

DOI: 10.20103/j.stxb.202310312360

辛智鸣, 邵琪雯, 王湘, 李新乐, 马媛, 李星, 罗凤敏, 肖辉杰, 董树斌, 程瑾. 乌兰布和沙漠植物多样性及绿洲-荒漠区植被地上生物量研究. 生态学报, 2024, 44(18): 8234-8246.

Xin Z M, Shao Q W, Wang X, Li X L, Ma Y, Li X, Luo F M, Xiao H J, Dong S B, Cheng J. Plant diversity and aboveground biomass of oasis-desert vegetation in Ulan Buhe Desert. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8234-8246.

# 乌兰布和沙漠植物多样性及绿洲-荒漠区植被地上生物量研究

辛智鸣<sup>1,2</sup>, 邵琪雯<sup>1</sup>, 王湘<sup>1</sup>, 李新乐<sup>2</sup>, 马媛<sup>2</sup>, 李星<sup>2</sup>, 罗凤敏<sup>2</sup>, 肖辉杰<sup>1</sup>, 董树斌<sup>1</sup>, 程瑾<sup>1,\*</sup>

1 北京林业大学林木育种与生态修复国家工程研究中心, 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083

2 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 磴口 015200

**摘要:**通过对乌兰布和沙漠 30 个样地 152 个样方进行调查, 利用 MAPGIS 软件绘制了乌兰布和沙漠首个主要植物群落类型分布图, 利用经典的物种多样性指数对乌兰布和沙漠区植物群落的物种多样性及群落结构进行分析, 对绿洲区和荒漠区植被地上生物量、土壤养分进行了显著差异性分析。结果表明:研究区共记录 94 种植物, 隶属于 21 科 58 属, 物种数量最多的 3 个科依次为菊科、禾本科和苋科。乌兰布和沙漠天然植被主要由 16 个群系 35 个群丛组成, 以旱生、超旱生或盐生的小灌木和多年生草本植物占主导地位。分布面积最大的前三植物群系分别是:梭梭群系(1728.24 km<sup>2</sup>), 白刺群系(1278.27 km<sup>2</sup>)和沙冬青群系(746.79 km<sup>2</sup>)。群落优势层为灌木层, 以小灌木和半灌木为主, 白刺为样地出现频次最多的物种。整体上乌兰布和沙漠植物多样性水平较低, Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 2.1086 和 0.8158。目前人工绿洲对乌兰布和沙漠植物群落物种组成的影响不明显, 但绿洲区植被地上生物量显著高于荒漠区。绿洲区和荒漠区在 6 个土层深度 8 个土壤养分指标上几乎没有显著性差异。相关调查和研究结果能够为乌兰布和沙漠地区的风沙治理、生态环境恢复和维护提供参考。

**关键词:**乌兰布和沙漠; 植物群落类型; 物种多样性; 生物量; 土壤养分

## Plant diversity and aboveground biomass of oasis-desert vegetation in Ulan Buhe Desert

XIN Zhiming<sup>1,2</sup>, SHAO Qiwen<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, LI Xinle<sup>2</sup>, MA Yuan<sup>2</sup>, LI Xing<sup>2</sup>, LUO Fengmin<sup>2</sup>, XIAO Huijie<sup>1</sup>, DONG Shubin<sup>1</sup>, CHENG Jin<sup>1,\*</sup>

1 National Engineering Research Center of Tree breeding and Ecological restoration, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China

**Abstract:** Based on the vegetation investigation of 30 plots and 152 quadrats, the distribution map of plant community types in Ulan Buhe Desert was firstly drawn by MAPGIS, and the species diversity and community structure of plant communities were evaluated by using the classical species diversity index. Moreover, the significant differences of biomass and soil nutrients between oasis and desert areas were analyzed. The results showed that a total of 94 species belonging to 58 genera and 21 families were recorded in the study area. Compositae, Gramineae and Amaranthaceae were the three most abundant

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2023YFF1304204); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项中国和美国政府间合作项目(2019YFE0116500); 科技部科技基础资源调查专项(2022FY202300)

收稿日期:2023-10-31; 网络出版日期:2024-07-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengjin@bjfu.edu.cn

species families. The natural vegetation in Ulan Buhe Desert was mainly composed of 16 groups and 35 groups, which were dominated by xerophytic, ultra-xerophytic or halophytic small shrubs and perennial herbs. The top three plant groups with the largest distribution area were: Form. *Haloxylon ammodendron* (1728.24 km<sup>2</sup>), Form. *Nitraria tangutorum* (1278.27 km<sup>2</sup>), and Form. *Ammopiptanthus mongolicus* (746.79 km<sup>2</sup>). The dominant layer of the community was shrub layer, which was dominated by small shrubs and semi-shrubs, and *Nitraria tangutorum* was the most frequent species in the sample plots. On the whole, the plants diversity level of the Ulan Buhe Desert was low, with Shannon-Wiener index and Simpson index being 2.1086 and 0.8158, respectively. The effects of artificial oases on plant community composition in Ulan Buhe Desert were not obvious now, but the aboveground biomass in oasis area was significantly higher than that in desert area. There were almost no significant differences in the 8 soil nutrient indexes of the 6 soil layers between oasis area and desert area. The relevant investigation and research results can provide reference for the control of wind and sand, the restoration and maintenance of ecological environment in Ulan Buhe Desert area.

