

DOI: 10.5846/stxb202101090098

李群, 赵辉, 赵成章, 马敏, 唐玉瑞, 赵婷婷. 洮河国家湿地公园主要植物群落多样性对土壤环境因子的响应. 生态学报, 2022, 42(7): 2674-2684.

Li Q, Zhao H, Zhao C Z, Ma M, Tang Y R, Zhao T T. Response of main plant community diversity to soil environmental factors in Taohe national wetland park. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2674-2684.

洮河国家湿地公园主要植物群落多样性对土壤环境因子的响应

李 群, 赵 辉, 赵成章*, 马 敏, 唐玉瑞, 赵婷婷

西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070

摘要: 内陆河湿地原生植被群落多样性对土壤环境因子的响应分析, 有助于深入理解河岸带原生植物群落的生态适应策略。采用双向指示种分析(two-way indicator species analysis, TWINSpan)和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)方法对研究区 27 个样方的原生植物群落进行分析, 研究河岸带植物群落多样性与土壤因子之间的关系。结果表明: 研究区主要原生植物有 8 种生活型, 群落类型可分为女贞(*Ligustrum lucidum*) + 野蔷薇(*Rosa multiflora*) 群落、杠柳(*Periploca sepium*) 群落、艾蒿(*Artemisia argyi*) + 狗娃花(*Heteropappus hispidus*) 群落、旋覆花(*Inula japonica*) + 败酱(*Patrinia scabiosaeifolia*) 群落、沙棘(*Hippophae rhamnoides*) + 小檗(*Berberis thunbergii*) 群落和沙棘 + 红花岩黄耆(*Hedysarum multijugum*) 群落 6 类。群落的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')整体呈下降趋势, Pielou 均匀度指数(J)呈现增减交替的趋势, Simpson 优势度指数(C)整体呈增加趋势, 土壤粉粒含量与 Simpson 优势度指数(C)呈显著正相关关系($P < 0.05$), 其他土壤因子与多样性指数无显著相关关系($P > 0.05$), 表明土壤中粉粒含量是影响河流湿地原生植物群落分布和多样性的关键因子之一。内陆河流湿地土壤质地类型的差异性一定程度上决定河岸带湿地生态系统原生植物群落的种类组成和分布格局。

关键词: 物种多样性; 内陆河湿地; 植物群落; 土壤因子; TWINSpan

Response of main plant community diversity to soil environmental factors in Taohe national wetland park

LI Qun, ZHAO Hui, ZHAO Chengzhang*, MA Min, TANG Yurui, ZHAO Tingting

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: Analysis of the adaptability of the distribution and diversity of virgin vegetation in inland river wetland to soil environmental factors is helpful to understand the ecological adaptation strategies of the native plant communities in riparian zone. This study aims to examine the response of main plant community diversity to soil environmental factors in Taohe national wetland park. The two-way indicator species analysis (TWINSpan) and the canonical correspondence analysis (CCA) methods were used to analyze the native plant communities of 27 quadrats in the study area. The study site was located in the national wetland park conservation areas in Lintao County, Gansu Province, China (35°05'27"—35°15'58" N, 103°45'43"—103°50'55" E). Firstly, in the riparian zone on both sides of the middle section of Taohe National Wetland Park, a flat area with relatively intact native vegetation (vegetation formed by nature but not affected by obvious human activities), less disturbance from human activities, and no obvious topographic fluctuation was selected in the direction of vertical river. Secondly, the 27 representative sample plots, including shrub and herb communities were

基金项目: 国家自然科学基金(41461013 和 41861009)

收稿日期: 2021-01-09; 网络出版日期: 2021-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaocz601@163.com

selected. A 5 m×5 m shrub quadrat was set in each shrub plot. The height, density and coverage of all species in the quadrat were recorded in the survey of shrub community. In the investigation of herb community, 3 plots (1 m×1 m) were randomly selected from the thicket quadrats, and the height, coverage, density, frequency and life type of all plants in each quadrat were recorded in detail. The results showed that there were 8 life types of the main native plants in the study area, and the community types could be divided into 6 types. They were *Ligustrum lucidum*+*Rosa multiflora* community, *Periploca sepium* community, *Artemisia argyi*+*Heteropappus hispidus* community, *Inula japonica*+*Patrinia scabiosaeifolia* community, *Hippophae rhamnoides*+*Berberis thunbergii* community, and *Hedysarum multijugum* community. Besides, Shannon Wiener diversity index (H') showed a decreasing trend as a whole, while Simpson dominance index (C) displayed opposite changing trend, and Pielou evenness index (J) exhibited a trend of increase or decrease in alternate. Moreover, there was a significantly positive correlation ($P<0.05$) between the content of soil silt and C , and there was no significant correlation between other soil factors and the diversity index ($P>0.05$), indicated that the soil silt content of the soil was one of the key factors affecting the distribution and diversity of native plant communities in river wetland. The difference of soil texture type in inland river wetland determines the species composition and distribution pattern of native plant communities in riparian wetland ecosystem to some extent.

Key Words: species diversity; inland river wetlands; plant community; soil factor; TWINSpan

植物群落多样性能够反映植物利用环境资源的状况和种群在群落中的作用与地位,也可以揭示植物个体之间相互依存、相互制约的复杂关系,是生物多样性保护的重要依据^[1],对认识植物的生态适应性和维持植物群落稳定性机制具有重要意义^[2]。原生植被是由自然形成而未曾受到明显人为影响的植被^[3],是碳、水和生物多样性的天然储存库,在环境保护中发挥着至关重要的作用^[4],其物种多样性不仅能表征生物群落和生态系统结构的复杂性,体现群落结构、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异^[5],也能指示土壤环境状况^[6];同时物种多样性的变化对土壤水力特性及地表径流和土壤侵蚀存在潜在影响^[7]。河岸带生态系统具有多样性、动态性和复杂性^[8-9]。河岸带植物、水文过程及土壤是组成河岸带生态系统的三大基本要素。土壤是河岸带湿地生态系统最主要的环境因子之一,其理化性质与河岸带生境变化关系密切,是河岸带湿地生态系统的重要指征,决定湿地植物的分布类型、数量和质量^[10-11],其中,土壤质地是土壤的一个较为稳定的自然属性,可以通过土壤砂粒、粉粒和黏粒组分的影响自身的蓄水能力,直接作用于植物群落对水分及养分的吸收,进而影响植物群落在空间上分布和内部的植物组成及其结构形式^[12-13];同样,植物也可以通过改变土壤表层的光照条件及凋落物回归土壤等方式反作用于土壤成土过程。因此,植物群落的多样性与土壤环境因子之间相互作用共同维持生态系统的稳定性,能够反映植物群落和种群的生态适应能力及其环境可塑性机制^[14],对揭示生物多样性与生态系统功能的关系有重要意义^[15-16]。

