

甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带植被群落物种多样性及土壤水分变化特征

滕玉凤^{1,2}, 陈斌^{1,2}, 马剑^{1,2}, 钱万建^{1,2}, 李鸿儒^{1,2}, 李静^{1,2}, 韩廷寿^{1,2}

(1.张掖市林业科学研究院, 甘肃 张掖 734000; 2.张掖市林业科学研究院协同创新基地, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 探究甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带不同类型植被群落物种组成、多样性特征, 以及植物群落特征和土壤水分含量的关系, 为该区水土保持效益评估提供科学依据。[方法] 选择不同类型荒漠植被, 调查和测定了不同类型植被群落植物多样性和0—120 cm土壤水分含量。[结果] ①该区域共有6种植被类型, 植被结构非常简单, 物种组成以适于干旱荒漠生境的红砂、合头藜、珍珠猪毛菜、三芒草、雾冰藜等耐旱、超耐旱的小灌木、半灌木、草本植物为主, 植物群落为灌草群落类型, 物种多样性指数较小。②土壤水分在垂直方向上的变化呈现“双峰形”, 土壤湿度由表层向深层逐步升高, 到20—40 cm处升到“第一个峰值”, 40—60 cm处又降到了较低水平, 到60—120 cm土壤湿度又逐步上升, 直至120 cm处升高到“第二个峰值”。③各植物群落的植被高度、植被密度、植被盖度随土壤水分含量的升高而增高、增大, 植被高度与40—120 cm土层土壤水分呈显著正相关, 草本植物、灌木植物密度、植被盖度与其根系主要分布层的土壤水分含量呈显著正相关。[结论] 在0—20 cm表层土壤、40—80 cm深层土壤水分含量均不足2%的荒漠绿洲过渡带, 适宜种植红砂、合头藜、白刺等旱生灌木和三芒草、刺沙蓬、雾冰藜、画眉草、猪毛蒿等草本植物; 表层土壤、深层土壤水分含量均超过2%的荒漠地带, 适宜种植红砂、珍珠猪毛菜等旱生灌木和冷蒿、内蒙古旱蒿、寸草等草本植物, 能够有效促进生态恢复和重建。

关键词: 荒漠—绿洲过渡带; 土壤水分含量; 植被特征; 物种组成

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0045-10

中图分类号: S157.2

文献参数: 滕玉凤, 陈斌, 马剑, 等. 甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带植被群落物种多样性及土壤水分变化特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 45-54. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240711.001; Teng Yufeng, Chen Bin, Ma Jian, et al. Vegetation community species diversity and soil moisture variation characteristics in desert-oasis transition zone of Zhangye City, Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 45-54.

Vegetation Community Species Diversity and Soil Moisture Variation Characteristics in Desert-oasis Transition Zone of Zhangye City, Gansu Province

Teng Yufeng^{1,2}, Chen Bin^{1,2}, Ma Jian^{1,2}, Qian Wanjian^{1,2}, Li Hongru^{1,2}, Li Jing^{1,2}, Han Tingshou^{1,2}

(1. Zhangye Academy of Forestry, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Collaborative Innovation Base of Zhangye Academy of Forestry, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: [Objective] The species composition and diversity characteristics of different types of vegetation communities along with the correlation between plant community characteristics and soil moisture content in the Zhangye desert-oasis transition zone in Gansu Province were analysed, in order to provide a scientific basis for the evaluation of water and soil conservation benefits in the region. [Methods] Different types of desert vegetation were chosen, and the diversity of different types of vegetation community plants and soil moisture content at 0—120 cm were investigated and determined. [Results] ① There were six vegetation types in this area, and the vegetation structure was very simple, and the species composition was dominated by drought-tolerant and super-drought-tolerant small shrubs, semi-shrubs and herbs such as *Reaumuria*

收稿日期: 2023-10-31

修回日期: 2024-03-21

资助项目: 甘肃海智计划示范项目“河西走廊荒漠绿洲过渡带盐碱地形成机制及生态修复技术集成示范研究”(GSHZSF2024-05); 甘肃省林业和草原科技计划项目“黑河中游盐碱地植被的分布及萌发规律研究”(2018kj019); 张掖市科技计划项目“河西走廊中部人工林群落特征及植物多样性研究”(ZY2023RC11)

第一作者: 滕玉凤(1973—), 女(汉族), 甘肃省白银市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水土保持及荒漠化综合治理方面的研究。Email: lkytyf@126.com。

songarica, *Sympegma regelii*, *Salsola passerina*, *Aristida adscensionis*, and *Bassia dasyphylla* that were suitable for arid desert habitats. The plant community was a shrub and grass community with a relatively small species diversity index. ② The change of soil moisture in the vertical direction presented a “double peak”, and the soil humidity gradually increased from the surface layer to the deeper layers; it increased to the “first peak” at 20—40 cm, decreased to a lower level at 40—60 cm, and gradually increased at 60—120 cm, until to the “second peak” at 120 cm. ③ The vegetation height, density, and cover of each plant community increased with increasing soil moisture content. Vegetation height was significantly positively correlated with soil moisture in the soil layer of 40—120 cm, and the density and vegetation cover of herbaceous plants and shrubs were significantly positively correlated with soil moisture content in the layer where their root systems were mainly distributed. [Conclusion] In the desert oasis transition zone where the moisture content of the surface soil (0—20 cm) and deep soil (40—80 cm) was less than 2%, it is appropriate to plant arid shrubs such as *R. songarica*, *S. regelii*, *Nitraria tangutorum* and other herbaceous plants such as *A. adscensionis*, *Salsola tragus*, *B. dasyphylla*, *Eragrostis pilosa* and *Artemisia scoparia*. In the desert zones where the moisture content of the surface soil and the deep soil is more than 2%, it is appropriate to plant arid shrubs such as *R. songarica* and *S. passerina* and herbaceous plants such as *Artemisia frigida*, *Artemisia xerophytica*, and *Carex duriuscula*, which are capable of effectively promoting ecological recovery and reconstruction.

