	0.02
pH	0.217	0.197	0.088	0.138
Sal	0.588 *	0.408	0.273	0.177
T	0.301	0.089	0.154	-0.114
TDS	0.595 *	0.414	0.207	0.196
Depth	0.053	0.068	0.059	0.17

* * $P < 0.01$, * $P < 0.05$; Long: 经度, longitude; Lat: 纬度, latitude; Alt: 海拔, altitude; pH: 酸碱度; Sal: 盐度, salinity; T: 温度, temperature; TDS: 溶解性固体总量, Total dissolved solids; Depth: 水深

河西走廊地区水生植物多样性分布格局在垂直方向上也呈现出较好的单驼峰型,随着海拔上升,水生植物物种多样性先上升后下降,最高值出现在海拔 1400m 到 1600m 之间(图 3a);在置信度为 95%的情况下,线性回归分析结果表明调查值与预测值之间相关性极显著($P < 0.001$),中域效应对河西走廊地区水生植物丰富度在海拔梯度上的变化的解释力达 63.5%,解释力较强。

3 讨论

3.1 河西走廊地区水生植物群落特征及其与环境因子关系

早期研究表明河西走廊地区有水生植物 16 科 26 属 38 种^[15],本次调查发现了 29 科 42 属 84 种,较之前调查有较大程度增加。其原因可能是对水生植物的界定和本次调查范围不同所致。本次调查结果显示河西走廊地区水生植物物种多样性较高,这可能与该区域水环境异质性强有关。河西走廊区域内因其水体类型齐全,水环境异质性强,起伏的地势、多变的降水格局造成的多样的生境足够支撑较高的物种多样性^[9]。

水生植物在湿地生态系统中处于关键的生态位,其生理生态特征与所处水体的水文状况密切相关,各类

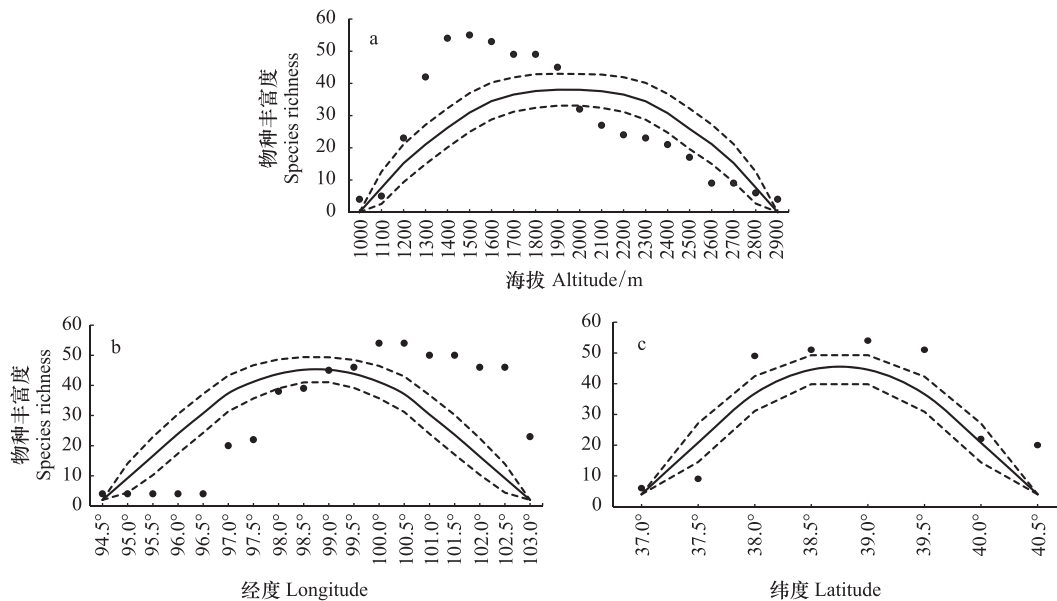


图3 河西走廊水生植物多样性的垂直、水平分布格局

Fig.3 The Vertical and horizontal distribution pattern of aquatic plant diversity of the Hexi Corridor