洮河是黄河上游第二大支流和水量最丰富的河流,也是重要的生态保育区。临洮洮河国家湿地公园位于洮河的中下游,是青藏高原和黄土高原的交汇地带,也是洮河向刘家峡水库输送清洁水源的关键区域和重要的水源涵养地,地处中温带半干旱、半湿润交汇气候区。园内动植物资源丰富,是宝贵的天然物种基因库,也是内陆河湿地的典型代表,具有很高的科学研究价值。目前,有关草地物种多样性与稳定性、生产力及生态系统多功能性之间的关系^[2,17-19],植物群落多样性对植物个体的影响^[20],物种多样性与土壤环境的相互作用^[6,7,21]及森林和灌丛群落物种多样性的空间分布格局^[22-24]等方面进行了大量研究,有关河流湿地植物群落物种多样性及影响因素^[25-26],河岸带植物群落对洪水的响应^[9]也得到了关注,但是有关河岸带湿地植物群落物种多样性对土壤环境因子的响应机制研究较少,尤其是土壤质地与河岸带原生植物群落物种多样性存在怎样的联系尚不清晰。鉴于此,本研究结合双向指示种分析(two-way indicator species analysis, TWINSpan)和典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)等方法研究了洮河国家湿地公园主要原生植物物种多样性及其对土壤因子间的关联性,旨在揭示河岸带植物群落的稳定性及其物种多样性与土壤环境因子之间

的生态关系,为气候变化背景下内陆河流湿地植物多样性保护及河岸带生态系统的稳定性维持提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域和样地概况

研究区位于甘肃省定西市临洮县南部(图1),地处青藏高原与黄土高原的交汇地带,秦岭褶皱系西北缘,东、西、南山峦起伏,沟壑纵横($103^{\circ}45'43''$ — $103^{\circ}50'55''$ E, $35^{\circ}05'27''$ — $35^{\circ}15'58''$ N),海拔2200—2500 m。该区域属中温带半干旱、半湿润交汇气候区,年平均气温 7.2°C ,年平均降水量 519.2 mm,全年太阳辐射量 139.76 kCal/cm^2 。洮河是黄河的一级支流发源于青海省河南蒙古族自治县西倾山东麓,洮河蜿蜒曲折从东流过碌曲、临潭、卓尼县城南,至岷县茶埠急转向西北,出九甸峡与海巅峡后,穿临洮盆地于永靖县注入刘家峡水库。土壤以红土、潮土、砂土为主,主要植物有:杠柳(*Periploca sepium*)、小叶杨(*Populus simonii*)、小檗(*Berberis thunbergii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)和红花岩黄耆(*Hedysarum multijugum*)等。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设置与群落学调查

在多次对洮河国家湿地公园两岸植物群落的实地勘察和考虑可抵达性的基础上,于2019年8月20—31日(该时间段,研究区内植物的生长季已经结束,群落的结构达到稳定状态,实验结果在一定程度上能够反映当地植物群落对环境的适应性)分别在洮河国家湿地公园中段两岸的河岸带,垂直河流方向选取一条原生植被(由自然形成而未曾受到明显人为影响的植被)保存较为完整、人类活动干扰少,无明显的地形起伏变化,地势平坦的区域,设置具有代表性的典型灌草群落样地27个,该区域植被发育时间较长,基本不会受短时间汛期洪水的影响,植被生长所需水分主要源自降水和地下水。选择天气晴朗、土壤水盐状况相对稳定的期间进行取样。首先,在选定的样地中设置灌木和草本样方,监测样方内的生境状况;然后,在每个灌木样地设置1个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的灌木样方,记录样方内所有种的种名、高度、株数和盖度等;此外,在灌丛样方内沿对角线选取3个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的草本小样方,详细记录每个样方内所有植物的种名、高度、盖度、密度及生活型等,每个样方中数据重复测量3次;野外不能鉴别的植物种类,采集标本带回室内鉴定;然后齐地刈割每个草本样方地上所有植株带回实验室,于 80°C 烘箱中烘干48 h,测量草本样方内物种的地上生物量。用观察法描述样地基本概况,采用便携式手持GPS测定每个样方的海拔和经纬度。

1.2.2 土壤数据采集与处理

(1)土壤含水量、土壤容重和土壤盐分测定:

在样方内随机挖掘 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 土壤剖面,用环刀(200 cm^3)分5层间隔10 cm采取土样,重复3次,现场编号、各土层均匀混合称鲜质量;然后带回实验室在 105°C 的烘箱内烘12 h,取出称质量,计算出各样地0—50 cm土层土壤质量含水量和土壤容重;用电导法测定土壤含盐量,采用上海雷磁仪器厂生产的DDS-11C

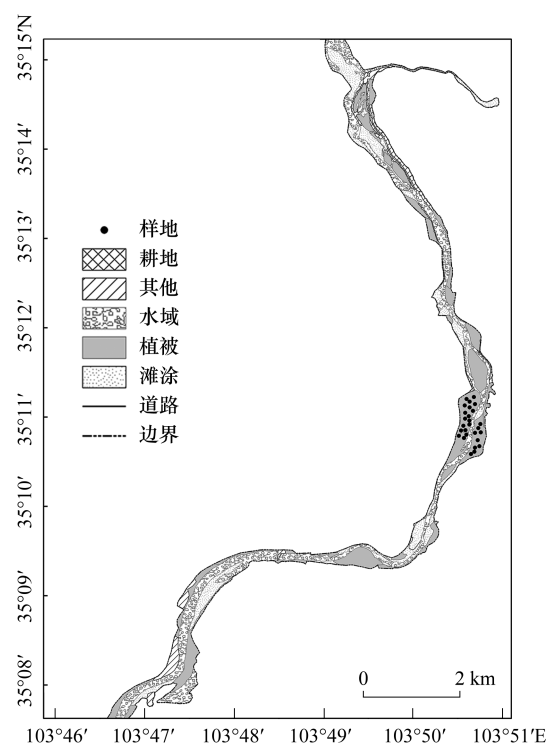


图1 研究区概况和样地设置图

Fig.1 Study area and locations of measured plots

便携式电导仪测浸出液的电导率, 3 次重复, 取平均值^[27]。

(2) 土壤质地测定:

