

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.021

引用格式:王悦,苗志国,林涛,等.阿克苏河流域山前荒漠带植物群落分布格局及物种多样性研究[J].草地学报,2026,34(4):1376—1390

WANG Yue, MIAO Zhi-guo, LIN Tao, et al. Study on the Distribution Patten and Species Diversity of Plant Communities in the Piedmont Desert Zone in the Aksu River Basin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (4):1376—1390

阿克苏河流域山前荒漠带植物群落分布格局 及物种多样性研究

王悦^{1,2}, 苗志国^{3,4}, 林涛^{3,4*}, 程艳^{1,2}, 王显丽^{1,2}

(1. 新疆维吾尔自治区生态环境科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆环境污染监控与风险预警重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 自然资源部荒漠—绿洲生态监测与修复工程技术创新中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 新疆维吾尔自治区国土综合整治中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:为探究阿克苏河流域山水工程区内山前荒漠带植物群落分布格局及影响因素,以现场调查结果研究对象,运用 TWINSpan 法进行群落数量分类,通过 CCA 典范对应分析法筛选显著影响因子,利用结构方程模型探讨植物群落分布格局与环境因子相互作用关系。结果表明:TWINSpan 等级分类将 30 个调查样点划分为 6 种群丛类型。各群丛类型 Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数表现为群丛 II 和 III 最大,群丛 I 和 V 最小;Margalef 丰富度指数表现为群丛 II 最大,相比于群丛 V 显著高出 1.02 倍($P < 0.05$);Pielou 均匀度指数则表现为群丛 IV 最大,其分布较为均匀;各群丛类型相似性表现为群丛 I 和 II 最为相似,Jaccard's 指数和 Sorensen's 指数最大,分别为 0.478 和 0.393。CCA 排序结果表明,影响群丛分布格局的主要环境因子为多年平均降雨量、多年平均蒸发量、海拔高度、土壤有机质和土壤容重($P < 0.001$)。进一步分析环境因子与群丛分布格局的相互关系发现,由海拔高度和坡度构成的地形因素影响最大,总效应量为 0.852;通过显著影响多年平均降雨量、蒸发量和土壤有机质等气象和土壤因素,从而影响群丛空间分布格局。本研究为确定阿克苏河流域山水工程生态修复目标,植被选取及措施制定提供科学的理论依据和数据支撑。

关键词:阿克苏河流域;山水工程;物种多样性;分布格局;数量分类;排序分析;结构方程模型

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1376-15

Study on the Distribution Patten and Species Diversity of Plant Communities in the Piedmont Desert Zone in the Aksu River Basin

WANG Yue^{1,2}, MIAO Zhi-guo^{3,4}, LIN Tao^{3,4*}, CHENG Yan^{1,2}, WANG Xian-li^{1,2}

(1. Xinjiang Academy of Ecological and Environmental Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory for Environmental Pollution Monitoring and Risk Warning, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Technology Innovation Center for Ecological Monitoring and Restoration of Desert-Oasis, MNR, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 4. Xinjiang Comprehensive Land Consolidation and Rehabilitation Center, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: To explore the distribution pattern and influencing factors of plant communities in the desert zone of the Aksu River basin's landscape engineering area, this study used field survey results as the research object. The TWINSpan method was used for quantitative classification of communities, and the CCA (canonical correspondence analysis) method was employed to screen significant influencing factors. The structural equation modeling was used to investigate the interactive relationship between the distribution patterns of plant communities and environmental variables. The results showed that the TWINSpan hierarchical classification classified

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-08-18

基金项目:荒漠—绿洲生态监测与修复工程技术创新中心横向课题合作研究项目(2023KFKTA001)资助

作者简介:王悦(1994-),女,汉族,河南周口人,硕士研究生,工程师,主要从事环境污染控制与修复研究,E-mail:17699101157@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xjlintao@hotmail.com

the 30 survey locations into 6 association types. The Simpson and Shannon-Wiener diversity indices showed that association II and III had the highest values, while association I and V had the lowest. The Mrgalef richness index showed that association II had the highest value, which was significantly higher than association V by 1.02 times ($P < 0.05$). The Pielou index showed that association IV had the highest value, with relatively uniform distribution. The similarity of each community type was highest between association I and II, with the highest Jaccard's index and Sorensen's index values of 0.478 and 0.393. CCA ranking results indicated that the primary environmental factors influencing community distribution patterns were multi-year average precipitation, elevation, soil organic matter, and soil bulk density ($P < 0.001$). Further analysis of the interaction between environmental factors and association distribution patterns revealed that topographic factors, consisting of elevation and slope, had the greatest influence, with a total effect size of 0.852. These factors significantly influenced meteorological and soil factors such as annual average precipitation, evaporation, and soil organic matter, thereby influencing association spatial distribution patterns. This research provides a scientific theoretical foundation and empirical support for setting ecological restoration targets, vegetation selection, and measurement formulation for the Aksu River Basin landscape engineering project.

Key words: Aksu River basin; Mountain-water Project; Species diversity; Distribution pattern; Numerical classification; Ordination analysis; Structural equation modeling

植被作为陆地生态系统的主要组成部分,是反映区域和全球生态系统稳定性的重要指标^[1]。提高荒漠物种多样性可增强生态位互补效应,进而提升生态系统对环境胁迫的抵抗力。通过分析植物群落的物种组成与空间分布格局来揭示植物对环境资源的利用状况及其在群落中的功能地位^[2],阐明植物个体间复杂的互作关系,不仅是生态学与生态修复学的核心问题之一,也为解决相关科学问题提供了重要依据^[3-4]。荒漠生态系统是内陆干旱区特有的生态系统类型,既是天然绿洲和人工绿洲的缓冲区,又是人工绿洲与内陆沙漠的过渡带,由于气象、地形、土壤等环境因素的高度胁迫与影响,其植被群落呈现出高度复杂性和多样性特征,因而成为干旱区生态修复的关键区域。新疆塔里木河重要源流区(阿克苏河流域)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程(以下简称“阿克苏河流域山水工程”)是新疆首个、全国首批山水工程项目。工程范围内划分了四个生态保护修复功能区,分别为西天山南坡水源涵养与生物多样性保护区、山前荒漠草原水土流失防治区、阿克苏河绿洲生态安全维护区和塔河源河岸林保护及沙漠化防治区,而山前荒漠带分布面积较广,不仅分布于上述四个功能分区,还严重威胁着阿克苏河人工绿洲生态系统安全。因此,开展阿克苏河流域山水工程山前荒漠带植物群落分布格局及影响因素调查与分析,对工程范围内生态系统稳定和改善具有重要意义。

物种多样性是生物多样性在物种层面的体现,是衡量生物多样性的重要指标^[5]。它包含两方面:一是特定区域内所有物种的集合,从分类学、系统

学和生物地理学视角探讨该区域物种分布和构成,称区域物种多样性;二是生态学领域物种分布的均匀程度,从群落组织结构层面探讨,也叫生态多样性或群落多样性^[6]。总体而言,物种多样性包含物种总的多样性、物种的均匀度以及物种的丰富度。物种多样性体现了群落或生境内物种的数量、变化情况和分布均匀性,能够作为衡量群落和生态系统特性的量化指标^[7]。物种多样性是群落结构的物质基础,同时也受到群落结构的影响,其变化直接反映生态系统健康状况。通过调查发现,山前荒漠带植物种类稀少,群落结构简单,生物多样性、群落分布与环境因素内在联系非常复杂,通常采用统计学或计量学方法结合群落数据与关键环境因子进行系统整合分析^[8]。多元分析算法技术与数量分类、排序算法相结合^[9-10]不仅能够客观描述植物群落之间的生态关系,还可反映植物群落与环境因子间的响应关系^[11],已成为国内外学者深入研究物种多样性、植物群落与环境影响因子之间生态关系最普遍的方法^[12],目前群落数量分类主要有多元回归树分析(Multivariate regression trees, MRT)^[13]、双向指示种分析(Two-way indicators species analysis, TWINSpan)^[14]等聚类分析法。数量排序主要有除趋势对应分析法(Detrended correspondence analysis, DCA)、典范对应分析法(Canonical correspondence analysis, CCA)^[9]等方法。上述方法相结合能够客观描述植物群落之间的生态关系,并能准确反映群落分布与环境之间的响应关系。已有研究表明,植物群落的物种组成、分布特征及多样性与环境因子存在密切关联,在雅鲁藏布江^[14]和新疆

阿勒泰地区^[15]植物类型和群落分布受海拔影响显著,其次为气候条件与土壤因子等环境因素。随着研究的深入,利用排序分析与结构方程模型相结合的方法,能进一步准确反映群落分布与环境之间的响应关系^[16-17],土壤因子能够直接影响群落多样性,但是地形因子会改变土壤因子对群落多样性产生间接影响;土地利用变化、过度砍伐等人为因素和水文气象等自然因素会对群落生态系统产生直接影响,并通过中介效应间接影响群落分布格局,此类关系能够精确地揭示植物群丛分布格局与环境因子间的相互作用关系,在太原市西山矿区边坡^[18]与墨西哥马格达莱纳河流域^[19]均有相关研究。