实心点表示实际物种丰富度,实线为中域效应模型预测的物种多样性,虚线为95%的置信区间

型的地表水文条件对水生植物影响差异较大^[7]。本研究表明水体盐度与溶解性固体总量显著影响群落物种丰富度指数。这可能是该区域水生植物对当地水体环境长期适应的结果,河西走廊地处西北干旱区,水体类型多样,包括淡水、半咸水、咸水等各种类型^[21],水生植物长期生活在这样的水体类型中,形成了不同的耐盐生理调节机制^[22]。

环境因子显著影响群落类型发生,不同的生境类型发育不同的群落类型^[23]。本研究发现河西走廊水生植物群落主要受水温和海拔等因素影响,如高海拔地区分布较多眼子菜群落;芦苇+香蒲群落和水毛茛+针蔺群落适宜生长于pH较高的水体环境。这表明不同水生植物对不同环境因子具有不同的生理调节机制^[22],也表明该区域主要水生植物群落是对该区域水体环境长期适应结果。

3.2 河西走廊水生植物多样性空间格局及影响机制

物种空间梯度变化是物种多样性在大尺度格局上的一个显著特征,是自然界最普遍存在的生态学规律,几乎存在于所有重要的生物类群中。大多数关于植物物种多样性大尺度格局的研究认为植物物种多样性从高纬度到低纬度、高海拔到低海拔均呈现出逐渐增加的趋势^[24]。但很多研究表明实际上物种多样性的经纬度格局在不同区域及尺度并不一致^[25]。已有关于西北干旱区植物多样性空间格局研究发现黑戈壁地区植物物种多样性与纬度不存在显著的相关性^[26];而新疆旱地的物种丰富度与纬度呈显著负相关^[27]。王健铭等^[25]对中国西北荒漠区植物物种丰富度多样性空间格局研究也发现尽管西北荒漠区植物物种丰富度存在显著的空间异质性,但是与经度、纬度均没有明显的线性关系,而是随着经度或纬度的增加呈现出先下降后上升的二次曲线关系。这些研究均表明中国西北荒漠区不同区域的植物丰富度地理格局并不一致,且整个西北荒漠区不存在明显的线性变化规律。本研究表明河西走廊水生植物多样性在河西走廊区域也不存在明显的线性变化规律,其沿纬度和海拔梯度多样性分布呈现出较为典型单峰格局,该区域水生植物物种多样性呈现随纬度升高而降低的规律,在中部区域多样性最高。这与前人关于水生植物多样性格局的研究结果一致;早期研究表明水生植物多样性格局在区域尺度上并未呈现物种多样性随纬度升高而降低的规律,而在中部区域多样性最高^[28]。河西走廊水生植物多样性在中部较高的水平分布格局可能与水生植物特点、特殊的地形有关,其原因可能是受河西走廊地区地形条件影响,该区域南部为祁连山脉,北部为戈壁沙漠地区,中间地区为平原,水热条件较好,中部区域为水生植物提供了更多的适宜生境。同时河西走廊起伏的地势和巨大的海拔高

度差异使该区域水生植物的水平变化叠加了垂直高度的变化,使得该地区水生植物水平变化规律不完全符合物种多样性随纬度降低而增加的规律,而在中部地带物种多样性最高^[7]。河西走廊地区水生植物海拔梯度也呈现驼峰型分布,在中海拔 1400m 到 1600m 多样性最高。其可能的原因是由于海拔梯度发生变化,导致沿海拔梯度变化的因子包括温度、潜在蒸散量、降水、气压等环境因子都随之变化^[29],在中海拔地区降雨量相对较充足,温度较为合适;同时在中海拔区域有相对较高的传播体从两端输入,物种来源丰富^[30]。