利用 Master Sizer2000 激光颗粒分析仪测定土壤机械组成, 参照国际制来划分土壤质地类型黏粒 (<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.02 mm)、砂粒(0.02—2 mm), 并利用郭彦彪(2013)^[12]的土壤粒度测定代码对不同土壤粒径范围的百分含量进行测试, 得出各样地土质类型。

1.3 数据分析

1.3.1 群落的排序与分类

采用 Wintwins 2.3 软件对所有植被进行 TWINSpan 数量分类; 其次, 用软件 CANOCO 4.5 对环境和植物物种进行将趋势典范对应分析排序和 CCA 分析确定与植被类型相关性最显著的环境因子; 最后采用 SPSS 22.0 软件进行相关分析。通过 Excel 2019 和 Origin 2016 软件绘图。

1.3.2 物种多样性分析

选取重要值(Important value, IV)作为评价群落中各物种相对重要性的综合数量指标^[28], 计算公式如下:

$$IV_{\text{灌木}} = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度}) / 3;$$

$$IV_{\text{草本}} = (\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对生物量}) / 4;$$

式中, 相对多度 = (某个种株数/所有种的总株数) × 100%;

相对频度 = (某个种在统计样方中出现的次数/所有种出现的总次数) × 100%;

相对优势度 = (某一物种的基径面积之和/全部种的基径面积之和) × 100%;

相对密度 = (某种植物的个体数/全部植物的个体数) × 100%;

相对盖度 = (样方中该种个体的分盖度/样方中全部个体所有分盖度之和) × 100%;

相对高度 = (某种植物的个体高度/全部植物的个体高度之和) × 100%;

相对生物量 = (某种植物的个体生物量/全部植物的个体生物量之和) × 100%;

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 优势度指数(C)来表示植物个体数量在种间的分配情况。计算公式分别为:

Shannon-Wiener 多样性指数:

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

Simpson 优势度指数:

$$C = \sum_{i=1}^S (P_i)^2$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H' / \ln S$$

式中, S 为植物种数; P_i 表示第 i 个物种重要值与群落物种总重要值之比。

2 结果和分析

2.1 植物群落类型划分

对 27 个样地 37 种植物的重要值矩阵进行 TWINSpan 等级分类得到分类树状图(图 2), 并结合实际的生态现状将研究区群落划分为 6 个群落类型(I、II、III、IV、V、VI)(表 1)。

2.2 植物生活型特征

洮河国家湿地公园确定的主要原生植物物种包含 8 种生活型。其中, 群落 I 生活型有 6 种; 群落 II、III 均有 4 种; 群落 IV 有 7 种; 群落 V、VI 均有 5 种。群落 I—VI 的植物生活型差异显著($P < 0.05$), 均以多年生草本比例最大(表 2), 其中: 群落 I 中多年生草本 5 种, 占统计植物种的 35.71%, 重要值 0.23; 灌木 4 种, 占 28.57%, 重要值 0.29, 半灌木 2 种, 占 14.29%, 其他生活型的植物均为 1 种, 占 7.14%; 群落 II 中多年生草本 8 种, 占

61.54%,重要值 0.29;一年生草本 2 种,占15.38%,一年生或二年生草本 1 种,占 7.69%;灌木 2 种,占 15.38%,重要值 0.22;群落 III 中多年生草本 8 种,占 72.73%,重要值 0.87;其他生活型的植物均为 1 种,占 9.09%;群落 IV 中多年生草本 7 种,占 53.85%,重要值 0.95;其他生活型的植物均为 1 种,占 7.69%;群落 V 中多年生草本 7 种,占 58.33%,重要值 0.24;灌木为 2 种,占 16.67%,重要值 0.26;其他生活型的植物均为 1 种,占 8.33%;群落 VI 中多年生草本 6 种,占 54.55%,重要值 0.24;半灌木 2 种,占 18.18%,重要值 0.22;其他生活型的植物均为 1 种,占 9.09%。与其他 3 个群落相比,群落 I 和 IV 植物生活型更加多样化,如出现落叶乔木和二年生或多年生草本的生活型植物,且从群落 I 至群落 VI,物种数整体呈减少趋势,而生活型表现为先减少后增加再减少的规律,主要生活型所占的比例均以针茅、赖草和藁草等多年生根茎型克隆植物为主,其耐胁迫能力均较强。总体而言,研究区的灌木和多年生草本的重要值较大,在群落结构中发挥主要功能。

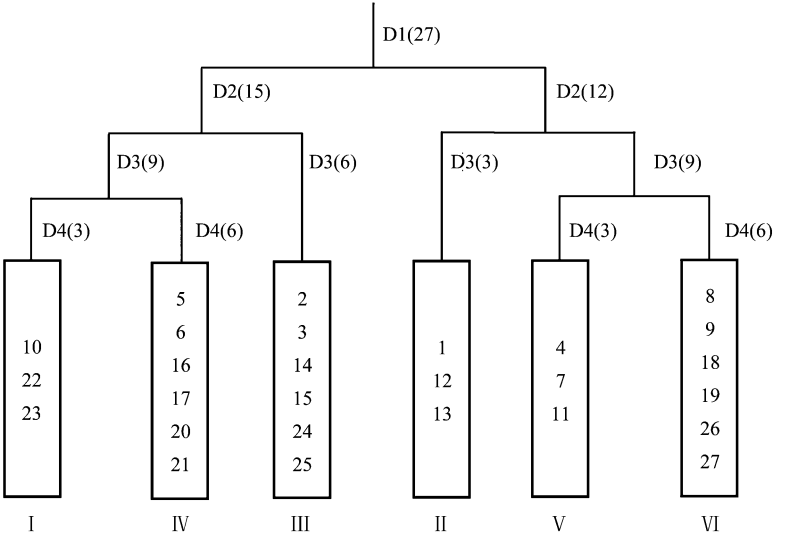


图 2 洮河湿地植物群落 TWINSpan 分类树状图

Fig.2 Dendrogram of the TWINSpan classification of phytocoenoses in Taohe Wetland