**Key Words:** Ulan Buhe Desert; type of plant community; diversity of species; biomass; soil nutrients

物种多样性及群落结构能够体现和衡量一个群落的结构和功能,即群落中物种的组成、结构特征、生态功能及动态变化,进一步体现了生物群落和生态系统的复杂性<sup>[1-3]</sup>。物种多样性是生物多样性的的重要组成部分,不仅可以反映群落内物种的种类、数量的多少、结构复杂化程度等客观指标,同时还反映了群落中物种与生境之间的适应性,表征着生物群落和生态系统的结构复杂性,体现了群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异,是揭示植被组织水平的生态学基础<sup>[4-5]</sup>。深度认识荒漠植物群落物种多样性与其生境的关系,对维护荒漠生态系统结构与功能的稳定具有重要意义<sup>[6]</sup>。目前,大部分对物种多样性及群落结构的研究主要聚焦在某一植被类型下的物种多样性与群落结构上,对于自然荒漠加人工绿洲的复杂植被类型的研究并不多见<sup>[7-9]</sup>。

荒漠是中国北方重要的生态系统类型,约占中国陆地总面积的 1/5<sup>[10]</sup>。荒漠植物普遍具有适应干旱、高温、贫瘠等逆境的特殊结构和机能,虽然种类较少,平均生产力较低,但分布面积大、影响范围广,具有重要的生态和生产功能<sup>[11]</sup>。乌兰布和沙漠是我国第八大沙漠<sup>[12]</sup>,地处我国西北内陆极端干旱区,同时也处于北边内蒙和南边宁夏的生态交错带,其东北部是绿洲,东面有黄河,西部和南部属于荒漠过渡带,在我国西北干旱地区有特殊的地位。乌兰布和沙漠的消长对此区域周围的黄河、山地、城市及附近的绿洲等多地的生态安全有重要影响<sup>[13-14]</sup>。当前,我国荒漠化、沙化土地治理呈现出“整体好转、改善加速”的良好态势,但沙化土地面积大、分布广、程度重、治理难的基本情况尚未根本改变<sup>[15]</sup>。乌兰布和沙漠是我国防沙治沙、生态修复和相关研究的重要试验示范区,通过近十几年来的还林还草、风沙源治理等生态治理恢复措施,此区域植被覆盖度增长明显<sup>[16]</sup>,在绿洲化进程中绿洲周围局部地区水汽输送过程发生改变,形成“冷岛效应”,降低绿洲及附近土壤蒸发作用,使绿洲中水分条件趋于稳定状态<sup>[17]</sup>。因此,受人工绿洲和荒漠气候的双重影响,乌兰布和沙漠植物群落特点具有其特殊性,荒漠区容易受到极端干旱自然条件的影响加速荒漠化,而东北部因人为绿化活动局部加速绿洲化,易造成两极分化,进而影响植物多样性及群落分布格局。由于近年来持续的人工补水,要了解乌兰布和沙漠人工绿洲的植被和土壤养分与荒漠区有无显著差异,需要对此区域开展全面调查和持续监测。

对乌兰布和沙漠植物多样性、群落类型、生物量、土壤养分及含水量进行细致分析,继而提出合理的治理策略,对此区域的生态安全和社会经济发展具有重要意义。乌兰布和沙漠的植物群落的研究报道较多,但是这些研究大多仅涉及乌兰布和沙漠植物的某个类型,比如灌木群落<sup>[12]</sup>,典型群落的生长特性<sup>[18]</sup>,典型植物群落土壤风蚀性<sup>[19]</sup>,或者是关注植物与环境之间的关系<sup>[20]</sup>,并未对乌兰布和沙漠全区的群落进行研究,特别是对绿洲区和荒漠区的群落类型、植被地上生物量、土壤养分等进行比较,更没有全区植被类型清晰的分布图。本研究通过对乌兰布和沙漠全面开展植物群落样方调查和分析,了解各种典型群落结构和物种组成,绘制乌

兰布和沙漠全植物群落类型分布图,分析植物地理成分、群落结构和物种多样性水平;评估优势种群落的分布面积,分析绿洲和荒漠区的植被地上生物量、土壤养分等重要指标,探讨乌兰布和沙漠植物分布特征与自然环境及绿洲之间的可能关系,旨在为乌兰布和沙漠生态环境植被恢复和生物多样性保护提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

乌兰布和沙漠,位于 $39^{\circ}19'—41^{\circ}23'N$ , $105^{\circ}06'—106^{\circ}46'E$ ,海拔 1010—1350 m,面积约为 10000 km<sup>2</sup>,土壤类型为风沙土、栗钙土、盐碱土等。气候属于温带大陆性气候,年降水量极少(约 110—160 mm),年蒸发量极大(约 2400—3200 mm);年平均气温(7.5—8.5℃),最高气温 39℃,最低气温-29.6℃, $\geq 10^{\circ}C$  积温 3100—3400℃,年日照时数大于 3000 h,无霜期 140—160 d,常年主风为东南风或偏南风<sup>[20—22]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置与植被调查