Keywords: desert-oasis transition zone; soil moisture content; vegetation characteristics; species composition

荒漠—绿洲过渡带是荒漠绿洲生态系统的重要组成部分,是绿洲生态系统和荒漠生态系统的连接地带,是两系统间物质循环、能量转换及信息传递的重要场所,对维持绿洲的稳定起到关键作用^[1],而过渡带土壤水分含量与植被之间的相互关系是研究荒漠—绿洲过渡带植被空间格局的重要问题^[2],过渡带土壤湿度和植被的相互关系一直受到人们重视^[1,3-7]。植被类型不同,构成的土壤—植被—大气系统的水分传输过程也不相同,土壤水分为植被提供一个适宜生长环境;相反,植被的生长对土壤水分又会产生积极或者消极的影响^[7-11]。在干旱半干旱地区,降水是主要的水分来源,直接影响着土壤的含水量^[11-15],土壤含水量又限制着该区域长期定居的植物的种类和数目^[15-16],土壤含水量的高低决定了过渡带的植被种类、群落构成及分布^[2,17-18]。植被的物种组成、结构和空间分布格局等方面的变化是对土壤水分过程长期适应的结果^[19]。在以往的研究中,对荒漠—绿洲过渡带的植物生长特性^[20]、植被分布格局^[1,21]、多样性特征^[14,22]、植物区系^[23]、土壤等^[24]方面进行过研究,然而有关甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带植被群落物种多样性及土壤水分变化特征方面的研究报道很少。为此,本研究尝试选择典型的黑河中游流域(张掖段)荒漠绿洲过渡带作为样区,定点调查不同深度土层土壤水分含量及地上植被状况,在较大的空间尺度上研究甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带不同区域植物群落物种组成、多样性、土壤水分变化特征,以及土壤水分与植被特征之间的关系,为这一地区植被

保护、生态修复与重建提供理论支持。

1 研究区概况

研究地点选在黑河中游甘肃省张掖市境内的荒漠绿洲过渡带,海拔介于 1 300~2 000 m。年平均降水量 50~150 mm,多集中于 7—9 月,约占全年 65%,年蒸发量高达 2 400 mm,空气相对湿度 46%;年平均气温 6~10 ℃,昼夜温差大,年日照时数 2 800~3 300 h,无霜期 140~160 d。风向以西北风为主,年平均风速为 3.2 m/s。气候属温带大陆性干旱荒漠气候,冬季严寒,夏季酷热,昼夜温差大,日照充足,降雨少、蒸发强烈,风大沙多,年均气温低。主要灾害性天气有干旱、晚霜冻、春寒、大风和沙尘暴等。地带性植被主要为中旱生、旱生和超旱生等灌木、草本植物,常见植物有珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)等。植被稀疏简单,群落组成贫乏,生态系统脆弱而易于破坏。土质以贫瘠的风沙土、灰棕荒漠土为主。

2 材料与方 法

2.1 样地调查

2023 年 6,8 和 10 月,采用典型抽样法在张掖境内高台县、临泽县、甘州区荒漠绿洲过渡带植被主要分布区内选取 6 个典型样地(表 1),在每个研究区内设置 1 000 m 长的样线,每 100 m 设置 50 m×50 m

的样地。每个样地内沿对角线设置 4 m×4 m 的灌木样方 3 个,在每个灌木样方内各设置 1 m×1 m 的草本样方 1 个,即草本样方 3 个,灌木样方、草本样方

各 180 个,分别记录各样地的海拔、经纬度、植被状况、人类活动等;调查各样方内植物的种类、数量、高度、冠幅、生活型、物候期、生境条件等。

表 1 调查样地基本信息

Table 1 Basic Information of survey plot

样地编号	经纬度	地形地势	主要植物		密度/ (株·hm ⁻²)	平均 株高/cm	平均 冠幅/cm	盖度/%
			灌木	草本				
I	38°42'0.905"N, 100°21'46.673"E	平地	珍珠猪毛菜、红砂	—	27 500	10.43	15.69	67.82
			—	寸草、独行菜	410 000	8.61	7.81	
II	39°03'44"N, 100°30'57"E	平地	红砂、鬼箭锦鸡儿	—	12 708	28.70	37.72	35.12
			—	三芒草、虎尾草	583 333	13.30	6.93	
III	39°24'7.005"N, 100°07'8.705"E	平地	红砂、白刺	—	13 333	40.75	39.25	79.14
			—	猪毛蒿、画眉草	116 666	18.17	14.58	
IV	39°22'59.056"N, 100°09'11.440"E	平地	白刺、沙拐枣	—	10 416	68.96	89.18	23.75
			—	雾冰藜、黄花蒿	170 000	33.76	17.25	
V	39°17'1.122"N, 99°46'12.064"E	平地	红砂、合头藜	—	23 958	29.29	38.74	19.60
			—	刺沙蓬、猪毛蒿	56 666	11.18	14.10	
VI	39°27'20.455"N, 99°45'18.865"E	平地	红砂、鬼箭锦鸡儿	—	8 541	31.29	38.88	25.00
			—	冷蒿、内蒙古旱蒿	373 333	25.36	8.93	

2.2 土壤水分测定

2023 年 6、8 和 10 月,按梅花状采样法在每个样地内随机选取 5 个点,采用土钻分层取样法分 7 个土层取样,在 0—20 cm 土层深度范围内,按 10 cm 间隔取土样;20—120 cm 深度范围内,按 20 cm 间隔采集土壤样品。每个样地 5 次重复。将土样装入铝盒中带回实验室,用烘干法(105 °C)^[25]测定各土层的土壤含水量,测定取各样地的平均值作为该研究区土壤含水量。

2.3 数据处理

2.3.1 重要值的计算(IV) 采用重要值(IV)来测度植物物种在群落中的优势度,灌木和草本的重要值采用计算公式^[26]:

$$IV = (\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$$

2.3.2 物种多样性测定方法^[27-31]

Margalef 物种丰富度指数(F)计算式为:

$$F = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

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

Pielou 均匀度指数(E):