中域效应假说作为一个新兴的理论,被用于物种多样性空间格局变化的描述^[29]。很多研究表明中域效应假说对植物物种多样性格局有重要影响^[31-32]。中域假说认为在一定区域范围内,假设物种分布宽度与分布中心随机,物种分布区连续,由于物种受边界限制,导致区域中心位置出现的物种较多,在不可逾越的边界附近出现物种较少^[12,33],因此,物种丰富度将会呈现驼峰型结构。本研究显示中域效应假说对河西走廊水生植物纬向水平和海拔空间分布格局的解释力分别达 57.56% 和 63.5%,说明该假说能较好预测该区域水生植物多样性纬向和海拔格局。因此,本研究结果证明边界限制可能是导致河西走廊水生植物多样性空间格局的主要因素。研究表明,中域效应对多样性格局的解释力随着很多因素的不同而变化,如物种分布宽度、区域的大小、分类群或功能型的差异、地点、尺度等^[12];许多研究发现,对于分布区大的物种,环境因子对其物种丰富度解释力很低,而中域效应的解释力很强;反之,对于分布区小的物种,中域效应几乎没有解释力,而环境因子则解释力很强^[34-37]。相对陆生植物而言,水生植物分布范围较广^[38],所以中域假说能较好地解释该区域水生植物多样性的空间分布格局。尽管中域效应假说对河西走廊水生植物纬向水平和海拔空间分布格局的解释力分别达 57.56% 和 63.5%,但分别还有 42.44% 和 36.5% 的变异没有得到解释。早期研究表明气候、环境抑制性及人为因素是影响植物物种丰富度的重要因素^[25,39-40]。因此,该研究结果也说明其他没有引入的气候、地形、群落所处水环境特征、生物间相互作用和人为活动等因子也可能对河西走廊水生植物多样性格局产生重要影响。应进一步加强水分能量假说、面积效应等相关假说验证研究,以便更加全面的揭示河西走廊水生植物多样性格局的形成机制。

4 结论

本研究表明河西走廊共有水生植物 29 科 42 属 84 种,区域内共分布有穿叶眼子菜群丛、丝叶眼子菜群丛、水马齿-毛茛群丛、球穗莎草群丛、芦苇+香蒲群丛、眼子菜群丛、针蔺+水麦冬群丛、角果藻群丛、蓖齿眼子菜-穿叶眼子菜+轮叶狐尾藻群丛、香蒲群丛、莎草+蓼群丛、芦苇+蓼群丛、水麦冬群丛、轮叶狐尾藻群丛和水毛茛+针蔺群丛等 15 个主要水生植物群落;水体盐度、水温、海拔、经纬度等环境因子显著影响河西走廊水生植物群落类型。河西走廊水生植物多样性空间格局呈现出“ \cap ”型的单峰格局,其物种多样性空间格局主要受到几何(边界)限制和随机过程及其他未知因素共同控制。同时,需要对面积效应、环境异质性、水分能量、人为因素等因素进行进一步研究,来更加全面阐释河西走廊地区水生植物多样性空间格局的形成机制。

参考文献 (References):

- [1] 郝孟曦, 杨磊, 孔祥虹, 徐轩, 卢葳, 李中强. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替. 湖泊科学, 2015, 27(1): 94-102.
- [2] Ghavzan N J, Gunale V R, Mahajan D M, Shirke D R. Effects of environmental factors on ecology and distribution of aquatic macrophytes. Asian Journal of Plant Science, 2006, 5(5): 871-880.
- [3] Li Z Q, He L, Zhang H, Urrutia-Cordero P, Ekvall M K, Hollander J, Hansson L A. Climate warming and heat waves affect reproductive strategies and interactions between submerged macrophytes. Global Change Biology, 2017, 23(1): 108-116.
- [4] 于丹. 东北水生植物区划. 水生生物学报, 1996, 20(4): 322-332.
- [5] 李中强, 任慧, 郝孟曦, 张萌, 徐军. 斧头湖水生植物多样性及群落演替研究. 水生生物学报, 2012, 36(6): 1018-1026.
- [6] 郭葳, 龚旭昇, 邓绪伟, 汪正祥, 李中强. 汉江中下游水生植物群落及演替. 植物学报, 2016, 51(6): 782-789.
- [7] 李中强. 中国西北干旱区水生植物多样性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [8] Li Z Q, Yu D, Xiong W, Wang D, Tu M H. Aquatic plants diversity in arid zones of Northwest China: patterns, threats and conservation. Biodiversity & Conservation, 2006, 15(11): 3417-3444.