本次调查于 2020 年 8 月进行,调查路线根据乌兰布和沙漠的遥感影像进行设计,选择典型群落共设置 30 个样地(图 1),根据样地经纬度在地图上标记位置并对样地进行编号(Y1—Y30),利用 GPS 测定地理坐标和海拔等自然概况。实地调查同时利用奥维互动地图软件记录每个网格内不同群落的实际边界,将每个网格记录的边界矢量信息导入 MAPGIS 软件,依据中国植物群落划分原则,将相同建群种划为一类完成群落分布制图工作。在每个样地上选择荒漠植物群落,布设一块 100 m×100 m 的大样方,样方内设置 3—8 个 10 m×10 m 的小样方,共计 152 个小样方,记录每个小样方内所有维管植物的种名、高度、多度、丛幅,采用收获法测量地上生物量,先选定每种植物的标准株,灌木 30 株/种,草本 50 株(丛)/种,记录每个个体的数量特征值,利用工具齐根部将地上部分标准株样品带回实验室,于烘箱中 85℃ 烘干至恒质量,然后称量得到全株的地上生物量。根据张正国<sup>[23]</sup>的方法建立每个种的生物量方程,计算样方内的植物地上总生物量。同时,为了了解绿洲是否对周围的植物群落及土壤养分存在影响,在绿洲区和荒漠区随机选取各 5 个样地,分别记为 OY1—OY5 和 DY1—DY5(图 1),每个样地内选取 3 个样方作为实验重复,统计地上生物量进行显著差异性分析;并对样地 6 个土层深度(0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm)的土壤取样,开展 8 个土壤养分指标的测定,其中土壤含氮量测定采用凯氏定氮法<sup>[24]</sup>,有机碳测定采用分光光度法<sup>[25]</sup>,有机质测定采用重铬酸钾氧化—外加热测定法,土壤全磷和速效磷测定采用酸溶法及比色法测定,碱解氮含量测定采用凯氏提取液浸提法,土壤全钾含量采用氢氧化钠熔融法,土壤速效钾测定采取乙酸铵浸提法<sup>[26]</sup>。

#### 1.2.2 数据分析

本研究中采用 4 个常用指数用于植物多样性的评估,即 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数,以上指数依照 Hill 等<sup>[27]</sup>的公式计算。数据的显著性分析采用 R v.4.1 和 Excel 软件(2016 版)。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物类型及组成

调查结果表明,乌兰布和沙漠的自然植被属于荒漠和旱生灌丛类型,共有植物 21 科 58 属 94 种,从种级水平分析,菊科植物最多,有 9 属 19 种;其次是禾本科(13 属 17 种)和苋科(10 属 17 种);随后是豆科 5 属 10 种;蒺藜科、夹竹桃科、怪柳科各 2 属 3 种;天门冬科 1 属 3 种;白刺科 2 属 4 种;石蒜科、鸢尾科、蓼科各 1 属 2 种;列当科、胡颓子科、车前科、旋花科、紫草科、报春花科、大戟科、白花丹科、茄科各 1 属 1 种。从属级水平分析,禾本科和苋科的物种多样性更丰富(分别有 13 属和 10 属)。从所有样方的物种数量来说,苋科植物株数最多,占全部物种的 64.20%,其中数量最多的前三个物种为沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Grubovia dasphylla*)和虫实(*Corispermum hyssopifolium*),共占调查物种总株数的 63.90%;但从物种在样方中出现的频