干旱区水分条件是影响植被分布与变化最为敏感的生态因素,其微小变化均可引起植被特征的变化^[20-21];并且荒漠植被分布格局与气象、水文、地形、土壤等环境因素的相互关系十分复杂,系统性开展植被群落及其环境影响分析极为必要。现有针对新疆荒漠区植物群落及其影响因素的探究,主要集中于分析植被分布与地下水埋深^[22]、土壤盐渍化程度^[23]及养分含量^[24]等环境因子的关联性,然而,这些研究存在空间分布零散、研究尺度有限等问题,其环境因子和群落结构的匹配性不足,对群落特征的分析 and 认识具有片面性,并且关于阿克苏河流域山前荒漠带植物群落空间分布与环境影响因子关系的定量研究还较少。基于此,本研究以阿克苏河流域山水工程范围内的山前荒漠带为研究区,以现场调查采样资料为研究对象,采用双向指示种分析法^[25-26]揭示研究区荒漠植被群落种类组成、结构和地理分布,利用典范对应分析方法筛选显著影响因子,通过结构方程模型定量分析关键环境因子对植物群落分布格局的影响机制,揭示群落分布格局与环境因子间相互作用关系,从而为该区域退化生态系统的保护与修复提供科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿克苏河流域山水工程实施区位于新疆维吾尔自治区西南部,阿克苏地区西北部,地处天山山脉中段托木尔峰南坡,塔里木盆地北部边缘地带($78^{\circ}23' \sim 81^{\circ}58'E$, $40^{\circ}8' \sim 42^{\circ}5'N$),东西长约320 km,南北宽约216 km,总面积为360.23万 hm^2 。实施区内地势北高南低,北部多为山峰,南部毗邻塔克拉玛干沙漠,中部

为人工绿洲,而荒漠区基本分布在中间地带和沙漠边缘^[27];根据生态保护修复分区生境结构类型、空间分布和生态修复对象的不同,将其划分为西天山南坡-山地水源涵养与生物多样性保护、山前荒漠草原水土流失防治、阿克苏河绿洲生态安全维护、塔河源河岸林保护及沙漠化防治四个生态保护修复分区。

研究区位于阿克苏河流域山水工程实施区内的山前荒漠带,海拔高度为1026~2463 m,主要包含阿克苏市、乌什县、阿瓦提县和温宿县(图1)。该区夏季干旱少雨,水分蒸发性强,年降雨量变化范围在20~50 mm,年蒸发量范围2500~3000 mm,是降水量的50~150倍。该区植物普遍具有耐旱抗盐的生态适应性特征,所处生态系统稳定性较差^[4];优势种主要有芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、针茅(*Stipa capillata* L.)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、骆驼刺(*Alhagi camelorum* Fisch.)和苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)等^[28]。此外,该区土层结构均质深厚,地下水埋深较深,土壤水分补给能力较弱,土壤类型主要为碱化钙土和盐化草甸土^[4,29]。

1.2 野外调查取样

于2024年6—7月对阿克苏河流域山前荒漠带进行植被调查和土壤样品的采集工作。根据不同生态单元地形地貌、植被类型及其生境特征,结合样点均匀布设的原则,在研究区内共布设30个调查样点,每个样点设置1个25 m $\times$ 25 m的样方,用于调查乔木和灌木植物,在每个25 m $\times$ 25 m的样方内,设置3个1 m $\times$ 1 m的样方,用于调查草本植物。记录每个样方内物种的高度、盖度和密度等生态特征,并对所有物种进行准确的分类鉴定;利用手持北斗GPS测量仪记录每个样方的经纬度信息。此外,采用对角线取样法^[30],在每个样方内选取3个取样点,利用土钻采集0~30 cm土层土壤样品,去除表面凋落物及杂质后充分混匀,装入密封袋保存并送至实验室进行土壤理化性质分析;另外,采用环刀法采集土壤样品用于土壤容重的测定^[31]。野外取样调查点位描述见表1所示。

1.3 土壤、气象和地形因子数据获取

1.3.1 土壤因子 将每个样方采集的土壤样品带回实验室后进行自然风干处理,利用2 mm的土壤筛过滤石子和植物根系等杂物,过滤后进行研磨,

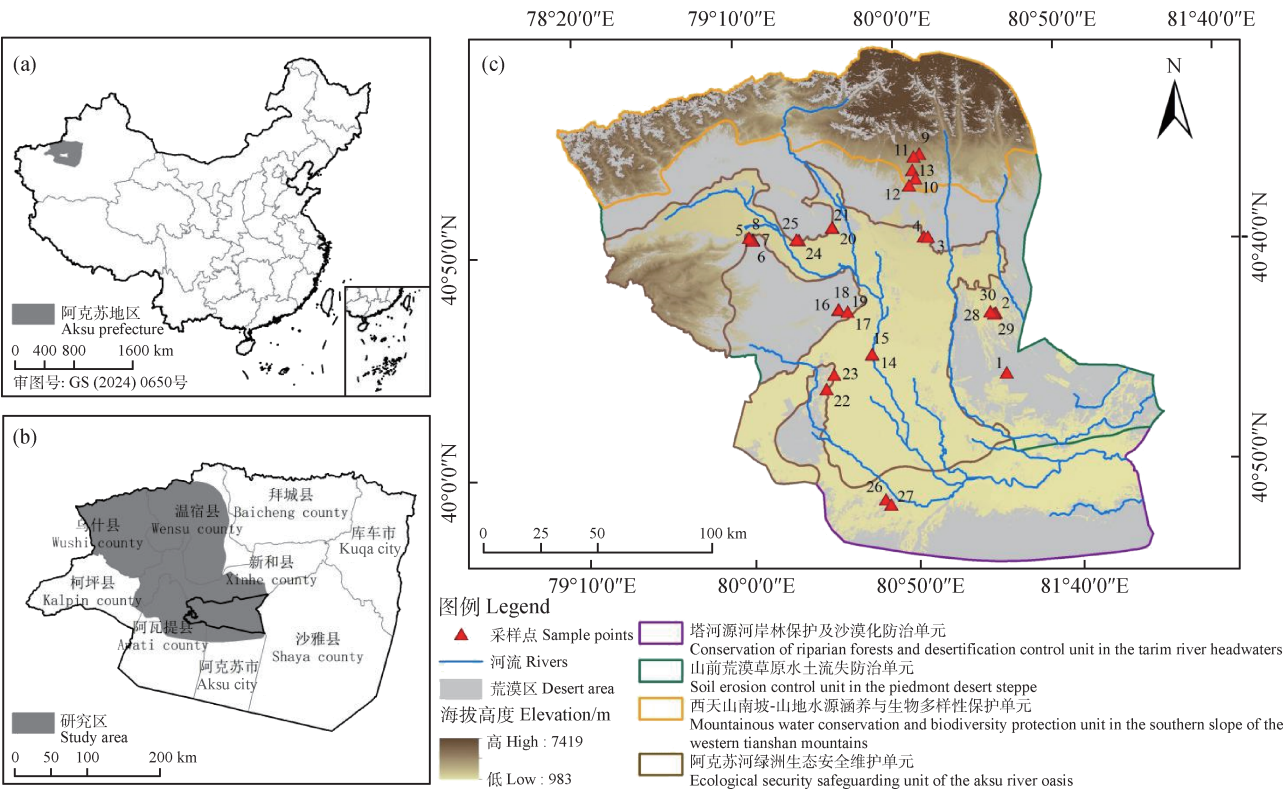


图 1 研究区样点分布示意图

Fig. 1 The distribution diagram of sample points in the study area

注: (a)阿克苏地区; (b)工程范围; (c)生态分区及采样点分布
Note: (a)Aksu Region; (b)Scope of work; (c)Ecological zoning and distribution of sampling points

表 1 调查样点描述

Table 1 Survey sample description

序号 Number	调查区 Survey area	经纬度范围 Latitude and longitude range	海拔范围 Altitude range/ m	植被类型 Vegetation types	样点数量 Number of samples	样点编号 Sample point number
1	阿克苏市 Aksu City	80°03'1.61"~81°02'31.07" 40°53'9.44"~41°12'6.52"	1056~1350	荒漠 Desert	8	1, 2, 14~19
2	温宿县 Wensu County	79°45'23.61"~80°54'26.55" 41°08'58.49"~41°43'49.74"	1090~2379	荒漠 Desert	14	3, 4, 9, 10~13, 20, 21, 24, 25, 28~30
3	阿瓦提县 Awati County	80°06'34.46"~80°37'3.69" 40°19'44.75"~40°48'54.87"	1030~1053	荒漠 Desert	4	19, 22, 23, 26, 27
4	乌什县 Wushi County	79°31'31.68"~79°32'59.05" 41°11'48.77"~41°12'11.94"	1251~1372	荒漠 Desert	4	5~8

研磨后过 1 mm 和 0.25 mm 的土壤筛,分别储存。土壤化学性质参考鲍士旦等^[32]土壤农化分析进行测定,其中土壤有机质含量利用重铬酸钾外加热法进行测定,全氮含量利用凯氏定氮仪进行测定,速效氮含量利用碱解扩散法测定,全磷含量利用碱熔融-钼锑抗比色法测定,有效磷含量利用碳酸氢钠浸提-硫酸钼锑抗比色法测定,全钾含量采用碱熔融-原子吸收火焰光度法测定,速效钾含量利用乙酸铵溶液浸提、火焰光度计法测定^[33],土壤 pH 值采用酸度计测定,土壤电导率值用水土比为 5:1 的提取液测

定。土壤质地测定采用密度计法测定,土壤含水量采用重量法测定,土壤容重利用环刀法取样的土壤,经称量后计算单位体积的烘干土样质量测定^[34]。
1.3.2 气象因子 本研究降雨量和蒸发量数据均来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),时间范围为 1901—2023 年,空间分辨率为 1 km×1 km^[35-36];利用 ArcGIS 中的掩膜提取(mask)-波段合成(Composite Bands)-像元统计(Cell Statistics)等工具进行处理^[37],最终得到研究区内各样点多年平均降雨量和多年平均蒸发量。

1.3.3 地形因子 本研究阿克苏地区DEM(Digital Elevation Model)数据由中国科学院新疆生态与地理研究所提供,空间分辨率为30 m×30 m;利用ArcGIS中坡度(Slope)和坡向(Aspect)工具进行计算,得到研究区内各样点坡度和坡向数据。