- [9] Li Z Q, Yu D. Factors affecting leaf morphology: a case study of *Ranunculus natans* C. A. Mey. (Ranunculaceae) in the arid zone of northwest China. *Ecological Research*, 2009, 24(6): 1323-1333.
- [10] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.
- [11] Wang Z H, Fang J Y, Tang Z Y, Lin X. Relative role of contemporary environment versus history in shaping diversity patterns of China's woody plants. *Ecography*, 2012, 35(12): 1124-1133.
- [12] 王襄平, 方精云, 唐志尧. 中域效应假说: 模型、证据和局限性. *生物多样性*, 2009, 17(6): 568-578.
- [13] Colwell R K, Lees D C. The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(2): 70-76.
- [14] Colwell R K, Rahbek C, Gotelli N J. The mid-domain effect and species richness patterns: What have we learned so far? *The American Naturalist*, 2004, 163(3): E1-E23.
- [15] 李鹏, 李彩霞, 张勇. 河西走廊水生维管植物分种检索表. *甘肃高师学报*, 1999, 4(2): 65-68.
- [16] Cook C D K. *Aquatic plant book*. New York: SPB Academic Publishing, 1996.
- [17] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [18] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, 2(3): 162-168.
- [19] Colwell R K. Range Model: tools for exploring and assessing geometric constraints on species richness (the mid-domain effect) along transects. *Ecography*, 2008, 31(1): 4-7.
- [20] 吴征镒. *中国植被*. 北京: 科学出版社, 1995.
- [21] 汤其成, 曲耀光, 周聿超. *中国干旱区水文及水资源利用*. 北京: 科学出版社, 1992.
- [22] 李峰, 谢永宏, 陈心胜, 邓正苗, 李旭. 黄河三角洲湿地水生植物组成及生态位. *生态学报*, 2009, 29(11): 6257-6265.
- [23] Jupp B P, Spence D H N. Limitations on macrophytes in a eutrophic lake, Loch Leven; I. effects of phytoplankton. *Journal of Ecology*, 1977, 65(1): 175-186.
- [24] Hillebrand H. On the generality of the latitudinal diversity gradient. *The American Naturalist*, 2004, 163(2): 192-211.
- [25] 王健铭, 王文娟, 李景文, 冯益明, 吴波, 卢琦. 中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释. *生物多样性*, 2017, 25(11): 1192-1201.
- [26] 王健铭, 董芳宇, 巴海·那斯拉, 李景文, 李俊清, 冯益明, 卢琦. 中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(12): 3488-3498.
- [27] Li L P, Liu Y N, Wang X P, Fang J Y, Wang Q C, Zhang B G, Xiao P G, Mohammad A, Terwei A. Different effects of regional species pool on plant diversity between forest and grassland biomes in arid northwest China. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0131982.
- [28] Crow G E. Species diversity in aquatic angiosperms: latitudinal patterns. *Aquatic Botany*, 1993, 44(2/3): 229-258.
- [29] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 2004, 12(1): 20-28.
- [30] Grytnes J A. Ecological interpretations of the mid-domain effect. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 883-888.
- [31] 冯建孟, 王襄平, 李晶, 方精云. 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响. *生物多样性*, 2006, 14(2): 107-113.
- [32] Kreft H, Sommer J H, Barthlott W. The significance of geographic range size for spatial diversity patterns in Neotropical palms. *Ecography*, 2006, 29(1): 21-30.
- [33] Jetz W, Rahbek C. Geometric constraints explain much of the species richness pattern in African Birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(10): 5661-5666.
- [34] Mora C, Robertson D R. Causes of latitudinal gradients in species richness: a test with fishes of the Tropical Eastern Pacific. *Ecology*, 2005, 86(7): 1771-1782.
- [35] Cardelús C L, Colwell R K, Watkins J E Jr. Vascular epiphyte distribution patterns: explaining the mid-elevation richness peak. *Journal of Ecology*, 2006, 94(1): 144-156.
- [36] Dunn R R, Colwell R K, Nilsson C. The river domain: why are there more species halfway up the river? *Ecography*, 2006, 29(2): 251-259.
- [37] Fu C Z, Hua X, Li J, Chang Z, Pu Z C, Chen J K. Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: geometric constraints, area and climate effects. *Ecography*, 2006, 29(6): 919-927.
- [38] Santamaría L. Why are most aquatic plants widely distributed? Dispersal, clonal growth and small-scale heterogeneity in a stressful environment. *Acta oecologica*, 2002, 23(3): 137-154.
- [39] 刘庆福, 刘洋, 孙小丽, 张雪峰, 康萨如拉, 丁勇, 张庆, 牛建明. 气候假说对内蒙古草原群落物种多样性格局的解释. *生物多样性*, 2015, 23(4): 463-470.