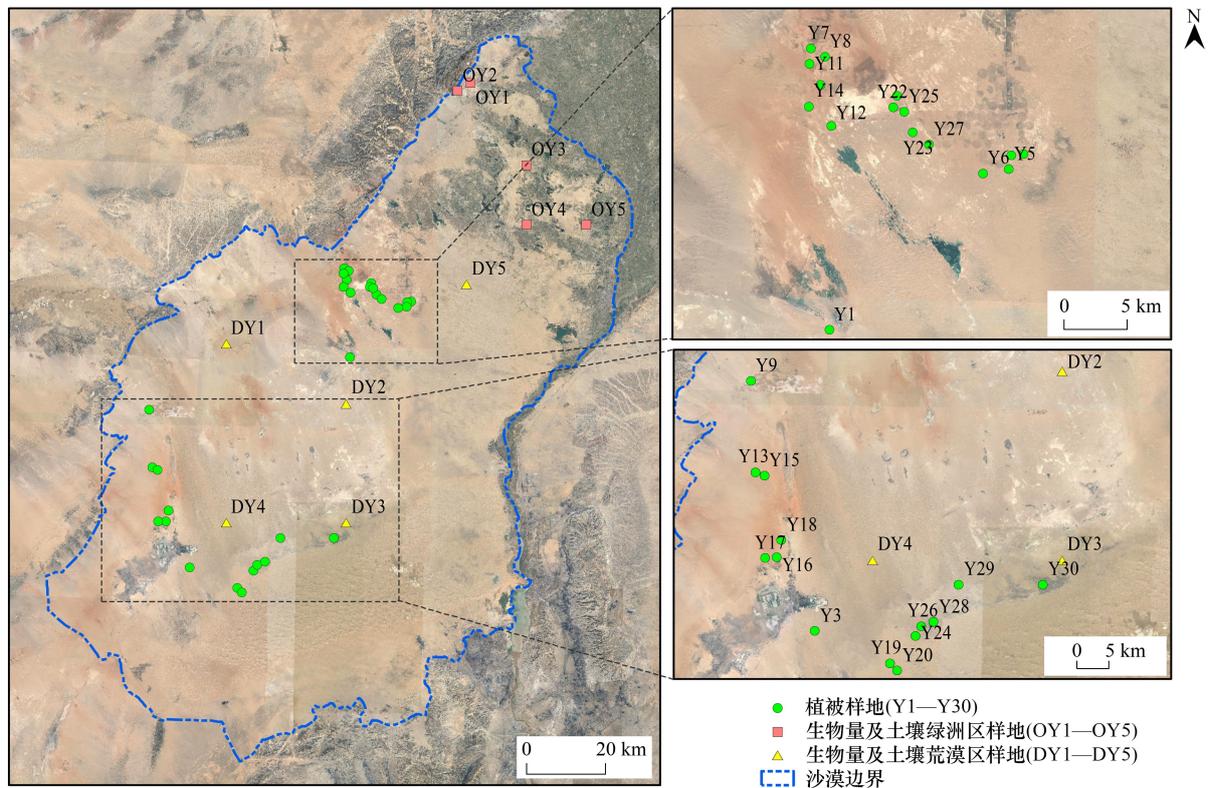


图1 乌兰布和沙漠及调查样地位置图

Fig.1 The location of Ulan Buhe Desert and survey plots

次来看,白刺(*Nitraria tangutorum*)在99个样方中都存在,出现频次最高,占样方总数(152)的65.13%,其次是虫实,在47个样方中出现,占样方总数的30.92%,出现频次第三的是霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*),在38个样方中出现,占样方总数的25.00%。

根据《中国植被》提出的植物生活型分类系统<sup>[28]</sup>,乌兰布和沙漠植物的生活型可以分为灌木33种(包括小灌木、半灌木),多年生草本38种,一年生或两年生草本23种,分别占物种总种数的35.11%,40.43%,24.47%;乌兰布和沙漠地区植物大部分为地面芽植物和高位芽植物,占总数的71.90%,一年生植物占比为23.60%,地上芽和地下芽植物少;上述特点是此区植物适应极端干旱环境的表现。除了旱生或者超旱生的多年生小灌木和半灌木占优势外,多年生草本植物也占很重要的地位。但是在乌兰布和东北部受绿洲的影响周边出现了一些湿生植物,如芦苇(*Phragmites australis*)、盐生车前(*Plantago salsa*)等植物。

根据吴征镒等主编的中国植物区系分区方案(1983)<sup>[29]</sup>,乌兰布和沙漠地区植物属于泛北极植物区、亚洲荒漠植物亚区、中亚东部植物地区。从植物科的地理成分分析来看,世界分布的科最多,占有21个科的47.62%,如菊科、禾本科、豆科等(表1)。

## 2.2 植物物种多样性

从整体水平分析乌兰布和沙漠植被植物多样性指数,结果显示(表2),Margalef丰富度指数为7.9824,Shannon-Wiener多样性指数为2.1086,Pielou均匀度为0.4630,Simpson多样性指数为0.8158,表明乌兰布和沙漠的植物多样性水平较低。

研究结果显示各样地物种多样性指数差异较大,优势种也不尽相同。30个样地中,Margalef丰富度指数在0.5016—2.8134之间变动,Shannon-Wiener多样性指数的变化范围是0.5201—2.0351,可见这2个指数变化范围较大,说明乌兰布和沙漠植物群落的物种结构及组成较复杂,种间异质性较大。Simpson多样性指数的变化范围在0.2998—0.8543之间,Pielou均匀度指数变化幅度在0.4359—0.9571之间(表2)。由此可见,虽

然 30 个样地都属于同一气候带,但植物的物种多样性水平仍然有一定的差异性。从单个物种的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数比较来看,灌木中白刺具有最高的多样性水平,这 2 个指数分别为 0.0186 和 0.9999,其次是红砂、霸王等,草本植物中以沙蓬的 Shannon-Wiener 指数水平最高,为 0.3619,其次是沙鞭 (*Psammochloa villosa*)、雾冰藜等,Shannon-Wiener 指数分别为 0.3102 和 0.3048。