I, 女贞+野蔷薇群落, *Ligustrum lucidum*+*Rosa multiflora* community; II, 杠柳群落, *Periploca sepium* community; III, 艾蒿+狗娃花群落, *Artemisia argyi*+*Heteropappus hispidus* community; IV, 旋覆花+败酱群落, *Inula japonica*+*Patrinia scabiosaeifolia* community; V, 沙棘+小檗群落, *Hippophae rhamnoides*+*Berberis thunbergii* community; VI, 沙棘+红花岩黄耆群落, *Hippophae rhamnoides*+*Hedysarum multijugum* community; TWINSpan: 双向指示种分析 Two-way indicator species analysis

表 1 湿地公园原生植物群落 TWINSpan 分类结果

Table 1 The results of the TWINSpan classification of phytocoenoses in Taohe Wetland

组 Group	样方编号 Quadrat number	群落类型 Community type	物种数 Species number	盖度 Coverage/%
I	10, 22, 23	女贞+野蔷薇群落 (<i>Ligustrum lucidum</i> + <i>Rosa multiflora</i>)	14	85—90
II	1, 12, 13	杠柳群落 (<i>Periploca sepium</i>)	13	80—85
III	2, 3, 14, 15, 24, 25	艾蒿+狗娃花群落 (<i>Artemisia argyi</i> + <i>Heteropappus hispidus</i>)	11	80—91
IV	5, 6, 16, 17, 20, 21	旋覆花+败酱群落 (<i>Inula japonica</i> + <i>Patrinia scabiosaeifolia</i>)	13	100
V	4, 7, 11	沙棘+小檗群落 (<i>Hippophae rhamnoides</i> + <i>Berberis thunbergii</i>)	12	85—90
VI	8, 9, 18, 19, 26, 27	沙棘+红花岩黄耆群落 (<i>Hippophae rhamnoides</i> + <i>Hedysarum multijugum</i>)	11	60—85

I, 女贞+野蔷薇群落, *Ligustrum lucidum*+*Rosa multiflora* community; II, 杠柳群落, *Periploca sepium* community; III, 艾蒿+狗娃花群落, *Artemisia argyi*+*Heteropappus hispidus* community; IV, 旋覆花+败酱群落, *Inula japonica*+*Patrinia scabiosaeifolia* community; V, 沙棘+小檗群落, *Hippophae rhamnoides*+*Berberis thunbergii* community; VI, 沙棘+红花岩黄耆群落, *Hippophae rhamnoides*+*Hedysarum multijugum* community; TWINSpan: 双向指示种分析 Two-way indicator species analysis

2.3 植物群落土壤质地类型

研究区 27 个样方的土质类型如图 3,其中 17 个样方的土样贴近 z 轴(粉粒含量)分布,10 个样方的土样分布靠近 Y 轴(黏粒含量),表明研究区土质类型主要以粉黏土为主,其次是壤土、粉黏壤土和粉壤土,粉土和砂土最少。

表 2 湿地公园主要原生动物的生活型
Table 2 The life type of the main plant in wetland park

组 Group	群落类型 Community type	种数 Number	生活型 Life type	分比例/% Partial propotion	总比例/% Total propotion	重要值 Important value
I	女贞+野蔷薇群落 (<i>Ligustrum lucidum</i>) + (<i>Rosa multiflora</i>)	1	乔木	7.14	1.35	0.04
		4	灌木	28.57	5.41	0.29
		2	半灌木	14.29	2.70	0.05
		5	多年生草本	35.71	6.76	0.23
		1	一年生或二年生草本	7.14	1.35	0.02
		1	一年生或冬性禾草	7.14	1.35	0.06
II	杠柳群落 (<i>Periploca sepium</i>)	2	灌木	15.38	2.70	0.22
		8	多年生草本	61.54	10.81	0.29
		1	一年生或二年生草本	7.69	1.35	0.01
		2	一年生草本	15.38	2.70	0.08
III	艾蒿+狗娃花群落 (<i>Artemisia argyi</i> + <i>Heteropappus hispidus</i>)	1	半灌木	9.09	1.35	0.12
		8	多年生草本	72.73	10.81	0.87
		1	一年生或二年生草本	9.09	1.35	0.22
		1	一年生或冬性禾草	9.09	1.35	0.06
IV	旋覆花+败酱群落 (<i>Inula japonica</i> + <i>Patrinia scabiosaeifolia</i>)	1	灌木	7.69	1.35	0.07
		1	半灌木	7.69	1.35	0.12
		7	多年生草本	53.85	9.46	0.95
		1	二年生或多年生草本	7.69	1.35	0.01
		1	一年生或二年生草本	7.69	1.35	0.24
		1	一年生或冬性禾草	7.69	1.35	0.04
		1	一年生草本	7.69	1.35	0.22
V	沙棘+小檗群落 (<i>Hippophae rhamnoides</i> + <i>Berberis thunbergii</i>)	2	灌木	16.67	2.70	0.26
		7	多年生草本	58.33	9.46	0.24
		1	一年生或二年生草本	8.33	1.35	0.02
		1	一年生或冬性禾草	8.33	1.35	0.02
		1	一年生草本	8.33	1.35	0.02
VI	沙棘+红花岩黄耆群落 (<i>Hippophae rhamnoides</i> + <i>Hedysarum multijugum</i>)	1	灌木	9.09	1.35	0.12
		2	半灌木	18.18	2.70	0.22
		6	多年生草本	54.55	8.11	0.24
		1	一年生或冬性禾草	9.09	1.35	0.04
		1	一年生或二年生草本	9.09	1.35	0.03

2.4 各植物群落类型土壤环境特征

按照 TWINSpan 对湿地植物群落分类的结果,并结合各样方土质类型,研究区土壤理化性质变化特征如表 3 所示。从女贞+野蔷薇群落至沙棘+红花岩黄耆群落,土壤质地由黏土逐渐转变为砂壤土,砂粒(C_{sand})和粉砂(C_{silt})含量整体上呈减少趋势,分别增加了 6.71 倍和 0.08 倍;黏粒(C_{clay})含量整体呈减少趋势,减少了 89.10%;土壤含水量(SMC)和土壤容重(SBD)整体上呈降低趋势,分别减少了 59.38%和 4.63%,土壤电导率(EC)呈增加趋势,增加了 0.14 倍。表明随着土壤质地类型的改变,SMC、EC 和 SBD 发生相应改变,湿地植物群落组成也随之发生变化,说明土壤质地类型在一定程度上影响植物群落的组成和结构。