1.4 物种重要值及物种多样性计算

1.4.1 物种重要值计算 重要值(Important value, IV)是表征植物在群落中的功能地位和空间分布特征的重要指标,常用于评估物种在群落结构中的生态重要性,其具体计算公式如下:

$$IV = (C + P + H) / 3 \quad (1)$$

式中:IV为重要值,C为相对盖度,P为相对频度,H为相对高度^[4]。

1.4.2 物种多样性计算 植物群落物种多样性是表征群落内物种丰富程度的重要指标,通常采用 β -多样性和 α -多样性两个指标进行量化分析^[38]。其中, α -多样性能够表征植物群落的物种组成结构、物种在群落中是否均匀分布以及物种的丰富程度, β -多样性能够体现出两个样地或者群落共有物种与总物种的比例,比例值越小说明两个样地或者群落物种的竞争越大,群落越不稳定,本文采用以下指数来定量表示物种多样性。其中公式(2)~(6)为 α -多样性,公式(7)~(8)为 β -多样性。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$J = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (4)$$

$$P_i = N_i / N \quad (5)$$

$$D_{Ma} = (S - 1) / \ln N \quad (6)$$

式(2)~(6)中:D为Simpson优势度指数, H' 为Shannon-Wiener多样性指数,J为Pielou均匀度指数, D_{Ma} 为Margalf丰富度指数, P_i 为第*i*种植物个体数占总个体数比例,S为样方中的总物种数;N为样方中的总个体数; N_i 为第*i*种植物的个体数。

$$S_o = 2S_{12} / (2S_{12} + S_1 + S_2) \quad (7)$$

$$J_a = S_{12} / (S_1 + S_2 - S_{12}) \quad (8)$$

式(7)~(8)中: S_o 为Sorenson's相似性指数, J_a 为Jaccard's相似性指数, S_{12} 为2个群落都出现的物种数; S_1 和 S_2 分别为群落1和群落2中的物种数。

1.5 数据处理

利用Microsoft Excel 2021软件对野外调查数

据进行整理,得到物种-样点 38×30 矩阵,采用最大值标准化法对海拔高度、坡度和多年平均降雨量等环境数据进行处理,得到环境-样点 17×30 矩阵。运用WINTWINS 2.3软件^[39]对物种-样点矩阵进行双向指示种分析(TWINSPAN),根据迭代二分法分类原则,将所有样地和物种划分为两大组(0和1),随后对每个组别继续进行二次划分,通过这种层次聚类的方式逐步细化分类,直至达到预设的分类精度要求;物种选用的假种5级分别为:0~2,2~5,5~10,10~20和>20,选择最多划分水平为6,每次划分最多分类数为2^[40-41],最终划分出阿克苏河流域山前荒漠带各植物群丛类型;参考《中国植被》^[42]优势种命名法对各植物群丛进行命名。以各样点物种重要值作为响应变量,以海拔高度、坡度和多年平均降雨量等环境因子作为解释变量^[43],利用Canoco 5.0软件进行排序分析^[44],将物种-样点矩阵先进行DCA分析,根据DCA第一排序轴长度梯度值的大小选择适合的模型(当第1轴长度梯度值>4.0时,选择单峰模型;3.0~4.0,选择单峰和线性模型;若<3.0,则选线性模型);通过“前向选择”剔除解释变量中对响应变量影响较小的变量;运用蒙特卡罗置换检验法(Monte Carlo)对筛选后的解释变量进行显著性分析,从而确定影响植物群落分布格局的环境因子^[45];此外,利用R语言4.2.3中的piecewiseSEM包构建植物群落分布格局与环境因素复合变量的分段的结构方程模型,并计算直接效应、间接效应和总效应,进一步分析环境因子对植物群落分布格局的影响机制;另外,运用psych程序包对数据进行描述性统计分析;利用bartlett.test()函数分析各植物群丛间指标的差异性,利用“agricolae”包中LSD.test()函数进行多重比较,利用“ggplot2”包进行可视化^[46]。

2 结果与分析

2.1 群落数量分类

对阿克苏河流域山前荒漠带30个调查样点进行TWINSPAN等级分类,结果如图2所示。采用四级群丛水平的划分标准,将30个样点划分为7个组分,结合样点生境特征和野外实际调查情况,最终归并为6种群丛类型(图2)。

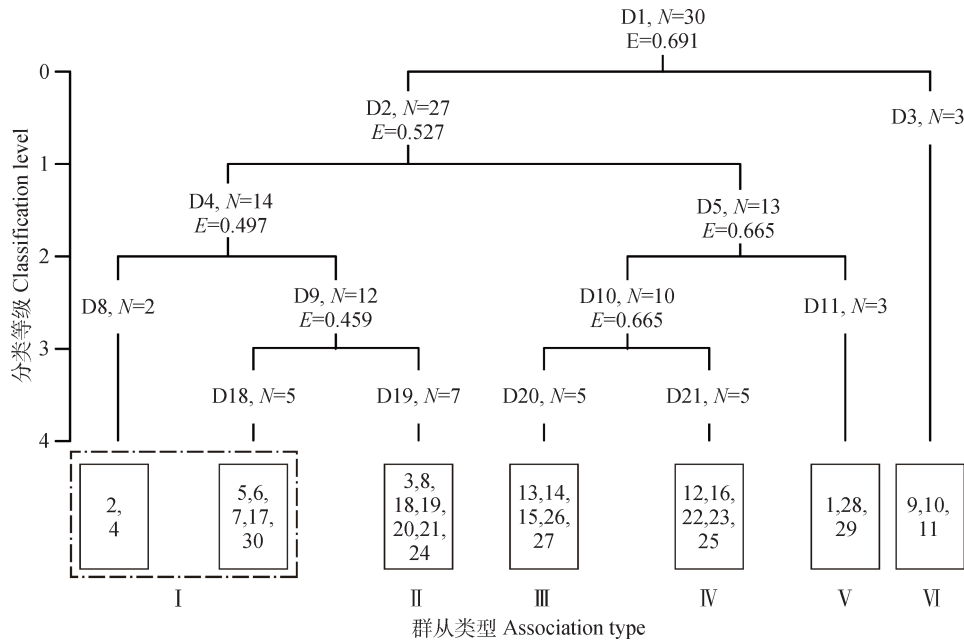


图2 阿克苏河流域山前荒漠带30个样点的TWINSpan树状分类结果

Fig. 2 TWINSpan tree classification results of 30 sampling points in the piedmont desert zone of Aksu River Basin

注: E代表特征值; N代表样点数量; D代表分类次数; 罗马数字代表各群丛类型

Note: E represents the eigenvalue; N represents the number of sample points; D represents the number of classifications; the Roman numerals represent the types of associations

通过群丛物种重要值大小确定各层优势种并对其进行命名,各群丛类型主要特征及分布情况(表2)如下:

类型 I: 芦苇-梭梭+多枝怪柳-骆驼蓬群丛(*Phragmites australis*—*Haloxylon ammodendron*+*Tamarix ramosissima*—*Peganum harmala*)。样点 2, 4~7, 17, 30, 分布于阿克苏市、乌什县和温宿县; 海拔高度为 1083.00~1372.33 m, 土壤质地为砂土和砂质壤土, 土壤呈碱性($7.5 < \text{pH}$ 值 < 8.5), 多年平均降雨量为 71.82~112.0 mm, 多年平均蒸发量为 935.24~1069.95 mm。灌木层优势种为梭梭, 次优种为多枝怪柳, 平均高度分别为 63.33 和 79.00 cm; 草本层优势种为芦苇, 次优种为骆驼蓬, 平均高度分别为 25.12 和 22.79 cm。群丛总盖度相差较大, 范围为 2.63%~20.65%, 平均盖度为 9.58%。

类型 II: 珍珠柴+刚毛怪柳-骆驼蓬群丛(*Caroxylon passerinum*+*Tamarix hispida*—*Peganum harmala*)。含样点 3, 8, 18~21, 24, 分布于阿克苏市、乌什县和温宿县; 海拔高度为 1082.67~1255.67 m, 土壤质地为砂质、粉砂质壤土和砂土, 土壤呈碱性($7.5 < \text{pH}$ 值 < 8.5), 多年平均降雨量为 71.47~117.99 mm, 多年平均蒸发量为 936.88~1028.24 mm。灌木层优势种为刚毛怪柳, 平均高度

为 68.20 cm; 草本层优势种为珍珠柴, 次优种为骆驼蓬, 平均高度分别为 4.77 和 24.06 cm, 群丛总盖度相差较大, 范围为 1.84%~70.17%, 平均盖度为 18.78%。

类型 III: 针茅+早熟禾-黑果枸杞-木贼群丛(*Stipa capillata*+*Poa annua*—*Lycium ruthenicum*—*Equisetum hyemale*)。含样点 13~15, 26, 27, 分布于阿克苏市、阿瓦提县和温宿县, 海拔高度为 1030.00~1643.00 m, 土壤质地为砂土和砂质壤土, 土壤呈强碱性($8.5 < \text{pH}$ 值 < 9.5), 多年平均降雨量为 47.06~154.46 mm, 多年平均蒸发量为 873.25~1139.66 mm。灌木层优势种为黑果枸杞, 平均高度为 40.38 cm; 草本层优势种为针茅, 次优种为早熟禾, 平均高度分别为 57.63 和 10.93 cm, 群丛总盖度相差较小, 范围为 23.09%~38.10%, 平均盖度为 30.68%。

类型 IV: 芦苇-骆驼刺+沙拐枣群丛(*Phragmites australis*—*Alhagi camelorum*+*Calligonum mongolicum*)。含样点 12, 16, 22, 23, 25, 分布于阿克苏市、阿瓦提县和温宿县, 海拔高度为 1040.33~1839.67 m, 土壤质地为砂质、粉砂质壤土和砂土, 土壤呈碱性($7.5 < \text{pH}$ 值 < 8.5), 多年平均降雨量为 68.86~172.05 mm, 多年平均蒸发量为 862.19~1073.67 mm。灌木层优势种为骆驼刺, 次优种为沙拐