表 1 乌兰布和沙漠区植物科地理成分

Table 1 Geographical constituents of plant families in Ulan Buhe Desert region

地理成分 Geographical component	科数 Number of family	科名 Family	占比/% Percent
世界分布 World distribution	10	菊科 (Asteraceae)、禾本科 (Poaceae)、豆科 (Fabaceae)、列当科 (Orobanchaceae)、石蒜科 (Amaryllidaceae)、天门冬科 (Asparagaceae)、大戟科 (Euphorbiaceae)、蓼科 (Polygonaceae)、车前科 (Plantaginaceae)、报春花科 (Primulaceae)	47.62
泛热带分布 Pantropical distribution	2	苋科 (Amaranthaceae)、夹竹桃科 (Apocynaceae)	9.52
热带及温带分布 Tropical and temperate distribution	7	蒺藜科 (Zygophyllaceae)、白刺科 (Nitrariaceae)、紫草科 (Boraginaceae)、白花丹科 (Plumbaginaceae)、旋花科 (Convolvulaceae)、鳶尾科 (Iridaceae)、茄科 (Solanaceae)	33.33
亚热带及温带分布 Subtropical and temperate distribution	1	柽柳科 (Tamaricaceae)	4.76
温带分布 Temperate distribution	1	胡颓子科 (Elaeagnaceae)	4.76

表 2 植被调查样地的自然概况及多样性指数

Table 2 The natural profile and diversity indexes of the surveyed plots

样地 Plot No.	地理坐标 Geographical coordinates	海拔/m Altitude	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Shannon-Weiner 多样性指数 Shannon-Weiner diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
Y1	106°15'50.04"E 40°11'19.64"N	1035	0.9693	0.4528	0.9286	0.5287
Y2	106°25'41.42"E 40°19'22.21"N	1042	1.4298	0.5548	1.2006	0.6107
Y3	105°47'49.14"E 39°42'16.08"N	1024	1.3376	0.5301	1.1451	0.6083
Y4	106°25'18.83"E 40°18'58.43"N	1042	1.9888	0.7348	1.5696	0.9224
Y5	106°24'53.99"E 40°18'21.21"N	1040	1.6341	0.6923	1.4302	0.8718
Y6	106°23'26.84"E 40°18'9.18"N	1039	1.2014	0.6672	1.3848	0.7182
Y7	106°13'43.92"E 40°23'22.06"N	1029	1.0290	0.4411	1.0327	0.4976
Y8	106°14'31.34"E 40°23'14.58"N	1029	1.2594	0.5273	1.1084	0.5684
Y9	105°40'23.99"E 40°3'34.98"N	1067	2.1562	0.6983	1.6177	0.8223
Y10	106°14'17.16"E 40°21'50.38"N	1030	2.1048	0.7016	1.5746	0.8373
Y11	106°13'40.71"E 40°22'43.92"N	1030	0.6259	0.4990	0.6381	0.4359
Y12	106°14'57.34"E 40°20'46.85"N	1035	0.9438	0.5338	0.9533	0.6685

续表

样地 Plot No.	地理坐标 Geographical coordinates	海拔/m Altitude	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Shannon-Weiner 多样性指数 Shannon-Weiner diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
Y13	105°40'47.38"E 39°55'46.67"N	1029	0.6969	0.3930	0.7248	0.5323
Y14	106°13'39.91"E 40°20'53.11"N	1033	1.4450	0.6496	1.2724	0.9116
Y15	105°41'46.75"E 39°55'28.82"N	1025	1.3481	0.6834	1.2227	0.8079
Y16	105°43'24.87"E 39°48'29.42"N	1027	1.8083	0.6873	1.5671	0.7893
Y17	105°42'46.71"E 39°48'23.9"N	1020	2.0412	0.7083	1.6566	0.7731
Y18	105°43'49.58"E 39°49'58.68"N	1041	1.8701	0.6882	1.5800	0.7110
Y19	105°56'10.24"E 39°39'37.95"N	1082	1.7089	0.5760	1.3617	0.6808
Y20	105°56'58.87"E 39°39'21.89"N	1081	1.6756	0.5997	1.4019	0.7017
Y21	106°18'35.22"E 40°21'25.74"N	1032	1.1460	0.4621	0.9676	0.5605
Y22	106°18'21.55"E 40°20'55.6"N	1039	1.1501	0.6848	1.3355	0.8298
Y23	106°19'30.7"E 40°19'53.13"N	1037	1.1753	0.4744	1.0325	0.5551
Y24	105°58'57.45"E 39°42'29.18"N	1065	2.3565	0.7748	1.7799	0.8198
Y25	106°18'58.67"E 40°20'44.6"N	1039	2.8134	0.8543	2.0351	0.9450
Y26	105°59'33.3"E 39°42'52.88"N	1059	1.6147	0.5322	1.2548	0.7153
Y27	106°20'25.36"E 40°19'21.35"N	1042	0.9763	0.3885	0.9054	0.4576
Y28	106°0'55.1"E 39°43'16.35"N	1060	0.5016	0.2998	0.5201	0.5737
Y29	106°3'35.12"E 39°46'31.75"N	1046	0.6869	0.5561	0.8487	0.9571
Y30	106°12'54.23"E 39°46'40.52"N	1069	1.0697	0.6086	1.0671	0.9379
整体	—	—	7.9824	0.8158	2.1086	0.4630