2.5 CCA 排序结果

运用 Canoco 4.5 软件对调查到的 37 种植物和土壤

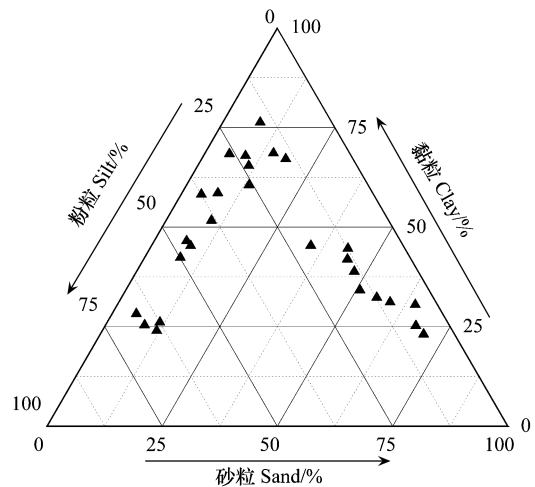


图 3 洮河湿地原生植物群落各监测点土壤三组分三角图

Fig.3 Triangulation of soil components at each monitoring point of native plant community in Taohé Wetland

环境特征进行典范对应分析(CCA),得到排序轴与环境因子的关系以及各排序轴的特征值(表4)。特征值分别为0.4060和0.3970,CCA排序前2轴物种-环境关系累积百分比方差为58.80,即前两轴可以代表58.8%的生态信息量,说明排序结果良好。因此,采用第1轴和第2轴的信息对样地的物种与环境因子之间的关系进行分析。

采用前2轴绘制植物种类和环境因子的二维空间CCA排序图(图4)。图4中用箭头表示各土壤环境因子,箭头连线的长度及其与排序轴的夹角可以代表该土壤环境因子与排序轴的相关性大小,箭头连线越长,与排序轴夹角越小,说明该土壤环境因子与排序轴相关性越大,反之相关性越小,图中数字表示样地编号。

综合表4和图4可知,CCA排序轴能够反映一定的生境梯度特征,由图4可以看出,代表土壤 C_{sand} 的箭头长度最长,且与第二排序轴重叠即夹角最小,表明 C_{sand} 与轴2相关性最高,相关性为0.8492(表4);代表 C_{silt} 的箭头长度及与轴1的夹角仅次于 C_{sand} ,且与轴1的正方向相反,表明 C_{silt} 与轴1的相关性低于 C_{sand} ,且为负相关,相关性为-0.7064;代表 C_{clay} 的箭头长度虽然较长,但与两个轴的夹角均较大,且与轴2的正方向相反,表明其与轴1和轴2相关性近似,分别为0.5708,-0.6379;代表 EC 的箭头虽然与轴2重叠,夹角最小,但是箭头长度较短,且与轴1的正方向相反,表明其与轴1的相关性较低,相关性为-0.3646;代表 SBD 的箭头与轴1夹角较小,但长度较短,表明其与轴1相关性较低,相关性为0.5726;代表 SMC 的箭头长度较长,且与轴1的夹角较小,表明其与轴1相关性较高,相关性为0.7673(图4,表4)。

表3 湿地植物群落土壤理化性质特征(平均值±标准误差)
Table 3 Soil characteristics of wetland plant community (mean±SE)

群落类型 Community type	土壤质地类型 Soil texture type	$C_{\text{sand}}/\%$	$C_{\text{silt}}/\%$	$C_{\text{clay}}/\%$	$SMC/\%$	$EC/(\mu\text{s}/\text{cm})$	$SBD/(\text{g}/\text{cm}^3)$
I	黏土	8.47 ± 0.42e	25.41 ± 1.27d	66.12 ± 3.31a	42.32 ± 0.42a	190.46 ± 9.52d	0.41 ± 0.02a
II	壤土、粉黏壤土、粉黏土	19.77 ± 0.10b	55.20 ± 2.76bc	25.03 ± 1.25c	21.69 ± 0.22b	353.03 ± 17.65a	0.32 ± 0.02b
III	壤土、粉黏壤土、粉黏土	16.17 ± 0.82c	50.98 ± 2.56c	32.86 ± 1.65b	18.53 ± 0.19c	230.97 ± 11.55b	0.35 ± 0.02b
IV	粉黏土、粉壤土	10.54 ± 0.53d	56.38 ± 2.82b	33.08 ± 1.65b	17.88 ± 0.18d	216.64 ± 10.83c	0.34 ± 0.02b
V	粉壤土	8.53 ± 0.43e	67.26 ± 3.36a	24.22 ± 1.21c	17.22 ± 0.17d	227.47 ± 11.37c	0.37 ± 0.02b
VI	砂壤土	65.29 ± 3.26a	27.50 ± 1.37d	7.21 ± 0.36d	17.19 ± 0.17d	216.63 ± 10.83c	0.35 ± 0.02b

同列不同小写字母表示群落间差异显著($P<0.05$); C_{sand} , 砂粒含量 The content of sand; C_{silt} , 粉砂含量 The content of silt; C_{clay} , 黏粒含量 The content of clay; SMC , 土壤含水量 Soil moisture content; EC , 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SBD , 土壤容重 Soil bulk density

表4 洮河湿地植物和土壤特征的CCA分析结果
Table 4 Results of CCA analysis of plant and soil characteristics in Taohe wetland

统计量 Statistic	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	总方差 Total variance
C_{sand}	0.003	0.8492	2.9200
C_{silt}	-0.7064	-0.4772	
C_{clay}	0.5708	-0.6379	
SMC	0.7673	-0.2375	
EC	-0.3646	-0.0038	
SBD	0.5726	0.1213	
特征值 Eigenvalues	0.4060	0.3970	
物种与环境的相关性 Function traits-environment correlations	0.9470	0.9190	
累积百分比方差 Explained variation (cumulative)	物种数据 13.9000	27.5000	
	物种-环境关系 29.8000	58.8000	
总特征值 All eigenvalues			2.9200
总典范特征值 Canonical eigenvalues			1.3640

CCA: 典范对应分析 Canonical correspondence analysis.