枣,平均高度分别为 57.19 和 35.36 cm;草本层优势种为芦苇,平均高度为 88.77 cm,群丛总盖度相差较大,范围为 2.56%~41.65%,平均盖度为 13.36%。

类型 V:盐爪爪-胡杨群丛(*Kalidium foliatum*-*Populus euphratica*)。含样点 1,28,29,分布于阿克苏市和温宿县,海拔高度为 1032.67~1090.00 m,土壤质地为砂质、粉砂质壤土,土壤呈强碱性($8.5 < \text{pH 值} < 9.5$),多年平均降雨量为 72.15~82.25 mm,多年平均蒸发量为 1065.41~1070.32 mm。乔木层优势种为胡杨,平均高度为 878.89 cm;灌木层优势种为盐爪爪,平均高度为 40.67 cm,群丛总盖

度相差较大,范围为 28.42%~75.32%,平均盖度为 56.79%。

类型 VI:羊茅+砂珍棘豆群丛(*Festuca ovina*+*Oxytropis racemosa*)。含样点 9,10,11,分布于温宿县,海拔高度为 1848.00~2379.00 m,土壤质地为砂质壤土,土壤呈碱性($7.5 < \text{pH 值} < 8.5$),多年平均降雨量为 184.09~245.77 mm,多年平均蒸发量为 706.28~854.34 mm。该群丛优势种和次优种主要为草本植物,分别为羊茅和砂珍棘豆,平均高度分别为 4.09 和 4.75 cm;群丛总盖度相差较小,范围为 84.86%~96.43%,平均盖度为 90.58%。

表 2 阿克苏河流域山前荒漠带各群丛环境特征及分布情况

Table 2 The environmental characteristics and distribution of various associations in the piedmont desert zone of the Aksu River Basin

群丛类型 Association type	群丛名称 Association name	海拔高度 Elevation/m	多年平均降雨量 Annual average precipitation/ mm	多年平均年 蒸发量 Annual average evaporation/ mm	土壤酸碱度 Soil acidity and alkalinity	土壤有机质 Soil organic matter/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤容重 Soil bulk density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤质地 Soil texture	分布范围 Distribution
I	芦苇-梭梭+多枝怪柳-骆驼蓬群丛 <i>Phragmites australis</i> - <i>Haloxylon ammodendron</i> + <i>Tamarix ramosissima</i> - <i>Peganum harmala</i>	1083.00~1372.33	71.82~112.02	935.24~1069.95	8.11~8.63	3.30~15.63	1.36~1.59	砂质壤土,砂土 Sandy loam, Sandy soil	阿克苏市,乌什县,温 宿县 Aksu City, Wushi County, Wensu County
II	珍珠柴+刚毛怪柳-骆驼蓬群丛 <i>Caroxylon passerinum</i> + <i>Tamarix hispida</i> - <i>Peganum harmala</i>	1082.67~1255.67	71.47~117.99	936.88~1028.24	8.03~8.81	4.00~6.66	1.31~1.67	砂质、粉砂质壤土, 砂土 Sandy, Silty loam, Sandy soil	阿克苏市,乌什县,温 宿县 Aksu City, Wushi County, Wensu County
III	针茅+早熟禾-黑果枸杞-木贼群丛 <i>Stipa capillata</i> + <i>Poa annua</i> - <i>Lycium ruthenicum</i> - <i>Equisetum hyemale</i>	1030.00~1643.00	47.06~154.46	873.25~1139.66	8.03~9.09	6.10~20.6	1.30~1.35	砂质壤土,砂土 Sandy loam, Sandy soil	阿克苏市,阿瓦提县, 温宿县 Aksu City, Awati County, Wensu County
IV	芦苇-骆驼刺+沙拐枣群丛 <i>Phragmites australis</i> - <i>Alhagi camelorum</i> + <i>Calligonum mongolicum</i>	1040.33~1839.67	68.86~172.05	862.19~1073.67	7.97~8.84	1.76~24.45	1.27~1.58	砂质、粉砂质壤土, 砂土 Sandy, Silty loam, Sandy soil	阿克苏市,阿瓦提县, 温宿县 Aksu City, Awati County, Wensu County
V	盐爪爪-胡杨群丛 <i>Kalidium foliatum</i> - <i>Populus euphratica</i>	1032.67~1090.00	72.15~82.25	1065.41~1070.32	8.27~8.93	9.15~16.18	1.15~1.44	砂质、粉砂质壤土 Sandy, Silty loam,	阿克苏市,温宿县 Aksu City, Wensu County
VI	羊茅+砂珍棘豆群丛 <i>Festuca ovina</i> + <i>Oxytropis racemosa</i>	1848.00~2379.00	184.09~245.77	706.28~854.34	8.01~8.73	24.40~28.42	1.16~1.22	砂质壤土 Sandy loam	温宿县 Wensu County

2.2 群落多样性变化特征

各群丛类型 α -多样性指数变化特征如图 3 所示。由图可知,各群丛 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均表现出协同变化规律,四个指数整体均呈先上升后下降再上升的趋势。各群丛 Simpson 多样性指数大小排序为,群丛 III > 群丛 II > 群丛 VI > 群丛 IV > 群丛 I > 群丛 V,其中群丛 III 的 Simpson 多样

性指数最大,其值为 0.545,群丛 V 最小,群丛 III 比群丛 V 高出 85.11% (图 3a);各群丛 Shannon-Wiener 多样性指数大小排序为,群丛 II > 群丛 III > 群丛 VI > 群丛 IV > 群丛 I > 群丛 V,其中群丛 II 的 Shannon-Wiener 多样性指数最大,其值为 1.106,群丛 V 最小,其值为 0.460,群丛 II 比群丛 V 高出 1.4 倍(图 3b);各群丛 Pielou 均匀度指数大小排序为,群丛 IV >

群丛Ⅲ>群丛Ⅵ>群丛Ⅱ>群丛Ⅴ>群丛Ⅰ,其中群丛Ⅳ的Pielou均匀度指数最大,其值为0.769,群丛Ⅰ最小,其值为0.506,群丛Ⅳ比群丛Ⅰ高出51.98%(图3c);各群丛Margalef丰富度指数大小排

序为,群丛Ⅱ>群丛Ⅲ>群丛Ⅰ>群丛Ⅵ>群丛Ⅳ>群丛Ⅴ,其中群丛Ⅱ的Margalef丰富度指数最大,其值为1.077,群丛Ⅴ最小,其值为0.325,群丛Ⅱ比群丛Ⅴ显著高出2.3倍($P<0.05$)(图3d)。

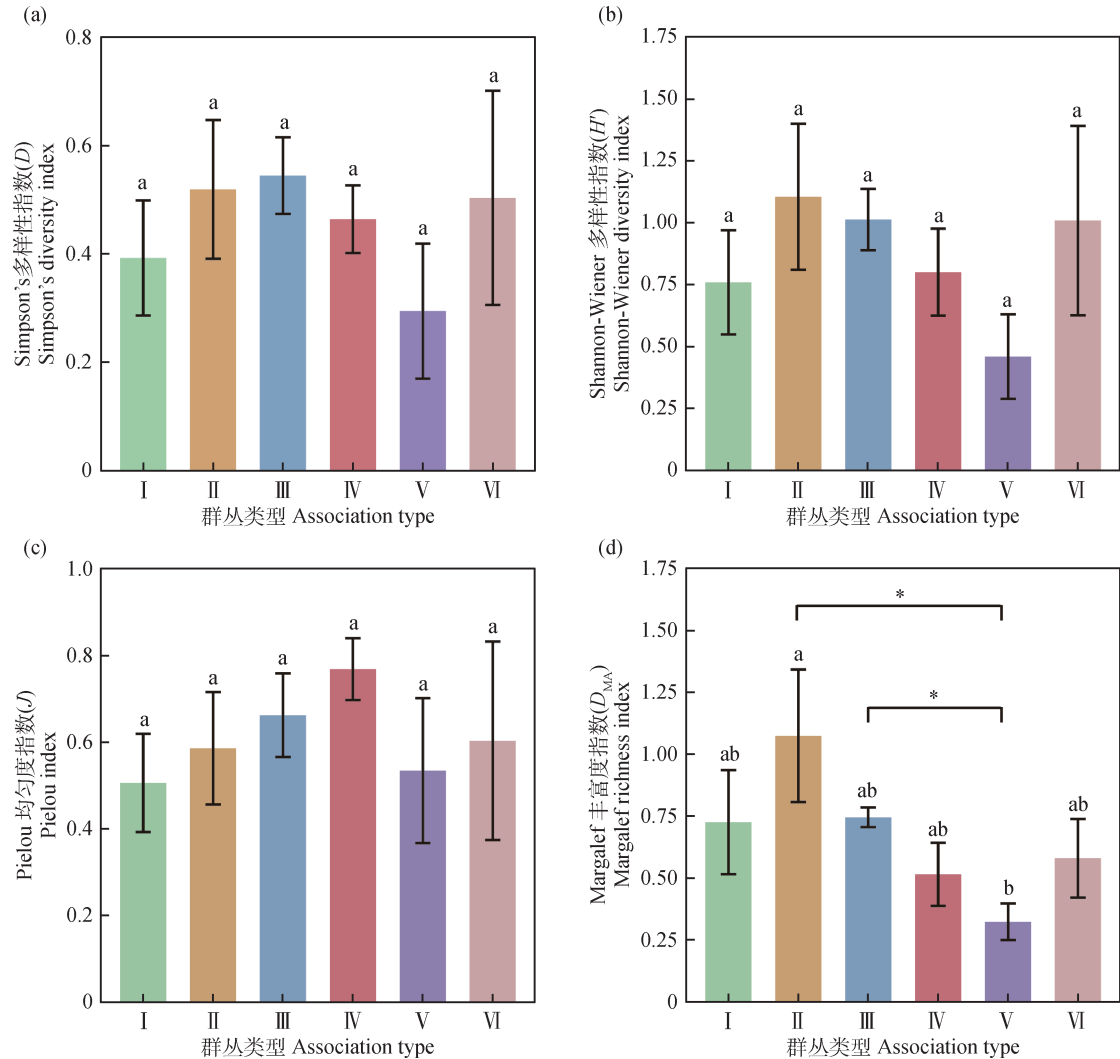


图3 阿克苏河流域山前荒漠带各群丛 α -多样性指数变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of α -diversity index of various associations in piedmont desert zone of Aksu River Basin