### 2.3 植物群落的多样性分析

乌兰布和沙漠位于我国内陆蒙古高原,属于典型的温带荒漠干旱气候,植被结构简单、种类单一,主要分布的是旱生、超旱生、盐生的灌木(包括半灌木及小灌木),草本层以多年生和一年生草本为主。乌兰布和荒漠植物典型群落类型有:梭梭群落、白刺群落、沙冬青群落、泡泡刺群落、红砂群落、黑沙蒿群落、拧条群落、盐爪爪群落、霸王群落等。结合实地调查和精确定位,利用 MAPGIS 软件绘制了乌兰布和沙漠主要植物群落类型分布图(图 2),更直观地呈现了各植物群落的分布和面积大小,这也是乌兰布和沙漠首个主要植物群落类型分布图。根据我国植被分类系统和原则,结合样地实际调查的植物群落特征,将乌兰布和沙漠植被分为 16 个群系 35 个群丛(表 3)。这些植物群系在地理分布上没有明显的规律,乌兰布和沙漠东北部绿洲区则分布有一些芦苇群系,地下水位较浅的沙地沙丘分布有拧条锦鸡儿群系、甘蒙怪柳群系(图 2)。值得注意的是,在荒漠区分布的植物通常是矮小的灌木或者一年生草本<sup>[18]</sup>,拧条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和甘蒙怪柳属于

表 3 乌兰布和沙漠植被类型

Table 3 Vegetation types in Ulan Buhe Desert

植被型 Vegetation type	群系类型 Formation type	群丛 Community plant
温带荒漠植被 Temperate desert vegetation	芦苇群系 (Form. <i>Phragmites australis</i> )	芦苇 Ass. <i>Phragmites australis</i> 芦苇+马蔺 Ass. <i>Phragmites australis</i> + <i>Iris lactea</i> 芦苇-白刺 Ass. <i>Phragmites australis</i> - <i>Nitraria tangutorum</i>
	白刺群系 (Form. <i>Nitraria tangutorum</i> )	白刺 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> 白刺+拧条锦鸡儿 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Caragana korshinskii</i> 白刺+盐爪爪 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Kalidium foliatum</i> 白刺+沙冬青 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> 白刺-梭梭 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> - <i>Haloxylon ammodendron</i> 白刺+沙冬青-梭梭 Ass. <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> - <i>Haloxylon ammodendron</i>
	沙冬青群系 (Form. <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> )	沙冬青 Ass. <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> 沙冬青+白刺 Ass. <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> + <i>Nitraria tangutorum</i> 沙冬青+白刺-梭梭 Ass. <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> + <i>Nitraria tangutorum</i> - <i>Haloxylon ammodendron</i>
	梭梭群系 (Form. <i>Haloxylon ammodendron</i> )	梭梭 Ass. <i>Haloxylon ammodendron</i> 梭梭-白刺 Ass. <i>Haloxylon ammodendron</i> - <i>Nitraria tangutorum</i> 梭梭-白刺+沙冬青 Ass. <i>Haloxylon ammodendron</i> - <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> 梭梭-盐爪爪 Ass. <i>Haloxylon ammodendron</i> + <i>Kalidium foliatum</i>
	拧条锦鸡儿群系 (Form. <i>Caragana korshinskii</i> )	拧条锦鸡儿 Ass. <i>Caragana korshinskii</i> 拧条锦鸡儿+白刺 Ass. <i>Caragana korshinskii</i> + <i>Nitraria tangutorum</i>
	甘蒙柽柳群系 (Form. <i>Tamarix austromongolica</i> )	甘蒙柽柳 Ass. <i>Tamarix austromongolica</i> 甘蒙柽柳+黑果枸杞-盐爪爪 Ass. <i>Tamarix austromongolica</i> + <i>Lycium ruthenicum</i> - <i>Kalidium foliatum</i>
	红砂群系 (Form. <i>Reaumuria songarica</i> )	红砂 Ass. <i>Reaumuria songarica</i>
	盐爪爪群系 (Form. <i>Kalidium foliatum</i> )	盐爪爪 Ass. <i>Kalidium foliatum</i> 盐爪爪-白刺 Ass. <i>Kalidium foliatum</i> + <i>Nitraria tangutorum</i> 盐爪爪-梭梭 Ass. <i>Kalidium foliatum</i> + <i>Haloxylon ammodendron</i> 盐爪爪-柽柳+黑果枸杞 Ass. <i>Kalidium foliatum</i> + <i>Tamarix austromongolica</i> + <i>Lycium ruthenicum</i>
	灌木亚菊群系 (Form. <i>Ajania fruticulosa</i> )	灌木亚菊 Ass. <i>Ajania fruticulosa</i>
	刺旋花群系 (Form. <i>Convolvulus tragacanthoides</i> )	刺旋花 Ass. <i>Convolvulus tragacanthoides</i>
	泡泡刺群系 (Form. <i>Nitraria sphaerocarpa</i> )	泡泡刺 Ass. <i>Nitraria sphaerocarpa</i>
	霸王群系 (Form. <i>Zygophyllum xanthoxylum</i> )	霸王 Ass. <i>Zygophyllum xanthoxylum</i>
	黑沙蒿群系 (Form. <i>Artemisia ordosica</i> )	黑沙蒿 Ass. <i>Artemisia ordosica</i>
	沙拐枣群系 (Form. <i>Calligonum mongolicum</i> )	沙拐枣 Ass. <i>Calligonum mongolicum</i> 沙拐枣+细枝羊柴 Ass. <i>Calligonum mongolicum</i> + <i>Corethrodedron scoparium</i>
	马蔺群系 (Form. <i>Iris lactea</i> )	马蔺 Ass. <i>Iris lactea</i> 马蔺+芦苇 Ass. <i>Iris lactea</i> + <i>Phragmites australis</i>
	尖叶盐爪爪群系 (Form. <i>Kalidium cuspidatum</i> )	尖叶盐爪爪 Ass. <i>Kalidium cuspidatum</i>