从排序轴来看,轴1基本上反映植物群落中土壤盐分和土壤含水量的变化情况,从左到右, SMC 逐渐增大, EC 逐渐减少,群落类型由杠柳群落逐渐转变为女贞+野蔷薇群落;轴2基本上反映植物群落土壤质地变化

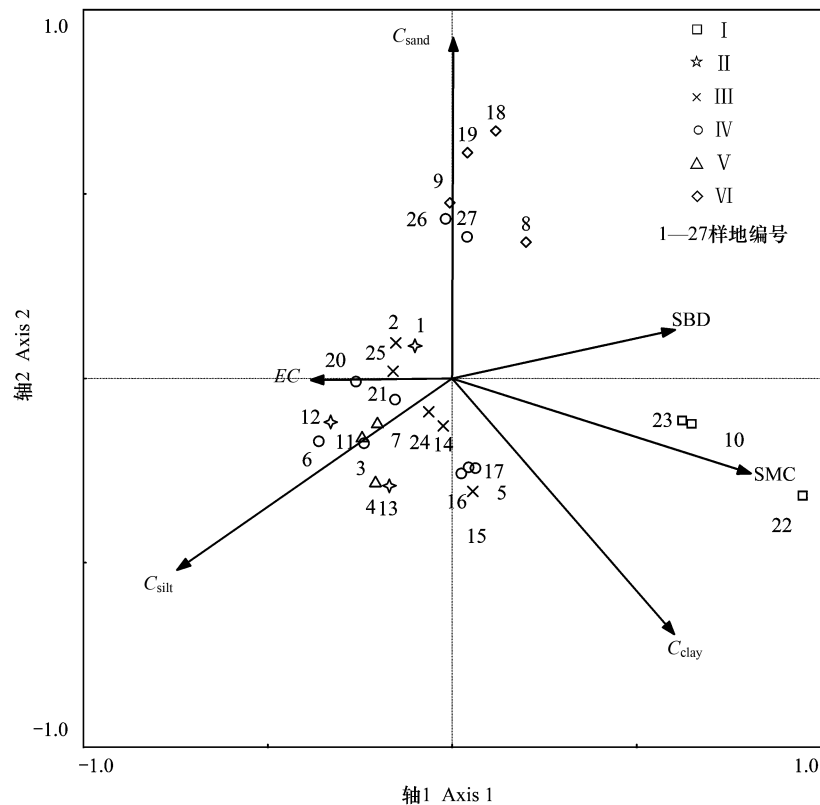


图 4 研究区原生植物群落 27 个样地的典范对应分析二维排序图

Fig.4 Two-dimensional ordination diagram of canonical correspondence analysis for native plant community in 27 quadrats in study area
 SMC, 土壤含水量 Soil moisture content; EC, 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SBD, 土壤容重 Soil bulk density; C_{sand} : 砂粒含量 The content of sand; C_{silt} : 粉砂含量 The content of silt; C_{clay} : 黏粒含量 The content of clay

情况,从上到下 C_{silt} 和 C_{clay} 逐渐增加, C_{sand} 逐渐减少,群落类型逐渐由沙棘+红花岩黄耆群落逐渐过渡为沙棘+小檗群落和杠柳群落,最后转变为艾蒿+狗娃花群落。综上,洮河湿地原生植物群落主要沿土壤质地变化的梯度分布, SBD 和 EC 对植物分布影响作用不大。因此,本文采用 SMC、 C_{sand} 、 C_{silt} 和 C_{clay} 土壤特性做进一步分析。

2.6 植物群落物种多样性

TWINSPAN 划分的 6 个植物群落多样性指数,如图 5 所示。随着土壤质地由黏土转为砂壤土和植物群落由群落 I 至群落 VI 的转变,群落的 H' 整体呈下降趋势, J 呈现增减交替的趋势,群落 II 的 H' 和 J 最大,群落 V 的 J 最小;群落 C 整体呈增加趋势,且群落 I 和群落 II 的 C 最小,群落 VI 的 C 最大。表明土壤质地一定程度上决定群落内物种组成,在土壤质地由黏土转变为砂壤土的过程中,整体上植物群落的 H' 随着 J 的降低而降低,随 C 的增加而减小,即 H' 越低, C 越高,群落的结构越简单,越趋于稳定,但组成群落的植物种类和个体数越少,物种多样性越低。

2.7 各植物群落多样性指数与主要土壤因子的相关性分析

对 CCA 排序分析所得对植物群落分布影响最显著的土壤质地和土壤盐分方面的土壤因子与群落多样性指数做相关分析,结果如表 5, C_{silt} 与 C 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 与 H' 和 J 无显著相关性 ($P > 0.05$); C_{sand} 、 C_{clay} 和 SMC 与 C 、 H' 和 J 均无显著相关关系 ($P > 0.05$)。表明土壤质地中 C_{silt} 是影响湿地植物群落多样性和分布的关键因子,同时植物群落多样性与 C_{sand} 、 C_{clay} 和 SMC 关系不大,这些关系与河流湿地土壤沉积过程有关。

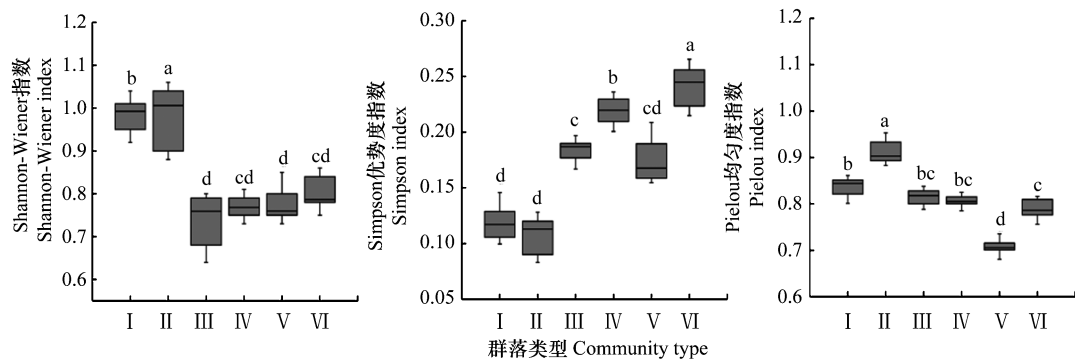


图5 洮河湿地6种原生植物群落多样性指数

Fig5 Diversity index of 6 native plant communities in Taohe wetland

不同小写字母表示群落间差异显著 ($P<0.05$)