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

Simpson 指数(D):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \quad (4)$$

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 = $\frac{n_i}{N}$ 。

2.4 数据分析

数据利用 Excel 软件统计分析野外调查数据,分别计算每种植物的重要值及各植物群落的多样性指数等。使用 SPASS 23.0 统计软件对土壤水分与植被盖度、植被高度等植被特征指标进行相关性分析与处理。采用 Origin 函数绘图软件绘图。

3 结果与分析

3.1 植物物种组成及重要值分析

从表 2 可以看出:① I 样地有灌木植物 2 种和草本植物 6 种,共 8 种,分属 7 科 8 属。其中,禾本科 2 属 2 种,藜科、柽柳科、莎草科、十字花科、蒺藜科、菊科各 1 属 1 种。植物物种的重要值反映着植物物种在群落中的优势度和作用,优势度越大,该物种在群落中的地位越重要,是植物群落的优势种。植物优势种决定着群落的外形、结构和功能^[32-33]。该样地中灌木植物珍珠猪毛菜重要值最大(74.84%),是灌木植物的优势种;草本植物寸草(*Carex duriuscula*)重要值最大(64.55%),是草本植物的优势种。按照优势种命名群落类型^[34]的方法,该地植物群落类型为珍珠猪毛菜—寸草群落。② II 样地有灌木植物 4 种和草本植物 6 种,共 10 种,分属 6 科 10 属。其中:禾本科 4 属 4 种,菊科 2 属 2 种,柽柳科、豆科、蒺藜科、藜科各 1 属 1 种。灌木植物优势种是红砂,其重要值为 43.1%;草本植物优势种是三芒草,其重要值为 42.88%,该地植物群落类型为红砂—三芒草群落。③ III 样地有灌木植物 4 种和草本植物 10 种,

共 14 种, 分属 8 科 14 属。其中: 藜科 3 属 3 种, 禾本科 2 属 2 种, 豆科 2 属 2 种, 菊科 2 属 2 种, 蒺藜科 2 属 2 种, 柽柳科、紫草科、白花丹科各 1 属 1 种。灌木植物优势种是红砂(重要值为 58.45%), 草本植物优势种是猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 和画眉草, 其重要值分别为: 27.95% 和 26.42%, 该地植物群落类型为红砂—猪毛蒿+画眉草群落。④ IV 样地有灌木植物 3 种和草本植物 6 种, 共 9 种, 分属 6 科 9 属。其中: 藜科 3 属 3 种, 菊科 2 属 2 种, 蒺藜科、蓼科、柽柳科、禾本科各 1 属 1 种。灌木植物优势种是白刺, 重要值为 66.94%; 草本植物优势种是雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 和黄花蒿 (*Artemisia annua*), 其重要值分别为: 44.07% 和 33.51%, 该地植物群落类型为白刺—雾冰藜+黄花蒿群落。⑤ V 样地有灌木植物 5 种和草本植物 9 种, 共 14 种, 分属

6 科 12 属。其中: 藜科 3 属 5 种, 菊科 3 属 3 种, 禾本科 3 属 3 种, 柽柳科、蒺藜科、萝藦科各 1 属 1 种。灌木植物优势种是红砂和合头藜 (*Sympegma regelii*), 其重要值分别为: 41.47% 和 27.95%; 草本植物优势种是刺沙蓬 (*Salsola tragus*) 和猪毛蒿, 其重要值分别为: 17.58% 和 15.57%, 该地植物群落类型为红砂+合头藜—刺沙蓬群落。⑥ VI 样地有灌木植物 5 种和草本植物 10 种, 共 15 种, 分属 8 科 13 属。其中: 菊科 3 属 5 种, 禾本科 4 属 4 种, 柽柳科、豆科、蒺藜科、麻黄科、紫草科、白花丹科各 1 属 1 种。灌木植物优势种是红砂(重要值为 33.36%), 草本植物优势种是冷蒿 (*Artemisia frigida*) 和内蒙古旱蒿 (*Artemisia xerophytica*), 其重要值分别为: 26.37% 和 24.39%, 该地植物群落类型为红砂—冷蒿+内蒙古旱蒿群落。

表 2 各样地植物群落物种组成及重要值

Table 2 Species composition and important values of plant communities in various plots

样地编号	植物群落	生活型	植物种	科属	相对密度/%	相对频度/%	相对盖度/%	重要值/%
I	珍珠猪毛菜— 寸草群落	灌木	珍珠猪毛菜	藜科猪毛菜属	84.09	50.00	90.42	74.84
			红砂	柽柳科红砂属	15.91	50.00	9.58	25.16
			寸草	莎草科藎草属	87.80	28.61	77.24	64.55
		草本	独行菜	十字花科独行菜属	4.87	14.30	7.14	8.77
			无芒隐子草	禾本科隐子草属	4.06	14.30	7.41	8.59
			骆驼蓬	蒺藜科骆驼蓬属	0.81	14.3	6.65	7.25
			虎尾草	禾本科虎尾草属	1.62	14.30	1.09	5.67
			碱蓬	藜科碱蓬属	0.81	14.30	0.39	5.17
			红砂	柽柳科红砂属	32.78	30.02	66.50	43.10
II	红砂— 三芒草群落	灌木	鬼箭锦鸡儿	豆科锦鸡儿属	45.90	30.03	14.08	30.00
			白刺	蒺藜科白刺属	19.67	30.03	18.44	22.71
			中亚紫菀木	菊科紫菀木属	1.63	10.01	0.91	4.19
			三芒草	禾本科三芒草属	49.71	16.67	62.26	42.88
		草本	虎尾草	禾本科虎尾草属	29.71	25.00	6.44	20.39
			长刺猪毛菜	藜科猪毛菜属	10.86	16.67	14.03	13.85
			戈壁针茅	禾本科针茅属	6.29	16.67	15.90	12.95
			蓝刺头	菊科蓝刺头属	1.14	16.67	1.20	6.34
			无芒隐子草	禾本科隐子草属	2.29	8.33	0.16	3.59
III	红砂—猪毛蒿+ 画眉草群落	灌木	红砂	柽柳科红砂属	74.60	42.80	57.95	58.45
			白刺	蒺藜科白刺属	22.22	28.60	18.01	22.94
			细枝岩黄耆	豆科岩黄耆属	1.59	14.30	23.06	12.98
			中亚紫菀木	菊科紫菀木属	1.59	14.30	0.98	5.62
			猪毛蒿	菊科蒿属	25.71	21.46	36.67	27.95
			画眉草	禾本科画眉草属	45.71	14.30	19.26	26.42
		草本	刺沙蓬	藜科猪毛菜属	5.71	14.30	11.7	10.57
			无芒隐子草	禾本科隐子草属	5.71	7.15	5.31	6.06
			小果黄耆	豆科黄耆属	2.85	7.15	7.77	5.92
			长刺猪毛菜	藜科猪毛菜属	2.85	7.15	7.66	5.89
			绳虫实	藜科虫实属	2.85	7.15	6.82	5.61
			斑种草	紫草科斑种草属	2.85	7.15	2.98	4.33
			黄花补血草	白花丹科补血草属	2.85	7.15	1.72	3.91
			驼蹄瓣	蒺藜科驼蹄瓣属	2.85	7.15	0.06	3.34