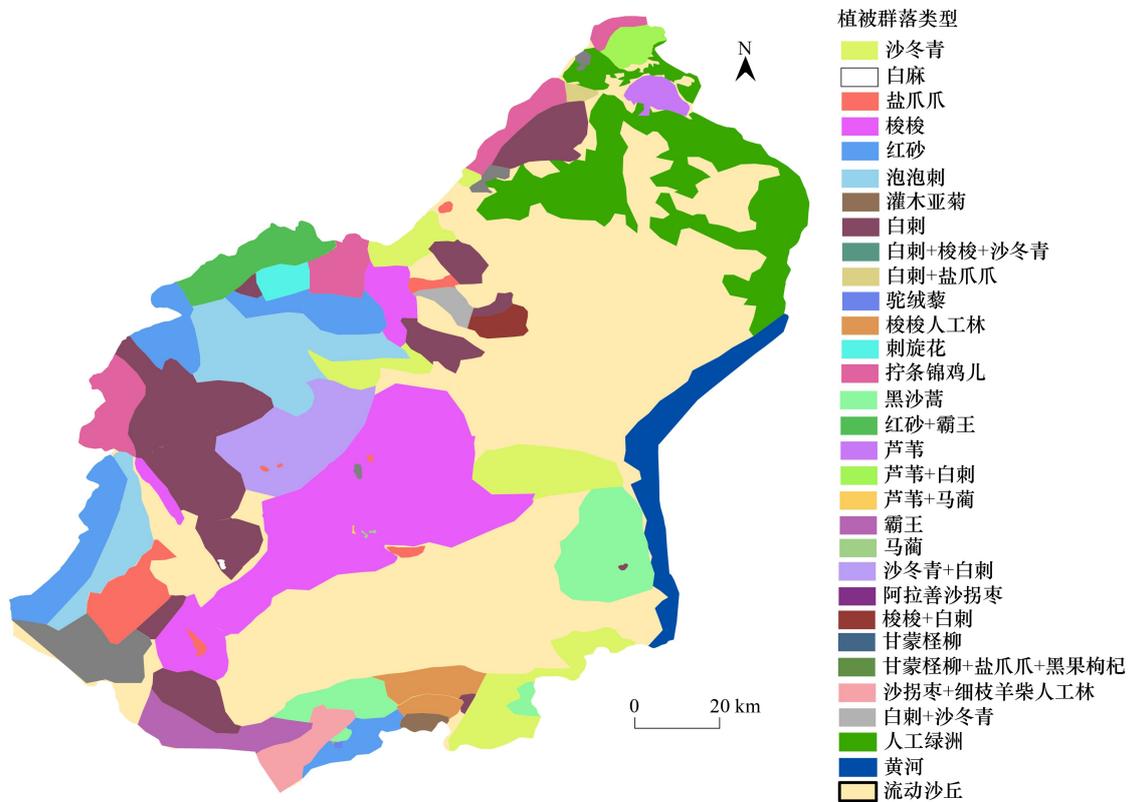


图2 乌兰布和沙漠植物群落类型分布图

Fig.2 Distribution map of plant community types in Ulan Buhe Desert

相对较为高大的灌木,这表明绿洲对周围的环境有一定的影响,造成了这部分地区的物种及分布格局的独特性。从植物群落的面积来看,分布面积最大的是梭梭群系,全区分布约 1728.24 km<sup>2</sup>,其次为白刺群系约 1278.27 km<sup>2</sup>,沙冬青群系约 746.79 km<sup>2</sup>,泡泡刺群系约 724.12 km<sup>2</sup>,红砂群系约 673.11 km<sup>2</sup>,分别占乌兰布和沙漠总面积的 17.28%、12.78%、7.47%、7.24%和 6.73%,这 5 个群系总面积超过乌兰布和沙漠面积的一半,达到 51.50%,表明这些灌木种类对乌兰布和沙漠环境具有较强的生态适应性。