表5 各植物群落多样性指数与土壤因子的相关分析

Table 5 Correlation analysis of plant community diversity index and soil factors

	C_{sand}	C_{silt}	C_{clay}	EC	H'	C	J
C_{sand}	1						
C_{silt}	-0.948 **	1					
C_{clay}	-0.908 **	0.727	1				
SMC	-0.108	0.126	0.074	1			
H'	-0.203	0.465	-0.177	0.521	1		
C	0.634	-0.809 *	-0.301	-0.463	-0.827 *	1	
J	-0.173	0.392	-0.143	0.228	0.766	-0.501	1

*, 在 0.05 水平上 (双侧) 显著相关; **, 在 0.01 水平上 (双侧) 显著相关; H' : Shannon-Wiener 多样性指数 J : Pielou 均匀度指数 C : Simpson 优势度指数

3 讨论

植物物种多样性能够度量群落的组成结构和功能的复杂性,同时也能指示植物群落土壤环境状况^[6],土壤质地是土壤的一个较为稳定的自然属性,在一定程度上决定土壤的蓄水能力及植物群落的分布和结构^[12],其变化直接影响着植物群落的生长、发育及演替过程^[29]。本研究发现研究区原生植被主要有 6 个群落类型 (图 2, 表 1),包含 8 种生活型 (表 2),随着土壤质地由黏土逐渐转变为砂壤土,植物群落发生了由中生植物群落女贞+野蔷薇群落向旱中生植物群落沙棘+红花岗岩黄耆群落的转变 (表 3),植物群落的物种数逐渐减少,结构趋于简单,群落的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和物种数整体呈下降趋势,Pielou 均匀度指数 (J) 呈现增减交替的趋势,Simpson 优势度指数 (C) 整体呈增加趋势 (表 1, 图 5),土壤 C_{clay} 与 C 呈显著正相关关系 ($P<0.05$) (表 5)。

主要原因有:1)群落 I 主要分布于河岸东北的阶地上,该区属于河流的凸岸发育的泛滥平原,沉积物较细,一般为泥、砂沉积^[30]。土壤中 C_{clay} 占比最大, C_{sand} 占比最小 (表 3),以黏土为主,土壤空隙小,持水能力强^[31],SBD 和 SMC 最大,有利于女贞、野蔷薇等的中生灌木群落的发育,群落内部伴生有沙棘、蓍、野棉花和针茅等灌木和多年生草本 (表 2),物种丰富,结构复杂,较高的物种数能够增加土壤孔隙度、根系生物量和土壤有机碳含量^[22],改变土壤特性;群落 VI 主要分布在河岸东南方向的阶地上,该区域属于河流凹岸,在流水的侧向侵蚀和加积作用下发育的典型天然堤,沉积物主要由细砂岩、粉砂岩、泥岩组成,粒度较群落 I 粗^[30]。土壤中 C_{sand} 占比最大,以砂壤土为主,砂壤土的 SBD 小,孔隙度大,透水性强^[31],SMC 最低 (表 3),植物群落呈连续带状分布,以耐旱、耐贫瘠的沙棘、红花岗岩黄耆为优势种,伴生有针茅、藁草和赖草等多年生草本和早熟禾

等一年生草本(表2)。从群落 I 至群落 VI, 群落物种种数逐渐减少(表1), 但主要生活型所占比例无显著变化, 耐胁迫多年生草本占比较高(表2); 群落结构趋于简单, 原有的优势种逐渐被伴生种取代, 群落内部种间竞争降低, 稳定性增加, 因此, 群落物种数和 H' 逐渐降低(表1, 图5); 群落的 H' 与土壤三组分占比没有显著相关关系(表5), 可能与土壤其他因子或环境因子有关, 需要进一步证实。2) 随着土壤质地类型的转变, 植物群落的 C 整体呈增加趋势, 主要是因为土壤质地中 C_{clay} 占比下降, C_{silt} 和 C_{sand} 占比逐渐增加(表3), 土壤机械组成发生改变, 导致 SBD(表3) 和土壤持水力降低^[31], SMC 降低, 同时 EC 增大, 土壤养分逐渐降低^[32]。在强烈的环境过滤作用下, 植物群落生态位分化, 优势种发生演替, 由群落 I、II 逐渐转变为群落 III、IV、V, 最后演化为耐贫瘠的群落 VI, 群落成员型逐渐减少, 结构趋于简单, 因此, 植物群落 C_{silt} 含量与群落 C 呈显著正相关关系($P < 0.05$)(表5)。群落 VI 呈成群片状分布, 群落优势种显著, 占据一定的资源, 结构稳定, C 最高(图5); 而群落 IV 底部发育了优势度显著呈斑块状聚集分布的旋覆花、败酱等多年生草本层, 因此, 群落 IV 的 C 不及群落 V(图5)。3) 当群落有较高的生态优势度时, 由于优势种明显, 优势种的个体数会明显多出一般种而使群落具有低的均匀度^[33]。研究区植物群落的均匀度指数呈增减交替趋势, 主要是因为从群落 I 至群落 II 逐渐过渡为群落 V, 最后演化为群落 VI 的过程中, 群落分布格局发生了由分散状分布至片状分布、斑块状分布, 最后呈成群片状分布的转变, 因此, 斑块状分布的沙棘+小檗群落的 J 最低; 片状分布的杠柳群落 J 最高(图5), 所以植物群落的土壤的 C_{sand} 、 C_{silt} 和 C_{clay} 与 J 无显著相关性($P > 0.05$)(表5)。

综上, 研究区植物群落的 H' 随着物种丰富度的升高而增加, 随着 C 的降低而减少(图5), 即 H' 越低, C 越高, 群落的结构越简单, 越趋于稳定, 但组成群落的植物种类和个体数越少, 物种多样性越低, 这与冯刚(2011)^[34] 等人的研究结果一致。内陆河流湿地由于其特殊的成土过程和流水作用使得沉积物粒度在黏土、粉砂及砂含量比例发生改变^[30,35], 形成不同的土壤质地类型, 发育了与其生境相适应的植物群落, 体现了河流湿地植物群落种类组成与土壤环境的密切关联性, 是河岸带湿地生态系统植物、水文过程与土壤间长期相互作用的结果。