续表 2 (Continued table 2)

样地编号	植物群落	生活型	植物种	科属	相对密度/%	相对频度/%	相对盖度/%	重要值/%
IV	白刺—雾冰藜+黄花蒿群落	灌木	白刺	蒺藜科白刺属	79.98	42.90	77.93	66.94
			沙拐枣	蓼科沙拐枣属	17.98	42.9	21.97	27.62
			红砂	柽柳科红砂属	1.98	14.28	0.08	5.44
		草本	雾冰藜	藜科雾冰藜属	70.59	22.22	39.40	44.07
			黄花蒿	菊科蒿属	17.65	33.33	49.54	33.51
			画眉草	禾本科画眉草属	3.92	11.11	1.92	5.65
			沙蓬	藜科沙蓬属	1.96	11.11	3.87	5.65
			蓝刺头	菊科蓝刺头属	3.93	11.11	1.72	5.59
			刺沙蓬	藜科猪毛菜属	1.96	11.11	3.55	5.53
V	红砂+合头草—刺沙蓬群落	灌木	红砂	柽柳科红砂属	44.34	27.31	52.76	41.47
			合头藜	藜科合头藜属	26.07	27.31	30.46	27.95
			珍珠猪毛菜	藜科猪毛菜属	25.21	27.31	14.05	22.19
			白刺	蒺藜科白刺属	3.46	9.10	0.80	4.45
			中亚紫菀木	菊科紫菀木属	0.86	9.10	1.86	3.94
		草本	刺沙蓬	藜科猪毛菜属	11.77	16.67	24.31	17.58
			猪毛蒿	菊科蒿属	11.77	16.67	18.28	15.57
			无芒隐子草	禾本科隐子草属	17.65	16.67	7.00	13.77
			戟叶鹅绒藤	萝藦科鹅绒藤属	5.88	8.33	24.29	12.83
			戈壁针茅	禾本科针茅属	17.65	8.33	6.82	10.93
			虎尾草	禾本科虎尾草属	17.65	8.33	6.46	10.82
			蛛丝蓬	藜科盐生草属	5.88	8.33	7.65	7.29
			长刺猪毛菜	藜科猪毛菜属	5.88	8.33	3.57	5.93
蓝刺头	菊科蓝刺头属	5.88	8.33	1.62	5.28			
VI	红砂—冷蒿+内蒙古旱蒿群落	灌木	红砂	柽柳科红砂属	31.70	16.67	51.70	33.36
			鬼箭锦鸡儿	豆科锦鸡儿属	24.39	16.67	24.08	21.71
			白刺	蒺藜科白刺属	19.51	25.00	11.86	18.79
			中亚紫菀木	菊科紫菀木属	19.51	25.00	1.72	15.41
			膜果麻黄	麻黄科麻黄属	4.88	16.67	10.64	10.73
		草本	冷蒿	菊科蒿属	31.25	5.56	42.30	26.37
			内蒙古旱蒿	菊科蒿属	18.75	5.56	48.85	24.39
			猪毛蒿	菊科蒿属	29.46	16.67	4.32	16.82
			三芒草	禾本科三芒草属	9.82	11.11	2.77	7.9
			灰毛软紫草	紫草科软紫草属	2.68	16.67	0.06	6.47
			无芒隐子草	禾本科隐子草属	2.68	11.11	0.33	4.71
			蓝刺头	菊科蓝刺头属	1.79	11.11	0.05	4.32
			锋芒草	禾本科锋芒草属	1.79	11.11	0.01	4.30
			黄花补血草	白花丹科补血草属	0.89	5.56	0.87	2.44
戈壁针茅	禾本科针茅属	0.89	5.56	0.42	2.28			

注:无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、虎尾草(*Chloris virgate*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、中亚紫菀木(*Asterothamnus centraliasiaticus*)、长刺猪毛菜(*Salsola paulsenii*)、戈壁针茅(*Stipa tianschanica*)、蓝刺头(*Echinops sphaerocephalus*)、细枝岩黄耆(*Hedysarum scoparium*)、小果黄耆(*Astragalus zacharensis*)、绳虫实(*Corispermum declinatum*)、斑种草(*Bothriospermum chinense*)、黄花补血草(*Limonium aureum*)、驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、戟叶鹅绒藤(*Cynanchum acutum*)、蛛丝蓬(*Halogeton arachnoideus*)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、灰毛软紫草(*Arnebia fimbriata*)、锋芒草(*Tragus mongolorum*)。