[40] 陈杰, 郭屹立, 卢训令, 丁圣彦, 苏思, 郭静静, 李乾玺. 伊洛河流域草本植物群落物种多样性. 生态学报, 2012, 32(10): 3021-3030.

附录 1 样点数据

Appendix 1 Date of samples

样点编号 Sample number	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔/m Altitude	地点 Location
1	102°44'1"	37°32'04"	2099	古浪县
2	102°43'56"	37°32'51"	2089	古浪县
3	98°10'31"	39°51'24"	1678	嘉峪关市
4	98°17'58"	39°46'06"	1630	嘉峪关市
5	98°17'21"	39°44'56"	1661	嘉峪关市
6	101°7'55"	38°30'50"	2156	金昌市
7	102°14'33"	38°30'57"	1515	金昌市
8	102°10'45"	38°30'46"	1531	金昌市
9	98°33'46"	39°45'30"	1423	酒泉市
10	98°32'32"	39°46'09"	1425	酒泉市
11	98°53'54"	39°47'39"	1426	酒泉市
12	39°25'22"	98°52'23"	1425	酒泉市
13	98°34'15"	39°48'56"	1422	酒泉市
14	98°34'15"	39°48'56"	1422	酒泉市
15	98°31'53"	39°49'1"	1430	酒泉市
16	98°50'4"	39°54'18"	1310	酒泉市
17	98°51'52"	39°56'14"	1300	酒泉市
18	97°56'47.58"	39°20'28.2"	2624	酒泉市
19	97°50'42.78"	39°24'49.62"	2707	酒泉市
20	98°26'35.46"	39°34'30.72"	1449	酒泉市
21	99°37'33.48"	39°36'23.28"	1319	酒泉市
22	98°37'40.38"	39°42'28.2"	1415	酒泉市
23	98°42'12.48"	39°42'30.84"	1402	酒泉市
24	98°39'6.96"	39°42'9.24"	1449	酒泉市
25	98°31'42.78"	39°47'31.32"	1427	酒泉市
26	98°08'17.52"	39°48'56.94"	2658	酒泉市
27	94°58'48.54"	40°31'39.06"	1067	酒泉市
28	101°8'47"	38°29'23"	2202	民乐县
29	101°1'54"	38°23'19"	2412	民乐县
30	101°59'29"	38°14'41"	1937	民乐县
31	102°01'04"	38°16'32"	1893	民乐县
32	102°14'29"	38°30'59"	1514	民乐县
33	100°45'0.9"	38°19'42"	2855	民乐县
34	101°08'56.16"	38°24'11.52"	2320	民乐县
35	100°33'38.82"	38°56'29.28"	1477	民乐县
36	102°45'13"	38°12'57"	1439	民勤县
37	102°54'36"	38°23'31"	1403	民勤县
38	101°10'15.6"	38°22'33.12"	2377	山丹县
39	101°09'55.62"	38°23'5.28"	2366	山丹县
40	101°08'16.56"	38°28'45.36"	2202	山丹县
41	101°07'25.08"	38°29'18.18"	2170	山丹县
42	102°39'20"	38°02'59"	1460	武威市
43	102°45'33"	38°10'26"	1441	武威市
44	102°37'08"	37°55'54"	1540	武威市
45	102°37'15"	37°57'14"	1502	武威市
46	102°00'53.88"	38°16'20.04"	1900	武威市
47	102°00'54.18"	38°17'46.38"	1880	武威市
48	102°01'10.98"	38°19'5.22"	1868	武威市
49	102°02'4.08"	38°20'23.34"	1796	武威市
50	102°00'29.04"	38°20'8.4"	1880	武威市
51	102°54'36.96"	38°23'30.36"	1410	武威市