4 结论

随着土壤质地类型的转变, 河岸带植物由中生植物群落逐渐转变为旱中生植物群落, 土壤质地与植物群落优势度指数间的关联性体现了河流对植物群落的环境过滤作用和植物通过构建差异化群落结构应对河岸带复杂多变生境的生态适应策略, 同时反映了内陆河流湿地植物、土壤和水文长期相互作用下的河岸带湿地生态系统稳定性维持机制。本研究仅从河流湿地土壤质地、土壤含水量和土壤盐分的角度出发, 通过分析土壤质地对群落分布及 α 多样性的影响, 探讨了河流湿地植物群落对异质性土壤环境的适应策略。植物群落的多样性也受气候、地下水埋深、土壤有机质等其他环境因素的影响, β 多样性可以体现不同生境条件下的群落间的物种替换速率, 均需做进一步探讨和研究。

致谢: 甘肃洮河国家湿地公园管理局帮助样方调查, 特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 董雪蕊, 张红, 张明盟. 基于系统发育的黄土高原地区木本植物多样性及特性格局. 生物多样性, 2019, 27(12): 1269-1278.
- [2] Van Rooijen N M, De Keersmaecker W, Ozinga W A, Coppin P, Hennekens S M, Schaminée J H J, Somers B, Honnay O. Plant species diversity mediates ecosystem stability of natural dune grasslands in response to drought. Ecosystems, 2015, 18(8): 1383-1394.
- [3] 第二届植物学名词审定委员会. 植物学名词(第二版). 北京: 科学出版社, 2019.
- [4] Moreira C P, Bertini S C B, Ferreira A S, Azevedo L C B. Biochemical activity and microbial biomass in wetlands (Vereda) and well-drained soils under native vegetation types in Brazilian Cerrado. Applied Soil Ecology, 2021, 160: 103840.
- [5] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [6] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 赵学勇, 秦彧. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系. 冰川冻

- 土, 2014, 36(5): 1298-1305.
- [7] Berendse F, Van Ruijven J, Jongejans E, Keesstra S. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance. *Ecosystems*, 2015, 18(5): 881-888.
- [8] Naiman R J, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 621-658.
- [9] Garssen A G, Baattrup-Pedersen A, Voisenek L A C J, Verhoeven J T A, Soons M B. Riparian plant community responses to increased flooding: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2015, 21(8): 2881-2890.
- [10] 陆健健, 何文山, 童春富, 王伟. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] 张玉兰, 陈利军. 沙漠化逆转过程中土壤性状演变综述. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1440-1450.
- [12] 郭彦彪, 戴军, 冯宏, 卢瑛, 贾重建, 陈冲, 熊凡. 土壤质地三角图的规范制作及自动查询. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1221-1225.
- [13] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌. 土壤质地对坡地土壤水分运动与转化特征的影响研究. *灌溉排水学报*, 2008, 27(6): 27-30.
- [14] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [15] Tilman D, Reich P B, Isbell F. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): 10394-10397.
- [16] 岳广阳, 赵林, 赵拥华, 杜二计, 王琦, 王志伟, 乔永平. 青藏高原西大滩多年冻土活动层土壤性状与地表植被的关系. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 565-573.
- [17] 李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 高玉葆. 刈割、围封、放牧三种利用方式下草原生态系统的多功能性与植物物种多样性之间的关系. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 735-747.
- [18] 袁自强, 魏盼盼, 高本强, 张荣. 取样尺度对亚高寒草甸物种多样性与生产力关系的影响. *植物生态学报*, 2012, 36(12): 1248-1255.
- [19] Wright A J, Barry K E, Lortie C J, Callaway R M. Biodiversity and ecosystem functioning: have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? *Journal of Ecology*, 2021, 109(5): 1962-1968.
- [20] Schmidtko A, Rottstock T, Gaedke U, Fischer M. Plant community diversity and composition affect individual plant performance. *Oecologia*, 2010, 164(3): 665-677.
- [21] Fischer C, Tischer J, Roscher C, Eisenhauer N, Ravenek J, Gleixner G, Attinger S, Jensen B, De Kroon H, Mommer L, Scheu S, Hildebrandt A. Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties. *Plant and Soil*, 2015, 397(1/2): 1-16.
- [22] 翁昌露, 张田田, 巫东豪, 陈声文, 金毅, 任海保, 于明坚, 罗媛媛. 古田山 10 种主要森林群落类型的 α 和 β 多样性格局及影响因素. *生物多样性*, 2019, 27(1): 33-41.
- [23] 方文静, 蔡琼, 朱江玲, 吉成均, 岳明, 郭卫华, 张峰, 高贤明, 唐志尧, 方精云. 华北地区落叶松林的分布、群落结构和物种多样性. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 742-752.
- [24] 唐丽丽, 杨彤, 刘鸿雁, 康慕谊, 王仁卿, 张峰, 高贤明, 岳明, 张梅, 郑璞帆, 石福臣. 华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 825-833.
- [25] 单元琪, 姚允龙, 张欣欣, 张强. 三江平原七星河流域湿地植物多样性及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(5): 1629-1636.
- [26] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 周远刚. 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. *生态学报*, 2019, 39(11): 4116-4126.
- [27] 李群, 赵成章, 赵连春, 王建良, 张伟涛, 姚文秀. 秦王川盐沼湿地芦苇比叶面积与叶片热耗散的关联性分析. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 985-994.
- [28] 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.
- [29] 贺金生, 方精云, 马克平, 黄建辉. 生物多样性与生态系统生产力——为什么野外观测和受控实验结果不一致? *植物生态学报*, 2003, 27(6): 835-843.
- [30] 朱筱敏. 沉积岩石学(第四版). 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [31] 李平, 王冬梅, 丁聪, 刘若莎, 张鹏, 张琳琳. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(5): 1610-1620.
- [32] 李英年, 徐世晓, 赵亮, 张法伟. 青南退化高寒草甸植被土壤固碳潜力. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1157-1164.
- [33] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 55-60.
- [34] 冯刚, 张金龙, 裴男才, 饶米德, 米湘成, 任海保, 马克平. 系统发育 β 多样性指数的比较: 以古田山样地为例. *科学通报*, 2011, 56(34): 2857-2864.
- [35] 吴汉, 常凤琴, 张虎才, 李华勇, 蒙红卫, 段立曾, 刘东升, 李楠, 朱梦姝. 泸沽湖表层沉积物粒度空间分布特征及其影响因素. *沉积学报*, 2016, 34(4): 679-687.