3.2 不同类型植物群落特征

表 3 显示了研究区主要植物群落物种多样性特征。由于张掖市境内的荒漠绿洲过渡带生境条件特

殊,植被群落结构非常简单,植物物种比较贫乏且分布极不均匀,植被以适生于干旱荒漠生境的红砂、合头藜、珍珠猪毛菜、三芒草、雾冰藜、刺沙蓬等耐旱和

超耐旱的小灌木、半灌木、草本植物为主。由表 3 还可看出,研究区植物群落物种多样性指数均较小,在各植物群落中红砂+合头藜-刺沙蓬群落的 Margalef 物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数最大,分别为 2.181 8, 2.437 9 和 0.923 8, Simpson 生态优势度指数最小,为 0.093 4。在各植物群落中白刺-雾冰藜+黄花蒿群落 Simpson 生态优势度指数在各植物群落中最大,为 0.475 0, Margalef 物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数最小,分别为 1.182 8, 1.158 1, 0.527 1。说明研究区各植物群落中红砂+合头藜-刺沙蓬群落的物种多样性水平最高,白刺-雾冰藜+黄花蒿群落物种多样性水平最低。

通过对甘肃省张掖市荒漠-绿洲过渡带典型群

落植被盖度、高度和密度的研究发现,植被盖度、高度和密度分别为 19.6%~79.14%, 9.61~51.36 cm 和 8.06~59.27 株/m²。典型群落植被盖度顺序:红砂-猪毛蒿+画眉草群落>珍珠猪毛菜-一寸草群落>红砂-三芒草群落>红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落>白刺-雾冰藜+黄花蒿群落>红砂+合头藜-刺沙蓬群落。典型群落植被高度从大到小依次为:白刺-雾冰藜+黄花蒿群落>红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落>红砂-猪毛蒿+画眉草群落>红砂+合头藜-刺沙蓬群落>红砂-三芒草群落>珍珠猪毛菜-一寸草群落。典型群落植被密度从大到小顺序为:红砂-三芒草群落>珍珠猪毛菜-一寸草群落>红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落>白刺-雾冰藜+黄花蒿群落>红砂-猪毛蒿+画眉草群落>红砂+合头藜-刺沙蓬群落。

表 3 研究区植物群落特征

Table 3 Characteristics of plant community in study area

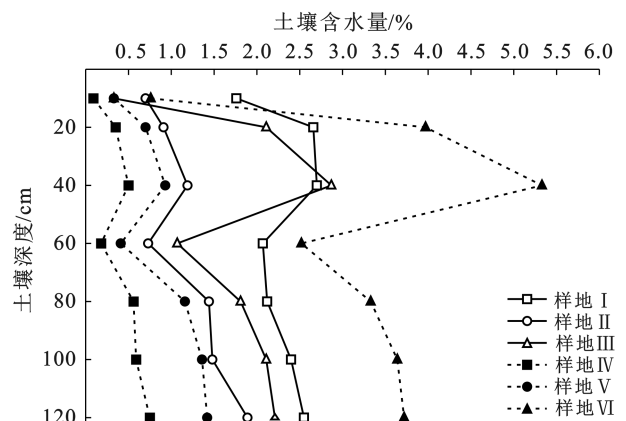
项目	珍珠猪毛菜-一寸草群落	红砂-三芒草群落	红砂-猪毛蒿+画眉草群落	白刺-雾冰藜+黄花蒿群落	红砂+合头藜-刺沙蓬群落	红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落
<i>H</i>	1.178 3	1.360 4	1.874 2	1.158 1	2.437 9	1.790 0
<i>D</i>	0.374 2	0.336 9	0.236 5	0.475 0	0.093 4	0.221 0
<i>E</i>	0.566 6	0.590 8	0.710 2	0.527 1	0.923 8	0.661 0
<i>F</i>	1.263 2	1.130 8	2.020 3	1.182 8	2.181 8	1.863 3
植被盖度/%	67.82	35.12	79.14	23.75	19.60	25.00
植被高度/cm	9.61	20.49	25.87	51.36	24.65	27.95
植被密度/(株·m ⁻²)	49.69	59.27	12.98	17.42	8.06	20.69

注:*H* 为 Shannon-Wiener 多样性指数; *D* 为 Simpson 生态优势度指数; *E* 为 Pielou 均匀度指数; *F* 为 Margalef 物种丰富度指数。

3.3 各植被类型土壤水分垂直分布特征

各植被类型植物群落土壤水分垂直分布情况^[13]如图 1 所示。从图 1 可以看出,6 种植被类型的土壤水分垂直分布规律相似,均从表层向下到深 40 cm 处随深度增加土壤湿度逐步升高,土层深度 20—40 cm 处的土壤含水量达到最高,珍珠猪毛菜-一寸草群落、红砂-三芒草群落、红砂-猪毛蒿+画眉草群落、白刺-雾冰藜+黄花蒿群落、红砂+合头藜-刺沙蓬群落、红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落样地的 20—40 cm 土层土壤含水量分别为 2.7%, 1.19%, 2.87%, 0.5%, 0.93% 和 5.33%, 而后土壤湿度均逐渐下降,40—60 cm 土层土壤湿度依次为 2.07%, 0.73%, 1.07%, 0.18%, 0.41% 和 2.52%。到土层深度 60 cm 之后土壤湿度又随土层深度增加而逐步升高,直至 100—120 cm 处的土层土壤含水量达到较高的水平。以上 6 个植物群落在 0—120 cm 土层深度范围内,呈现 40—120 cm 土层的土壤平均含水量均高于 0—20 cm 土层土壤含水量的规律,原因是表层土壤存在水分蒸发作用。0—120 cm 土壤平均含水率由高到低

依次为:红砂-冷蒿+内蒙古旱蒿群落(3.32%)>珍珠猪毛菜-一寸草群落(2.33%)>红砂-猪毛蒿+画眉草群落(1.79%)>红砂-三芒草群落(1.19%)>红砂+合头藜-刺沙蓬群落(0.9%)>白刺-雾冰藜+黄花蒿群落(0.43%)。



注:图中罗马数字为样地编号。详见表 2。

图 1 不同植被类型植物群落土壤剖面土壤水分变化
Fig.1 Variation of soil moisture on soil profile in plant communities of different vegetation types

3.4 土壤水分含量与植被特征的关系

由表4可以看出,各样地植被高度与40—60 cm土层的土壤含水量呈显著正相关,与60—80 cm,80—100 cm,100—120 cm土层的土壤含水量呈极显著正相关,而与0—10 cm土层的土壤含水量呈极显著