注:(a)各群丛Simpson多样性指数变化,(b)各群丛Shannon-Wiener多样性指数变化,(c)各群丛Pielou均匀度指数变化,(d)各群丛Margalef丰富度指数变化。罗马数字代表各群丛类型;不同小写字母表示各群丛间的差异性;*: $P<0.05$

Note: (a) Simpson diversity index of each cluster, (b) Shannon Wiener diversity index of each cluster, (c) Pielou index of each cluster, (d) Margalef richness index of each cluster. The Roman numerals represent the types of associations; Different lowercase letters represent the differences between clusters; *: $P<0.05$

表3和表4为各群丛类型 β -多样性分析结果。由表可知,Jaccard's相似性指数和Sorenson's相似性指数均表现为群丛Ⅰ和群丛Ⅱ最高,其值分别为0.478和0.393,其次为群丛Ⅰ和群丛Ⅲ,其值均为0.333,由此说明群丛Ⅰ和群丛Ⅱ所含相同植物种类最多,其分布情况较为相似,气象、地形和土壤环境等因子间差异

较小,群丛间物种竞争程度较低,群丛稳定性较高。而群丛Ⅴ和群丛Ⅵ的Jaccard's指数和Sorenson's指数最低,其值均为0,其原因是群丛Ⅴ和群丛Ⅵ所含相同植物种类几乎为0,两个群丛之间的海拔高度、年均降雨量、年均蒸发量和土壤酸碱度等环境因子相差较大,群丛间物种竞争程度较大,群丛稳定性较低。

表 3 阿克苏河流域山前荒漠带各群丛 Sorenson's 相似性指数比较

Table 3 Comparison of Sorenson's similarity index of different associations in piedmont desert belt of Aksu River Basin

Sorenson's 相似性 Sorenson's similarity	群丛 I Assoc. I	群丛 II Assoc. II	群丛 III Assoc. III	群丛 IV Assoc. IV	群丛 V Assoc. V
群丛 II Assoc. II	0.393				
群丛 III Assoc. III	0.333	0.321			
群丛 IV Assoc. IV	0.200	0.250	0.300		
群丛 V Assoc. V	0.182	0.200	0.154	0.222	
群丛 VI Assoc. VI	0.138	0.162	0.216	0.160	0.000

表 4 阿克苏河流域山前荒漠带各群丛 Jaccard's 相似性指数比较

Table 4 Comparison of Jaccard's similarity index of each association in the piedmont desert zone of Aksu River Basin

Jaccard's 相似性 Jaccard's similarity	群丛 I Assoc. I	群丛 II Assoc. II	群丛 III Assoc. III	群丛 IV Assoc. IV	群丛 V Assoc. V
群丛 II Assoc. II	0.478				
群丛 III Assoc. III	0.333	0.310			
群丛 IV Assoc. IV	0.143	0.200	0.273		
群丛 V Assoc. V	0.125	0.143	0.100	0.167	
群丛 VI Assoc. VI	0.087	0.107	0.160	0.105	0.000

2.3 群落分布格局与环境因子间关系

阿克苏河流域山前荒漠带 30 个样点的物种-样点矩阵 DCA 排序结果表明,第一排序轴长度梯度值为 6.33(>4),故选用单峰模型的 CCA 排序法进行分析;CCA 排序分析前四轴的特征值分别为 0.687,0.520,0.409 和 0.310,其中前两轴特征值最

大,所包含的信息最多,故采用前两轴做二维排序图(图 4)。

表 5 为环境因子与前四个排序轴的相关性分析结果。由表可知,CCA 排序分析中蒙特卡洛检验(Monte Carlo Permutation test)显示,所有典范轴均达到显著水平($P<0.002$);第一排序轴与海拔高度、

表 5 环境因子与前 4 个排序轴的相关性分析及贡献率比较

Table 5 Correlation analysis and contribution rate comparison between environmental factors and the top four ordination axes

环境因子 Environmental factors	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第三轴 Axis 3	第四轴 Axis 4	贡献率 Contribution/%	P 值 P value
海拔高度 ALT	0.851***	0.210	-0.225	-0.040	9.5	0.001
坡度 Slope	0.559***	-0.180	-0.177	-0.004	6.0	0.010
坡向 Aspect	0.242	-0.212	0.072	0.097	3.4	0.495
多年平均降雨量 MAP	0.848***	0.184	-0.296*	-0.146	9.6	0.001
多年平均蒸发量 MAE	-0.814***	-0.081	0.230	0.271	8.9	0.001
土壤酸碱度 pH	-0.044	0.277	0.405*	-0.312*	3.4	0.491
土壤电导率 EC	-0.231	0.173	-0.008	-0.043	4.3	0.211
速效氮 AT	-0.058	0.405*	-0.036	0.085	3.4	0.459
速效钾 AK	-0.110	0.858***	0.037	-0.080	7.4	0.003
速效磷 AP	-0.147	0.019	0.005	0.004	1.5	0.955
土壤容重 BD	-0.567***	-0.492**	-0.178	-0.055	7.4	0.001
土壤含水量 SMC	0.208	0.395*	-0.148	0.212	4.8	0.049
土壤有机质 SOM	0.792***	0.363*	0.028	0.042	9.2	0.001
特征值 Eigenvalue	0.687	0.520	0.409	0.310	—	—
物种与环境相关系数 Species environment correlations	0.974	0.949	0.913	0.917	—	—
物种与环境关系方差解释的累计比例 Cumulative proportion of variance interpretation of species-environment relationship / %	19.790	34.780	46.570	55.500	—	—
置换检验 Permutation test	$P<0.002$				—	—

注:ALT,海拔;Slope,坡度;Aspect,坡向;MAP,年平均降雨量;MAE,年平均蒸发量;pH,土壤酸碱度;EC,土壤电导率;AT,速效氮;AK,速效钾;AP,速效磷;BD,土壤容重;SMC,土壤含水量;SOM,土壤有机质;*, $P<0.05$;**, $P<0.01$ ***, $P<0.001$

Note: ALT, altitude; Slope, slope; Aspect, aspect; MAP, multi-year average precipitation; MAE, multi-year average evaporation; pH, soil pH; EC, soil conductivity; AT, available nitrogen; AK, available potassium; AP, available phosphorus; BD, soil bulk density; SMC, soil moisture content; SOM, soil organic matter; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$

坡度、多年平均降雨量和土壤有机质呈极显著正相关关系($P<0.001$),而与多年平均蒸发量和土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.001$),其中海拔高度、多年平均降雨量和多年平均蒸发量对群丛分布具有较高的相关性,其相关性系数分别为0.851、0.848和-0.814;第二排序轴与速效钾呈极显著正相关关系($P<0.001$),与速效氮、土壤含水量和土壤有机质呈显著正相关关系($P<0.05$),而与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$),其中速效钾和土壤容重对群丛分布具有较高的相关性,其相关性系数分别为0.858和-0.492;第三排序轴与土壤酸碱度呈显著正相关关系($P<0.05$),而与多年平均降雨量呈显著负

相关关系($P<0.05$),其相关性系数为0.405和-0.296;第四排序轴与土壤酸碱度呈显著负相关关系($P<0.01$),其相关性系数为-0.312。根据环境因子与前四个排序轴的显著性检验可知,各环境因子对群丛分布格局的贡献率由大到小排序依次为,多年平均降雨量>海拔高度>土壤有机质>多年平均蒸发量>速效钾、土壤容重>坡度>土壤含水量>土壤电导率>坡向、土壤酸碱度、速效氮>速效磷,其中多年平均降雨量、海拔高度、土壤有机质、多年平均蒸发量、速效钾、土壤容重、坡度、土壤含水量对群丛分布起显著作用;而土壤电导率、坡向、土壤酸碱度、速效氮和速效磷则对群丛分布无显著影响(图4)。

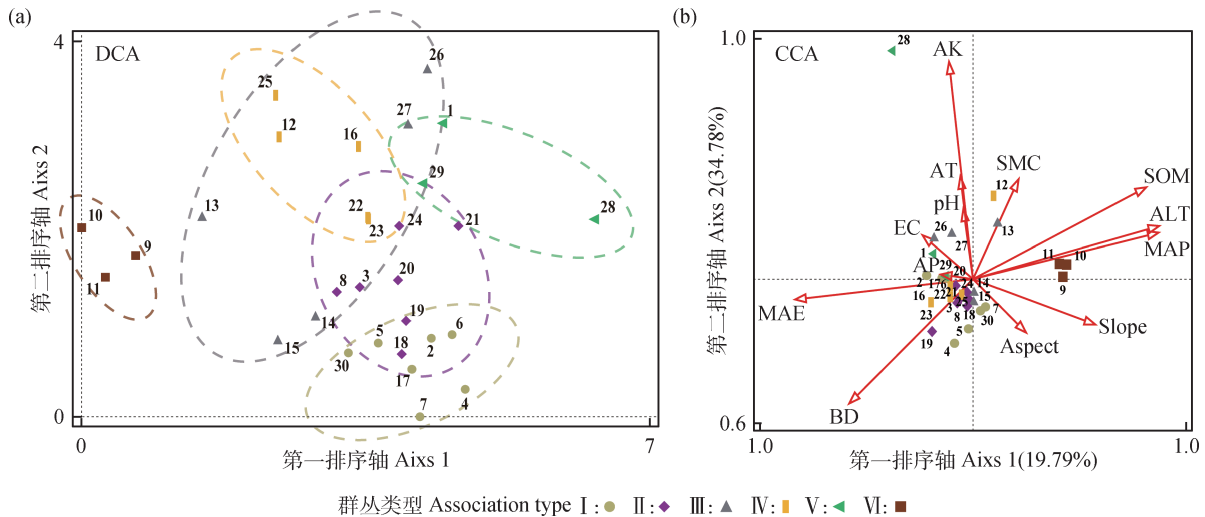


图4 各群丛类型DCA和CCA二维排序图

Fig. 4 Two-dimensional ordination diagram of DCA and CCA of each association type