续表

样点编号 Sample number	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔/m Altitude	地点 Location
52	101°7'57"	38°34'03"	2067	永昌县
53	97°02'58"	40°20'53"	1760	玉门市
54	97°3'42"	40°22'54"	1750	玉门市
55	97°2'1"	40°24'41"	1750	玉门市
56	97°2'1"	40°24'42"	1750	玉门市
57	97°23'24"	40°3'2"	1720	玉门市
58	99°29'20"	39°44'35"	1283	张掖市
59	99°31'38"	39°42'56"	1288	张掖市
60	99°47'53"	39°24'46"	1342	张掖市
61	99°44'42"	39°27'34"	1327	张掖市
62	99°38'39"	39°38'11"	1305	张掖市
63	99°48'04"	39°22'27"	1340	张掖市
64	99°49'22"	39°23'16"	1335	张掖市
65	99°55'29"	39°21'05"	1353	张掖市
66	100°7'20"	39°18'15"	1374	张掖市
67	100°2'20"	39°19'29"	1370	张掖市
68	100°8'58"	39°10'34"	1370	张掖市
69	100°8'24"	39°11'31"	1423	张掖市
70	100°25'44"	38°59'50"	1455	张掖市
71	100°26'59"	38°56'27"	1488	张掖市
72	100°26'29"	38°58'19"	1457	张掖市
73	100°26'5"	38°58'36"	1459	张掖市
74	100°25'23"	38°57'39"	1469	张掖市
75	100°26'14.76"	38°58'28.68"	1468	张掖市
76	100°26'15.96"	38°58'36.12"	1461	张掖市
77	100°25'16.14"	38°59'44.34"	1459	张掖市
78	100°25'16.02"	38°59'46.74"	1523	张掖市
79	100°25'37.5"	38°59'49.98"	1457	张掖市
80	100°26'39.06"	39°02'19.08"	1517	张掖市
81	100°24'49.56"	39°03'0.24"	1435	张掖市
82	100°23'59.22"	39°03'29.4"	1507	张掖市
83	100°23'51.84"	39°03'31.74"	1505	张掖市
84	100°25'43.32"	39°03'37.44"	1508	张掖市
85	100°24'27.3"	39°14'7.26"	1436	张掖市
86	99°53'59.04"	39°17'14.28"	1369	张掖市
87	99°53'22.26"	39°17'21.84"	1376	张掖市
88	99°44'42"	39°24'52.93"	1340	张掖市
89	99°44'42"	39°24'52.92"	1340	张掖市