负相关;草本密度与10—20 cm土层的土壤含水量呈显著正相关,灌木密度与40—80 cm土层的土壤含水量呈极显著正相关;植被盖度与10—20 cm,20—40 cm,60—80 cm土层的土壤含水量呈极显著正相关。

表4 土壤水分与植被特征的Pearson相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient between soil moisture and vegetation characteristics

指标	植被高度/cm	草本密度/(株·m ⁻²)	灌木密度/(株·m ⁻²)	植被盖度/%	土壤水分含量						
					0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm
植被高度/cm	1	-0.357	-0.442	0.258	-0.594**	0.022	0.152	0.523*	0.629**	0.615**	0.613**
草本密度/(株·m ⁻²)		1	0.513*	0.054	0.278	0.528*	0.136	-0.180	0.084	0.126	0.128
灌木密度/(株·m ⁻²)			1	-0.001	0.098	0.200	0.098	0.596**	0.623**	0.045	0.353
植被盖度/%				1	0.032	0.627**	0.694**	-0.341	0.595**	0.399	0.465
土壤水分含量	0—10 cm				1	0.519*	0.361	-0.431	0.623**	-0.368	0.783**
	10—20 cm					1	0.981**	-0.423	0.979**	-0.440	0.933**
	20—40 cm						1	-0.418	0.946**	-0.446	0.856**
	40—60 cm							1	-0.577*	0.985**	-0.533*
	60—80 cm								1	-0.580*	0.970**
	80—100 cm									1	-0.513*
	100—120 cm										1

注:*表示 $p < 0.05$ 水平相关性显著;**表示 $p < 0.01$ 水平相关性极显著。

4 讨论

4.1 荒漠绿洲过渡带植物群落特征

张掖市境内的荒漠绿洲过渡带植被结构非常简单,物种极度贫乏且分布极不均匀,植被以适生于干旱荒漠生境的红砂、合头藜、珍珠猪毛菜、三芒草、雾冰藜、刺沙蓬等耐旱和超耐旱的小灌木、半灌木、草本植物为主。在所调查的样地中,植物群落物种多样性指数均较小;红砂—冷蒿+内蒙古旱蒿群落物种最多(15种),珍珠猪毛菜—寸草群落物种最少(仅8种),表明研究区植物群落的物种多样性水平均较低。各样地植物群落物种组成表(表2)反映了不同植被类型植物群落物种分布情况:该区域植物群落中均无乔木植物存在,主要以灌木、草本植物为主,植被类型属灌草群落类型。由于张掖荒漠绿洲过渡带属温带大陆性干旱荒漠气候,即冬季寒冷,夏季炎热、降雨极度缺乏、蒸发强烈、风大等多种因素叠加,导致张掖荒漠绿洲过渡带土壤含水量极低。6个样区0—120 cm土层土壤平均水分含量仅为0.43%~3.32%,土壤含水量极低,高大的乔木难以在该区域上存活,只有矮小的、极其耐干旱的灌木、草本植物才能存活,导致该区域物种稀少,物种多样性水平较低。

4.2 植被特征与土壤水分含量的关系

不同植被类型植物群落土壤剖面水分变化图可

视化了不同植被类型植物群落土壤水分垂直分布情况(图1)。由图1可以看出,6种植被类型的土壤水分垂直分布规律相似,土壤水分在垂直方向上的变化呈现“双峰形”,土壤湿度由表层向深层逐步升高,在20—40 cm土壤水分升高到“第一个峰值”,但到40—60 cm处土壤水分又降到了较低水平,土层深度60—120 cm土壤湿度又逐步上升,直至120 cm处土壤水分升高到“第2个峰值”,说明分布于该区域的荒漠植物为植株矮小的中旱生、旱生和超旱生植物,虽然植物种类不同,但其主要根系分布在深度为40—60 cm的土层,因此对该层土壤水分吸水较多、消耗较多,致使该层土壤水分含量降到较低水平(第2个谷值)。

土壤水分含量变化不仅直接影响着植物群落多样性,而且通过影响别的环境因子又间接影响着植物多样性的维持^[21]。土壤水分含量对植被高度、植被密度及物种丰富度分布的影响,反映了植被适应生境及其维持多样性的特点,决定着该区域植物物种的组成、结构及其种群的大小。该区域植物群落的植被高度随深层土壤水分含量的升高而增高,植被高度与40—120 cm土层土壤水分呈显著正相关,但与0—10 cm处水分呈极显著负相关,说明灌木植物的高度决定了整个植物群落的植被高度,而0—10 cm的土壤水分含量仅对草本植物高生长影响较大,但对灌木高生长影响较小,40 cm以下的土壤水分含量影响着灌木植物的

生长高度。草本密度与 10—20 cm 土层的土壤含水量呈显著正相关,灌木密度与 40—80 cm 土层的土壤含水量呈极显著正相关;植被盖度与 10—20 cm, 20—40 cm, 60—80 cm 土层的土壤含水量呈极显著正相关,这是由于草本植物根系主要分布在深 10—20 cm 的土层,灌木植物根系主要分布在土层深度 40 cm 以下。陈文业等^[17]研究认为草本物种多样性主要依赖于浅层土壤水分含量,灌木物种多样性依赖于深层土壤水分含量,本文研究结论与其一致。草本植物、灌木植物密度、植被盖度与其根系主要分布层的土壤水分含量呈显著正相关,说明在荒漠—绿洲过渡带土壤水分极度缺乏的环境下,随着植物根系主要分布层的土壤水分含量的增高,可满足植物生长发育需要,能够促进种子萌发,促使植物生长旺盛,进而使植物密度、植被盖度也增加。