注:(a)DCA二维排序图,(b)CCA二维排序图。ALT,海拔;Slope,坡度;Aspect,坡向;MAP,多年平均降雨量;MAE,多年平均蒸发量;pH,土壤酸碱度;EC,土壤电导率;AT,速效氮;AK,速效钾;AP,速效磷;BD,土壤容重;SMC,土壤含水量;SOM,土壤有机质

Note: (a) DCA Two-Dimensional Ordination Diagram, (b) CCA Two-Dimensional Ordination Diagram. ALT, altitude; Slope, slope; Aspect, aspect; MAP, multi-year average precipitation; MAE, multi-year average evaporation; pH, soil pH; EC, soil conductivity; AT, available nitrogen; AK, available potassium; AP, available phosphorus; BD, soil bulk density; SMC, soil moisture content; SOM, soil organic matter

2.4 显著影响因子对群落分布格局的影响及其潜在调控路径

根据CCA排序分析结果中的显著影响因子,将海拔高度和坡度组合为地形因素,多年平均降雨量和蒸发量组合为气象因素,土壤速效钾、土壤容重、土壤含水量和土壤有机质组合作为土壤因素,以群丛样点在二维排序图中的坐标值表征其分布格局,构建群丛分布格局与环境因素复合变量的分段结构方程模型,结果如图5所示。由图可知,结构方程模型的综合拟合优度(Fisher's C)为2.95, P 值 >0.05 , χ^2/df 为0.85

接近1,由此说明模拟拟合较好;此外,环境因素复合变量解释了群丛分布格局85%的变异,气象因素和土壤因素对群丛分布格局的影响呈现出显著正效应($P<0.001$),其中,地形因素通过显著影响气象和土壤因素,进而间接影响群丛分布格局;而气象和土壤因素则对群丛分布格局均存在直接影响作用(图5a)。此外,群丛分布格局的标准化效应结果表明,地形因素对群丛空间分布格局影响的总效应最大,其值为0.852,其次为土壤因素,其值为0.534,而气象因素的总效应量最低,其值为0.354(图5b)。

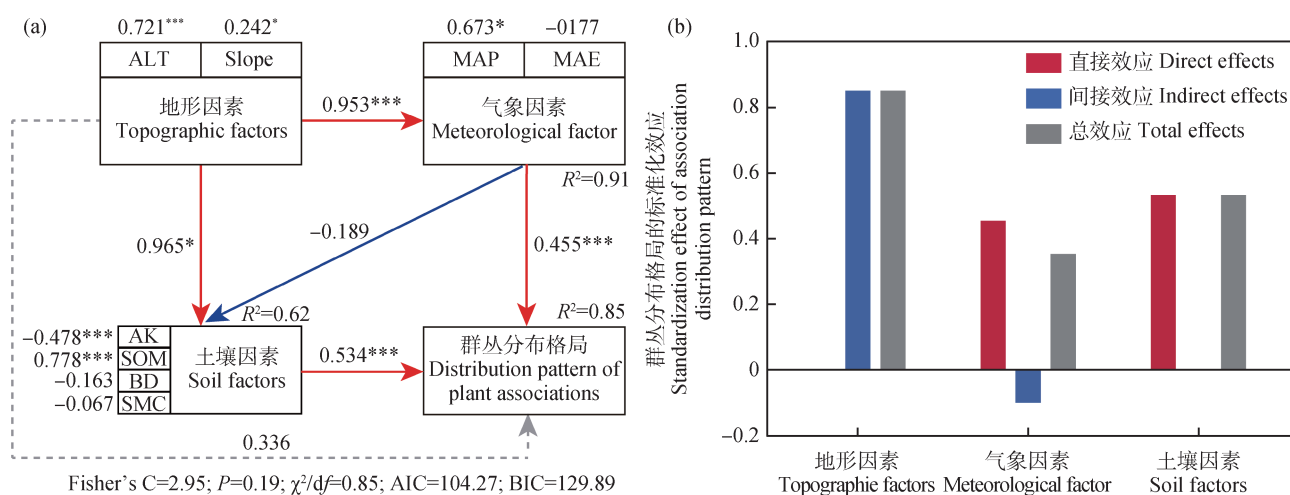


图5 环境因子复合变量与群丛分布格局的结构方程模型及标准化效应

Fig. 5 Structural equation model of composite environmental variables and association distribution pattern, and standardized effects
注: (a) 结构方程模型, (b) 标准化效应。红色实线表示显著正相关, 蓝色实线表示负相关, 灰色虚线表示无显著相关性 ($P > 0.05$); ALT: 海拔; Slope: 坡度; MAP: 多年平均降雨量; MAE: 多年平均蒸发量; AK: 速效钾; BD: 土壤容重; SMC: 土壤含水量; SOM: 土壤有机质; *, $P < 0.05$; ***, $P < 0.001$

Note: (a) Structural Equation Model, (b) Standardized Effect. The red solid line indicates a significant positive correlation, the blue solid line indicates a negative correlation, and the gray dotted line indicates no significant correlation ($P > 0.05$); ALT, altitude; Slope, slope; MAP, multi-year average precipitation; MAE, multi-year average evaporation; AK, available potassium; BD, soil bulk density; SMC, soil moisture content; SOM, soil organic matter; *, $P < 0.05$; ***, $P < 0.001$

3 讨论

植物群落之间的结构与功能存在较大差异, 这主要受组成物种不同的生态生物学特征的影响, 物种多样性指数能够反映群落组织水平, 可以更清晰系统地体现植物群落的生态特征。本研究利用 TWINSPLAN 分类与典范对应分析法, 结合阿克苏河流域山水工程区内山前荒漠带调查实际情况, 将该地区调查样地划分为 6 种植被群丛类型。根据物种多样性各指数分析结果, 群丛 I 和群丛 II 相似性最高, 优势种为芦苇、梭梭、珍珠柴、怪柳和骆驼蓬, 两个群丛植物物种主要为灌木或亚灌木, 其原因是两类群丛分布区域年均温度较高, 年均降雨量和年均蒸发量较小, 土壤有机质含量较低, 这两类群丛为典型荒漠植物群丛, 在研究区占有重要地位; 群丛 VI 整体与各群丛相似性最低, 其优势种主要为草本植物羊茅和砂珍珠豆等, 其原因为该群丛分布区域环境与其他群丛差异较大, 主要差异体现在海拔、降雨、蒸发量等。根据群丛 α -多样性变化特征分析可以看出, 6 个群丛类型各项指数存在差异, 这与李军玲等^[5]研究结果一致, 其结果表明, 各群丛物种种类、数量与其分布形式有关, 物种数量较多且聚集分布的群丛物种多样性指数与丰富度指数较大, 其次在群丛物种分布数量一定的情况下, 均匀度指数

仅与单个物种或生物量等指标在所有物种中分布的均衡程度有关, 即当群丛中优势种数量较少且其生态作用显著时, 均匀度指数较低。根据以上分析, 土壤环境、地形以及气候因素对物种多样性具有显著影响, 通过分析阿克苏河流域山前荒漠带各群丛分布及其环境变化可知, 群丛 V 位于低海拔强盐碱区域, 土壤盐分含量较高, 地表板结现象较为严重, 可选择种植盐爪爪、多枝怪柳和碱蓬等盐生植被进行修复; 此外, 群丛 I、II、III 和 IV 均位于中海拔干旱区域, 该区降雨稀少, 蒸发较为强烈, 该区可优先种植珍珠柴、梭梭和怪柳等优势种植物; 群丛 VI 处于高海拔湿润区域, 该区域土壤水分和养分含量较高, 但部分区域坡度较大, 易产生水土流失, 因而选择种植深根植物, 以起到固土作用。

CCA 排序分析结果表明, 多年平均降雨量、多年平均蒸发量、海拔高度、土壤有机质、速效钾和土壤容重等指标对植物群丛分布的影响较显著, 其中影响最大的因素为多年平均降雨量、海拔高度和土壤有机质。有研究^[47-48]表明, 降水充沛地区, 水分条件对植物生长和分布的影响较小, 但在荒漠区水分条件是限制植物生长的主要因素。郑东升等^[49]研究结果表明海拔高度的变化一定程度上会造成气候变化, 本研究结果也可以看出海拔高度与多年平均降雨量呈显著正相关, 与多年平均蒸发量呈显著