研究区属干旱半干旱地区,年降水量小于 400 mm,土壤水分含量的变化制约着天然植被植物的植被种类及生长状况。各植被类型 0—120 cm 土层土壤平均水分含量由高到低排列顺序为:红砂—冷蒿+内蒙古旱蒿群落(3.32%)>珍珠猪毛菜—寸草群落(2.33%)>红砂—猪毛蒿+画眉草群落(1.79%)>红砂—三芒草群落(1.19%)>红砂+合头藜—刺沙蓬群落(0.9%)>白刺—雾冰藜+黄花蒿群落(0.43%)。各样区平均土壤含水量均不到 4%,土壤水分含量极低。从不同植被类型植被特征与其各层土壤水分含量的相关关系可以看出,在表层(0—20 cm)土壤水分含量不足 1%,深层(40—80 cm)土壤水分含量不足 2%的地区,适宜种植红砂、合头藜、白刺等旱生灌木和三芒草、刺沙蓬、雾冰藜、画眉草、猪毛蒿等草本植物;在表层土壤(0—20 cm)、深层土壤(40—80 cm)水分含量均超过 2%的荒漠地带,适宜种植红砂、珍珠猪毛菜等旱生灌木和冷蒿、内蒙古旱蒿、寸草等草本植物,以促进当地的生态恢复与改善。

5 结论

(1) 甘肃张掖市境内的荒漠绿洲过渡带土壤水分含量的变化主要受大气降水和地下水位影响,土壤水分在垂直方向上的变化呈现“双峰形”,且土壤水分含量极低(平均含水量不足 4%),严重制约着天然植被植物的生长,导致植被结构极其简单,物种较为贫乏且分布极不均匀,植被以喜生于干旱荒漠生境的红砂、合头藜、三芒草、雾冰藜、刺沙蓬等耐旱和超耐旱的灌木、草本植物为主,植物群落物种多样性指数较小。群落的植被高度、植被密度、植物盖度随土壤水分含量的升高而增高、增大,植物群落的植被高度、植

被密度与土壤水分含量正相关显著。

(2) 在荒漠绿洲过渡带表层土壤(0—20 cm)水分含量不足 1%,深层土壤(40—80 cm)水分含量不足 2%的地带,适宜种植红砂、合头藜、白刺等旱生灌木和三芒草、刺沙蓬、雾冰藜、画眉草、猪毛蒿等草本植物;在表层土壤、深层土壤水分含量均超过 2%的荒漠地带,适宜种植红砂、珍珠猪毛菜等旱生灌木和冷蒿、内蒙古旱蒿、寸草等草本植物,能够有效促进生态恢复和重建。

参考文献(References)

- [1] 王蕙,赵文智,常学向.黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J].生态学报,2007,27(5):1731-1739.
Wang Hui, Zhao Wenzhi, Chang Xuexiang. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(5):1731-1739.
- [2] 王家强,韩路,柳维扬,等.塔里木河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间格局变化关系研究[J].西北林学院学报,2018,33(1):1-10.
Wang Jiaqiang, Han Lu, Liu Weiyang, et al. Variable relationship of soil moisture and spatial pattern along desert oasis transition zone in the Tarim River middle reaches basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(1):1-10.
- [3] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等.绿洲—荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J].植物生态学报,2002,26(2):203-208.
Jia Baoquan, Ci Longjun, Cai Tiju, et al. Preliminary research on changing soil water characters at ecotone between oasis and desert [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002,26(2):203-208.
- [4] 赵成义,王玉朝.荒漠—绿洲边缘区土壤水分时空动态研究[J].水土保持学报,2005,19(1):124-127.
Zhao Chengyi, Wang Yuchao. Study on spatial and temporal dynamic of soil water content in desert-oasis ecotone [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(1):124-127.
- [5] 丁建丽,潘晓玲,朱启疆,等.极端干旱区绿洲外缘地带植被现状及其恢复可行性研究:以策勒县为例[J].生态学杂志,2004,23(1):1-4.
Ding Jianli, Pan Xiaoling, Zhu Qijiang, et al. Vegetation actuality and its recovery in the outer space of extremely-arid area oasis-taking Qira County for example [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(1):1-4.
- [6] 李秋艳,何志斌,赵文智,等.不同生境条件下泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)种群的空间格局及动态分析[J].中国沙漠,2004,24(4):484-488.
Li Qiuyan, He Zhibin, Zhao Wenzhi, et al. Spatial pattern of *Nitraria sphaerocarpa* population and dynamics

- in different habitats [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 484-488.
- [7] 贾宝全, 慈龙骏, 高志海, 等. 绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(2): 19-24.
Jia Baoquan, Ci Longjun, Gao Zhihai, et al. The desertification of oasis and its assessment indicators [J]. *Arid Zone Research*, 2001, 18(2): 19-24.
- [8] 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 刘传胜. 策勒绿洲植被覆盖动态变化遥感研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 79-83.
Ding Jianli, Taxipulati·Teyibai, Liu Chuansheng. Remote sensing research on dynamic changes of vegetation coverage in Cele Oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(1): 79-83.
- [9] 常学向, 赵爱芬, 赵文智, 等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 126-129.
Chang Xuexiang, Zhao Aifen, Zhao Wenzhi, et al. Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe River Basin [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(2): 126-129.
- [10] 孟宝, 张勃. 绿洲—荒漠过渡带土壤特性空间变异规律初探[J]. *人民长江*, 2008, 39(20): 21-24.
Meng Bao, Zhang Bo. Preliminary Study on the Spatial Variability of Soil Characteristics in the Oasis-desert Transition Zone [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(20): 21-24.
- [11] 毛东雷. 策勒绿洲—沙漠过渡带植被与土壤水分空间异质性研究[J]. *现代农业科技*, 2011, 13: 252-255.
Mao Donglei. Research on space heterogeneity of vegetation and soil moisture in oasis-desert ecotone in Cele County [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011, 13: 252-255.
- [12] 赵文智. 生态水文学: 陆生环境和水生环境植物与水分关系[M]. 王根绪译, 北京: 海洋出版社, 2002: 184-190.
Zhao Wenzhi. *Ecohydrology: The Relationship Between Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments* [M]. Wang Genxu Translate, Beijing: Ocean Press, 2002: 184-190.
- [13] 图娜拉, 巴音青克乐, 莫日根, 等. 毛乌素沙地不同植被类型土壤水分特征研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(S1): 63-64.
Tu Nala, Ba Yinqingkeer, Mo Rigeng, et al. Different vegetation type of soil moisture characteristics of Maowu Su Sandi [J]. *Yellow River*, 2020, 42(S1): 63-64.
- [14] 陈斌, 鲁延芳, 占玉芳, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 25-32.
Chen Bin, Lu Yanfang, Zhan Yufang, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture and its influence on vegetation in desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 25-32.
- [15] 王红霞. 黄土高原刺槐植物功能性状变化与环境适应的生态学意义[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wang Hongxia. The ecological significance of variation and environmental adaptation of functional traits of *Robinia pseudoacacia* in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [16] 艾宁, 强方方, 朱清科, 等. 半干旱黄土丘陵区雨季土壤水分动态分析[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 326-334.
Ai Ning, Qiang Fangfang, Zhu Qingke, et al. Dynamic analysis for soil moisture during the rainy season at semiarid Loess Hilly Region [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 326-334.
- [17] 陈文业, 赵明, 张继强, 等. 甘肃敦煌西湖荒漠—湿地生态系统土壤水分含量对植被特征的影响[J]. *林业科学*, 2015, 51(11): 8-16.
Chen Wenyue, Zhao Ming, Zhang Jiqiang, et al. Influence of soil water content on vegetation characteristics in desert-wetland ecosystem in Xihu of Dunhuang, Gansu [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(11): 8-16.
- [18] 何欣月, 王宁, 刘均阳, 等. 黄土丘陵区植物群落多样性及生物量随土壤水分梯度变化特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 31-40.
He Xinyue, Wang Ning, Liu Junyang, et al. The variation of plant community diversity and biomass along a soil water gradient in Loess Hilly Region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1): 31-40.
- [19] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J]. *中国科学(生命科学)*, 2014, 44(3): 257-266.
Li Xinrong, Zhang Zhishan, Tan Huijuan, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2014, 44(3): 257-266.
- [20] 郭文婷, 王国华, 缙倩倩, 等. 河西走廊荒漠绿洲过渡带3种典型一年生藜科植物构件生长及生物量分配特征[J]. *草业学报*, 2022, 31(2): 25-38.
Guo Wenting, Wang Guohua, Gou Qianqian, et al. Module growth and biomass allocation of three typical Chenopodiaceae annuals in a typical desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor in Gansu Province, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(2): 25-38.
- [21] 李浩然. 荒漠绿洲过渡带斑块植被格局动态及土壤水文特性研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州交通大学, 2021.
Li Haoran. Study on vegetation pattern dynamics and soil hydrological characteristics of Plaque in desert-oasis transition zone [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou

- Jiaotong University, 2021.
- [22] 鲁延芳, 权金鹏, 占玉芳, 等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带植被多样性特征及其水分的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 22-30.
Lu Yanfang, Quan Jinpeng, Zhan Yufang, et al. Characteristics of vegetation diversity and effects of water in the desert-oasis region in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 22-30.
- [23] 马真, 翟伟, 阎平. 石河子绿洲—荒漠区十字花科植物物种多样性及其分布特点[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009, 27(3): 269-273.
Ma Zhen, Zhai Wei, Yan Ping. The diversity and distribution of Brassicaceae from oasis and desert of Shihezi [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2009, 27(3): 269-273.
- [24] 金彦龙. 荒漠绿洲过渡带不同植被下土壤全氮的空间分布规律研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(18): 49-51.
Jin Yanlong. Study on the spatial distribution of soil total nitrogen under different vegetation in the transition zone of desert oasis [J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(18): 49-51.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 滕玉凤, 马力, 占玉芳, 等. 河西走廊民勤人工梭梭林群落的物种多样性研究[J]. 中国水土保持, 2019(1): 43-46.
Teng Yufeng, Ma Li, Zhan Yufang, et al. Species diversity of artificial *Haloxylon ammodendron* forest community in Minqin of Hexi Corridor [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1): 43-46.
- [27] 滕玉凤, 马力, 占玉芳, 等. 金塔沙漠人工林植被物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 68-74.
Teng Yufeng, Ma Li, Zhan Yufang, et al. Vegetation species diversity of artificial forest in Jinta Desert [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 68-74.
- [28] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 685-691.
Li Xinrong, He Mingzhu, Jia Rongliang. The response of desert plant species diversity to the changes in soil water content in the middle-lower reaches of the Heihe River [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 685-691.
- [29] 郭玉永. 关帝山植物群落物种多样性初步研究[J]. 山西林业科技, 2004, 33(4): 23-26.
Guo Yuyong. A preliminary study on the plant community diversity of species in guandi mountain [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2004, 33(4): 23-26.
- [30] 林捷, 叶功富, 何建源, 等. 武夷山丝栗栲天然林群落的物种多样性研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(3): 340-344.
Lin Jie, Ye Gongfu, He Jianyuan, et al. A study on species diversity in *Castanopsis fargesii* natural forest community in Wuyishan Mountains [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005, 27(3): 340-344.
- [31] 黄清麟, 李元红. 闽北短伐期阔叶林研究[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 97-102.
Huang Qinglin, Li Yuanhong. A study on the short rotation broad leaved forests in Northern Fujian Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 97-102.
- [32] 田军, 孙海静, 于树峰, 等. 开林窗与封禁对华北落叶松林下植被多样性的影响[J]. 河北林果研究, 2012, 27(3): 260-264.
Tian Jun, Sun Haijing, Yu Shufeng, et al. Effects of different measures on the species diversity of the undergrowth vegetations of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2012, 27(3): 260-264.
- [33] 王伯荪. 植物种群学[M]. 广东 广州: 广东高等教育出版社, 1995.
Wang Bosun. Plant Population [M]. Guangzhou, Guangdong: Guangdong Higher Education Press, 1995.
- [34] 黄学文, 杨美霞, 庞博, 等. 呼伦湖国家级自然保护区芦苇群落类型及物种多样性研究[J]. 国土与自然资源研究, 2020(5): 54-56.
Huang Xuewen, Yang Meixia, Pang Bo et al. Hulun lake national nature reserve study on community type and species diversity of *Phragmites australis* [J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(5): 54-56.