负相关;群丛VI以草本植物为主,而其他群丛植物类型主要为灌木与亚灌木,刘星宏等^[4]对塔里木河下游植物群落的研究结果表明水分条件是驱动群落分布的核心因子,在塔里木河下游,水分随河道距离增加而减少,喜湿的浅根系草本植物首先衰退,耐盐、抗旱的灌木植物多枝桤柳得到发展,周志强等^[20]对新疆奇台荒漠植物群落的研究表明,奇台荒漠中,降水梯度同样主导了从草原化荒漠到典型荒漠的植被过渡,本研究中阿克苏山前荒漠的水分梯度主要依赖海拔引起的降水差异,随着海拔升高,温度降低,降水逐渐增多,环境资源变得优越,群丛VI在高海拔湿润区的分布,本质上是植物对阿克苏河流域“高蒸发-强碱性”特殊胁迫的适应性响应,并形成独特的分布格局,说明湿润的环境可促进草本植物的生长,而以灌木和亚灌木植物为优势种的群丛更适合生长在气候较为干燥的环境,该结论也能够很好地解释干旱地区植物群落的分布规律。其次,土壤理化特性是决定植物群落分布格局的关键环境因子,秦朋遥等^[50]的研究指出土壤养分较高的区域主要分布着草本植物,而土壤养分含量适中或较少的区域主要分布着乔木和灌木植物。在本研究结果中,群丛VI与灌木或乔木为优势种的群丛相比具有较高的土壤养分含量。此外,土壤容重的大小会影响植物根系吸收水分的能力^[51]。周李磊等^[52]通过对新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析也发现,中温带荒漠类草地土壤容重较大,而高寒草甸类草地的容重较小。本研究结果也表明群丛VI的土壤容重值明显低于其他具有荒漠特征的植物群落,而单一的土壤容重指标不能作为植物群落的重要影响因子,容重不仅受自然因素影响,还受人为踩踏或放牧践踏等非自然因素的影响。

有学者认为,全钾、土壤pH值、速效氮、速效磷、全磷等环境因子对植物群落分布也存在显著影响^[53-55],本研究发现上述因子对山前荒漠带植物群落分布格局影响并不显著,可能是因为不同植物群落的物种组成存在差异,对自然资源利用的方式、能力以及对环境资源需求都有所不同,从而造成群落组成和分布对环境因子响应有所差异。另外,各环境因子之间相互作用很复杂,陈晓熹等^[55]指出生态环境中复杂多样的环境因子之间协同和拮抗作用会增强或减弱某些环境因子对植物的作用,而某些显著的影响因子会掩盖其他环境因子的影响。

本研究Monte Carlo检验结果表明,单一环境因子效应不能客观解释群落分布,物种受单个环境因子的影响较小。本研究结果表明,多年平均降雨量、多年平均蒸发量、海拔高度、坡度、土壤有机质、速效钾、土壤容重和土壤含水量等因子之间存在显著的相关性和相互影响,由海拔高度和坡向构成的地形因子对多年平均降雨量、多年平均蒸发量、土壤有机质、速效钾、土壤容重和土壤含水量所构成的气象因子和土壤因子均存在显著影响;由此说明,各环境因子之间所产生的耦合效应,能够进一步强化它们对植物群落分布的影响。通过典范对应分析法与结构方程模型相结合,其分析结果能够较好地反映植物群落与环境因子的关系,深入了解荒漠植物群落分布格局及优势种的生态适应性,根据方程结构模型,海拔对气象因素影响较大,海拔升高,气温降低,降水变多可使土壤水分增加,从而影响植物群落分布,而坡度因素能够改变土壤质地、有机质含量、水分条件等土壤环境因素^[5],例如坡度平缓有助于枯枝落叶的积聚,使坡面有机质含量富集,土壤质地变得优良,养分丰富,同时水分也较为充沛,这些因素共同作用促进植物的生长。各种因素直接或间接影响而导致不同区域的环境因素对植物群落影响机制有所不同,相比于大部分使用分类-排序相结合的方法^[14-15]来研究环境因子对群落影响,纳入结构方程模型能够更为精确地揭示植物群落分布格局与环境因子间的相互作用关系;此外,通过分析各因子对植物群落的直接和间接效应也能更清楚地反映植物群落的响应机制。该结果对确定阿克苏河流域山水工程生态修复目标、植被选取以及措施制定提供了重要的理论参考依据。

4 结论

本研究通过双向指示种分析方法和典范对应分析法对阿克苏河流域山前荒漠带植物群落进行数量分类和排序分析,利用结构方程模型深入探讨植物群落与环境因子的响应关系,可得到以下结论:

(1) TWINSpan将阿克苏河流域山前荒漠带植物划分为6种群丛类型:Ⅰ芦苇—梭梭—多枝桤柳—骆驼蓬群丛;Ⅱ珍珠柴—刚毛桤柳—骆驼蓬群丛;Ⅲ针茅—早熟禾—黑果枸杞—木贼群丛;Ⅳ芦苇—骆驼刺—沙拐枣群丛;Ⅴ盐爪爪—胡杨群丛;

VI 羊茅+砂珍棘豆群丛。

(2) 群落 α -多样性变化特征分析结果表明,多样性指数与丰富度指数最大的为群丛 II 和 III,最小为群丛 V,其大小与各群丛物种数有关。 β -多样性分析结果表明群丛 I 和群丛 II 相似性最高,两个群丛共同植物种类最多,群丛生境及其分布情况也最为相似。

(3) CCA 典范对应分析结果表明,海拔高度、坡度、多年平均降雨量、多年平均蒸发量、土壤有机质、速效钾、土壤容重和土壤含水量对群丛空间分布格局起显著作用;其中,由海拔高度和坡度组成的地形因子总效应量最高,通过显著影响多年平均降雨量、蒸发量和土壤有机质等气象和土壤因子,间接对群丛空间分布格局产生影响。

参考文献

- [1] 许丽,岳胜如,胡雪菲. 2000—2020年阿克苏河流域植被动态变化及驱动机制[J]. 水土保持通报,2024,44(1):326-334
XU L, YUE S R, HU X F. Dynamics changes and driving mechanisms of vegetation in Aksu River Basin from 2000 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1):326-334
- [2] 张庆,牛建明,BUYANTUYEV A,等. 内蒙古短花针茅群落数量分类及环境解释[J]. 草业学报,2012,21(1):83-92
ZHANG Q, NIU J M, ALEXANDER B, et al. Ecological analysis and classification of *Stipa breviflora* communities in the Inner Mongolia region: the role of environmental factors[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1):83-92
- [3] 李思阳,张娟,姚玲爱,等. 西枝江流域浮游植物群落结构特征与主要环境因子的关系研究[J]. 环境科学学报,2016,36(6):1939-1947
LI S Y, ZHANG J, YAO L A, et al. The community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Xizhijiang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6):1939-1947
- [4] 刘星宏,张青青,张广鹏,等. 塔里木河下游植物群落空间分布及影响因素分析[J]. 中国农业科技导报,2021,23(10):131-144
LIU X H, ZHANG Q Q, ZHANG G P, et al. Analysis of spatial distribution and influencing factors of plant communities in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10):131-144
- [5] 李军玲,张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(6):766-771
LI J L, ZHANG J. Plant species diversity in the middle part of the Taihang Mountain[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2006, 12(6):766-771
- [6] 陈廷贵,张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究 I. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(5):406-411
CHEN T G, ZHANG J T. Plant species diversity of Shenweigou in Guandi mountains (Shanxi, China) i. richness, evenness and diversity indexes[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2000, 6(5):406-411
- [7] 汪殿蓓,暨淑仪,陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. 生态学杂志,2001,20(4):55-60
WANG D P, JI S Y, CHEN F P. A review on the species diversity of plant community[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(4):55-60
- [8] 廉凯敏,吴应建,张丽,等. 太宽河自然保护区板栗群落数量分类与排序[J]. 生态学杂志,2015,34(1):33-39
LIAN K M, WU Y J, ZHANG L, et al. Numerical classification and ordination of wild *Castanea mollissima* communities in Taikuan River Nature Reserve, Shanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(1):33-39
- [9] 潘代远,孔令韶,金启宏. 新疆呼图壁盐化草甸群落的 DCA, CCA 及 DCCA 分析[J]. 植物生态学报,1995,19(2):115-127
PAN D Y, KONG L S, JIN Q H. DCA, CCA and DCCA ordination analysis of salty meadow community in Hutubi, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1995, 19(2):115-127
- [10] HILL T R. Description, classification and ordination of the dominant vegetation communities, Cathedral Peak, KwaZulu-Natal Drakensberg[J]. South African Journal of Botany, 1996, 62(5):263-269
- [11] ANAND M, ORLÓCI L. Complexity in plant communities: the notion and quantification[J]. Journal of Theoretical Biology, 1996, 179(2):179-186
- [12] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1995:139-159
ZHANG J T. Methods of quantitative vegetation ecology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995:139-159
- [13] TREMBLAY M, KAMMER M, LANGE H, et al. Prediction model optimization using full model selection with regression trees demonstrated with FTIR data from bovine milk[J]. Preventive Veterinary Medicine, 2019, 163:14-23
- [14] 杨小菊,强巴克珠,韩彦刚,等. 雅鲁藏布江中游河谷植物群落数量分类与排序[J]. 草地学报,2024,32(9):2784-2793
YANG X J, QIANG B, HAN Y G, et al. Quantitative classification and ordering of plant communities in the middle Yarlung Tsangpo River valley[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2784-2793
- [15] 苏金娟,刘永萍,刘丽燕,等. 新疆阿勒泰地区典型植物群落数量分类与排序分析[J]. 草业学报,2023,32(9):50-67
SU J J, LIU Y P, LIU L Y, et al. Quantitative classification and ordination analysis of typical plant communities in Altay Prefecture of Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9):50-67
- [16] GRACE J B, ANDERSON T M, OLFF H, et al. On the specification of structural equation models for ecological systems[J]. Ecological Monographs, 2010, 80(1):67-87
- [17] PAUL W L, ANDERSON M J. Causal modeling with multi-

- variate species data[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 448: 72-84
- [18] 乔欧盟, 陈璋. 矿区不同类型生态护坡工程植物多样性对环境因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 742-748
QIAO O M, CHEN Z. Plant diversity on different types of slope ecological engineering and its responses to environmental factors in mining areas[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 742-748
- [19] SANTIBANEZ A G, CASTILLO A S, VEGA P E V, et al. Structural equation modeling as a tool to develop conservation strategies using environmental indicators: The case of the forests of the Magdalena river basin in Mexico City[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 54(7): 124-136
- [20] 周志强, 魏晓雪, 刘彤. 新疆奇台荒漠植物群落的数量分类及土壤环境解释[J]. *生物多样性*, 2007, 15(3): 264-270
ZHOU Z Q, WEI X X, LIU T. The numerical classification of desert vegetation and soil interpretation in Qitai County, Xinjiang[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 264-270
- [21] TONGWAY J D, LUDWIG A J. Small-scale resource heterogeneity in semi-arid landscapes[J]. *Pacific Conservation Biology*, 1994, 1(3): 201-208
- [22] 易小波, 邵明安, 袁国富, 等. 塔里木河下游植被空间分布特征及其用水策略[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(5): 1-8
YI X B, SHAO M A, YUAN G F, et al. Spatial distribution of vegetation and its strategy in using water in the lower reaches of the Tarim River, western China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(5): 1-8
- [23] 杨红梅, 徐海量, 樊自立, 等. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 564-570
YANG H M, XU H L, FAN Z L, et al. Spatial variability and pattern of surface soil salinity in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(3): 564-570
- [24] 王振锡, 潘存德. 塔里木河下游荒漠-绿洲过渡带植物群落分布及其环境解释[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(3): 449-458
WANG Z X, PAN C D. Spatial distribution of vegetation community and environmental interpretations in desert-oasis ecotone in the lower reaches of Tarim River[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(3): 449-458
- [25] 刘万德, 丁易, 臧润国, 等. 海南岛霸王岭林区低海拔热带林群落数量分类与排序[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1526-1532
LIU W D, DING Y, ZANG R G, et al. Quantitative classification and ordination of low-altitudinal tropical forests in Bawangling, Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1526-1532
- [26] OLDELAND J, DORIGO W, LIECKFELD L, et al. Combining vegetation indices, constrained ordination and fuzzy classification for mapping semi-natural vegetation units from hyperspectral imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(6): 1155-1166
- [27] 方贺, 严佩文, 石见, 等. 阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(6): 1907-1916
FANG H, YAN P W, SHI J, et al. Temporal and spatial variation of vegetation ecological quality and its driving mechanism in Aksu prefecture[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6): 1907-1916
- [28] 张云玲, 李刚勇, 古丽给娜, 等. 石油开采区植被恢复的植物选择——以阿克苏平原砂砾质荒漠草场为例[J]. *中国畜牧业*, 2015(1): 54-56
ZHANG Y L, LI G Y, GULIGEINA, et al. Plant selection for vegetation restoration in oil exploitation areas—a case study of sandy-gravel desert grassland in aksu plain[J]. *China Animal Industry*, 2015(1): 54-56
- [29] 买吾鲁旦·阿布力克木. 塔里木河上游主要生态灾害时空分布特征及其变化趋势研究——阿克苏为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013: 11-14
MAIWULUDAN A. Spatial and temporal distribution characteristics of ecological hazards and its alleviation along the upper reaches of Tarim river—Case Study in Aksu[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013: 11-14
- [30] 聂明鹤, 沈艳, 饶丽仙. 宁夏典型草原区退耕草地群落演替序列与环境解释[J]. *草业学报*, 2018, 27(8): 11-20
NIE M H, SHEN Y, RAO L X. Quantitative classification and environmental interpretation of plant communities on the Ningxia typical steppe after 1-21 years of restoration[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8): 11-20
- [31] 周宸宇, 杨晓渊, 邵新庆, 等. 不同退化程度高寒草甸植物物种多样性与生态系统多功能性关系[J]. *草地学报*, 2022, 30(12): 3410-3422
ZHOU C Y, YANG X Y, SHAO X Q, et al. Relationship between plant species diversity and ecosystem multifunctionality in alpine meadow with different degradation degrees[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3410-3422
- [32] 鲍士旦, 秦怀英, 劳家桢. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 25-111
BAO S D, QIN H Y, LAO J C. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: Agricultural Press, 1988: 25-111
- [33] 廖竞业, 张威伦, 陈家裕, 等. 不同混交模式对红椎与杉木生长和生理特性的影响[J]. *林业科技情报*, 2023, 55(4): 4-6
LIAO J Y, ZHANG W L, CHEN J Y, et al. Effects of different mixed patterns on the growth and physiological characteristics of red vertex and Chinese Pir[J]. *Forestry Science and Technology Information*, 2023, 55(4): 4-6
- [34] 王岩, 李秀萍, 王盛男, 等. 不同类型草原土壤养分特征的监测与评价[J]. *草学*, 2023(1): 45-50, 56
WANG Y, LI X P, WANG S N, et al. Monitoring and evaluation of soil nutrient characteristics in different types of grassland[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2023(1): 45-50, 56
- [35] DING Y, PENG S. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100[J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477
- [36] PENG S, DING Y, WEN Z, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2017, 233: 183-194

- [37] 孟庆春. 多时相遥感数据支持下的历史时期土法炼焦污染源变化研究[D]. 太谷:山西农业大学, 2013:14-17
- MENG Q C. Study by multi-temporal remote sensing technology on the change of pollution source of indigenous coke-making in historical period[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013:14-17
- [38] 张元明, 陈亚宁, 张道远. 塔里木河中游植物群落与环境因子的关系[J]. 地理学报, 2003, 58(1):109-118
- ZHANG Y M, CHEN Y N, ZHANG D Y. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the middle reaches of the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(1):109-118
- [39] VAN KLEEF H H, VERBERK W C E P, LEUVEN R S E W, et al. Biological traits successfully predict the effects of restoration management on macroinvertebrates in shallow softwater lakes[J]. Hydrobiologia, 2006, 565(1):210-216
- [40] HILL M O, ŠMILAUER P. WinTWINS[J]. TWINSpan for Windows Version, 2005, 2:1-29
- [41] PETRI P, WILD J. Environmental correlates of the patterns of plant distribution at the meso-scale: a case study from Northern Bohemia (Czech Republic)[J]. Preslia, 2006, 78:211-234
- [42] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京:科学出版社, 1980:143-149
- WU Z Y. Vegetation of China[M]. Beijing: Science Press, 1980:143-149
- [43] 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 等. 添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5672-5679
- BAI J, LI Y F, LIU S L, et al. Effect of phosphorus addition on the abundance of autotrophic CO₂-fixation microorganisms in rhizospheric soil from a phosphorus-limited paddy field[J]. Environmental Science, 2018, 39(12):5672-5679
- [44] 姜海霞, 郭东昌, 刘曼红, 等. 中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区大型底栖动物多样性和生态位研究[J]. 湿地科学, 2024, 22(4):508-517
- JIANG H X, GUO D C, LIU M H, et al. Diversity of macroinvertebrates and ecological niche in Zhongyangzhan black-billed capercaillie national nature reserve[J]. Wetland Science, 2024, 22(4):508-517
- [45] BRINK P J V D, BRINK N W V D, BRAAK C J F T. Multivariate analysis of ecotoxicological data using ordination: demonstrations of utility on the basis of various examples[J]. Australasian Journal of Ecotoxicology, 2003, 9(2):141-156
- [46] KALVĪTE Z, LĪBIETE Z, KLĀVIŅŠ I, et al. The impact of beaver dam removal on the chemical properties of water in drainage ditches in peatland forests[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2021, 36(1):1-14
- [47] 杨晓渊, 马丽, 张中华, 等. 高寒草甸植物群落生长发育特征与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(9):3689-3700
- YANG X Y, MA L, ZHANG Z H, et al. Relationship between the characteristics of plant community growth and climate factors in alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9):3689-3700
- [48] 贾子金, 胡艳宇, 霍光伟, 等. 呼伦贝尔典型草原主要气象因子变化与群落多样性特征研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13):235-237
- JIA Z J, HU Y Y, HUO G W, et al. Analysis of the change of main meteorological factors and community diversity characteristics of typical steppe in Hulun Buir[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(13):235-237
- [49] 郑东升, 刘琪璟. 环境因子对长白山自然保护区森林群落分布的影响[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8):57-64
- ZHENG D S, LIU Q J. Effects of environmental factors on forest community distribution in Changbai Mountain Nature Reserve of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8):57-64
- [50] 秦朋遥, 杨会娟, 蒋凤玲, 等. 河北省塞罕坝保护区天然植物群落数量分类[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5):1383-1392
- QIN P Y, YANG H J, JIANG F L, et al. Quantitative classification of natural plant communities in the Saihanba National Nature Reserve, Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5):1383-1392
- [51] 鲁元波, 严成, 宋春武, 等. 天山南坡山前荒漠草地植物群落分布对环境因子的响应—以拜城县为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8):1346-1357
- LU Y B, YAN C, SONG C W, et al. Response of plant community distribution in the pre-montane desert grassland on the southern slope of Tianshan Mountain to environmental factors: A case study in Baicheng County[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8):1346-1357
- [52] 周李磊, 朱华忠, 钟华平, 等. 新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析[J]. 草业学报, 2016, 25(1):64-75
- ZHOU L L, ZHU H Z, ZHONG H P, et al. Spatial analysis of soil bulk density in Yili, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1):64-75
- [53] 唐敏忠, 张超, 汉瑞英, 等. 大源溪流域马尾松林群落类型划分及物种多样性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9):2381-2389
- TANG M Z, ZHANG C, HAN R Y, et al. Community type classification and species diversity of *Pinus massoniana* forest of Dayuan Creek[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(9):2381-2389
- [54] 薛鸥, 魏天兴, 朱金兆. 环境因子对北京低山区低效林下植被物种组成和丰富度的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9):2321-2328
- XUE O, WEI T X, ZHU J Z. Effects of environmental factors on the composition and richness of understory species in low-function forests in Beijing low mountain areas[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9):2321-2328
- [55] 陈晓熹, 杨新东, 曾献兴, 等. 环境因子对青云山自然保护区森林群落物种分布的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12):3642-3650
- CHEN X X, YANG X D, ZENG X X, et al. Influences of environmental factors on species distribution in forest community in Wengyuan Qingyunshan Nature Reserve, Guangdong[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(12):3642-3650