群落垂直结构,一般指群落中的物种在垂直空间上的高低不同而分层的现象。这种结构是植物长期适应其所在自然环境导致,也是自然选择的结果,可以显著提高植物利用空间环境资源的能力。在乌兰布和沙漠,由于气候干燥少雨,没有天然乔木分布,主要以沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus*)、白刺、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、拧条锦鸡儿等灌木和一些多年生及一年生草本组成的干旱荒漠植被。从高度上看,植物群落垂直结构分为 3 层,第 1 层高度一般为 30—305 cm,以沙冬青、拧条锦鸡儿、细枝羊柴 (*Corethroedendron scoparium*)、梭梭、怪柳 (*Tamarix chinensis*)、红砂 (*Reaumuria songarica*)、黄花红砂 (*Reaumuria trigyna*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*)、白刺、黑沙蒿 (*Artemisia ordosica*)、驼绒藜 (*Krascheninnikovia ceratoides*) 为主;第 2 层高度范围在 15—30 cm,主要以戈壁针茅 (*Stipa tianschanica* var. *gobica*)、无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)、三芒草 (*Aristida adscensionis*)、蛛丝蓬 (*Halogeton arachnoideus*)、沙地韭 (*Allium sabulosum*)、砂珍棘豆 (*Oxytropis racemosa*)、猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、刺旋花 (*Convolvulus tragacanthoides*) 为主;第 3 层高度为 1—15 cm,主要是地锦草 (*Euphorbia humifusa*)、蝎虎驼蹄瓣 (*Zygophyllum mucronatum*)、蒺藜 (*Tribulus terrestris*)、画眉草 (*Eragrostis pilosa*)、砂蓝刺头 (*Echinops gmelinii*)、狗娃花 (*Aster hispidus*)、盐生车前等。

#### 2.4 绿洲及荒漠区植被地上生物量差异

乌兰布和沙漠绿洲区和荒漠区植被地上生物量情况如图 3 所示,绿洲区样地 OY1—OY5 的植被地上生物量分别为 (365.84±174.91) g/m<sup>2</sup>、(103.18±24.45) g/m<sup>2</sup>、(469.33±282.88) g/m<sup>2</sup>、(113.67±73.24) g/m<sup>2</sup> 和

( $73.78 \pm 39.29$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ , 荒漠区样地 DY1—DY5 的植被地上生物量分别为 ( $39.49 \pm 22.42$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ 、( $24.00 \pm 10.15$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ 、( $135.63 \pm 24.72$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ 、( $36.54 \pm 11.39$ )  $\text{g}/\text{m}^2$  和 ( $2.68 \pm 1.15$ )  $\text{g}/\text{m}^2$ ; 秩和检验 (Wilcoxon test) 结果表明绿洲区植被地上生物量极显著高于荒漠区 ( $P=0.0001$ )。

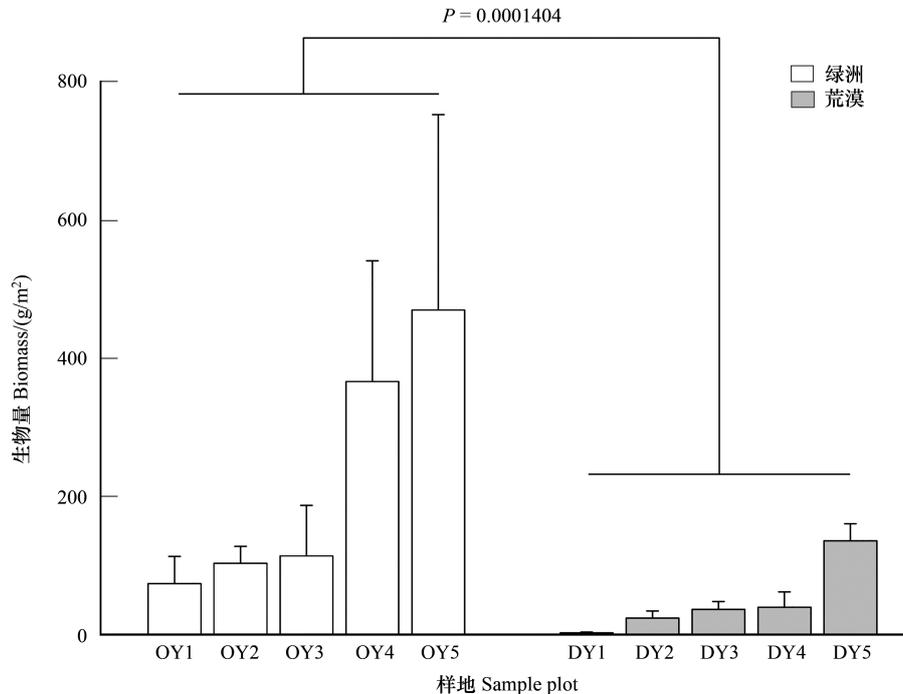


图 3 绿洲区和荒漠区植被地上生物量

Fig.3 The aboveground biomass of vegetation in oasis area and desert area

## 2.5 绿洲及荒漠区土壤养分的差异

绿洲区及荒漠区的各 5 个样地 6 个不同土壤剖面深度的养分指标检测结果显示 (表 4), 同一土壤养分指标在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 各土层大多没有显著性差异 ( $P$  值均大于 0.05), 仅 80—100 cm 土层深度中, 绿洲区的全钾含量与荒漠区存在显著差异 ( $P=0.0367$ )。上述结果表明目前乌兰布和沙漠绿洲区和荒漠区在土壤养分指标上基本没有显著差异。

## 3 讨论

### 3.1 乌兰布和沙漠植物物种组成及多样性

作为生物多样性的重要组成部分, 植物多样性在维持群落生态系统功能及其稳定性中起着至关重要的作用<sup>[30]</sup>, 是植物群落维持生态系统稳定的基础<sup>[31]</sup>。群落中的物种多样性可直接反映出群落的结构特征。对乌兰布和沙漠区 30 个样地 152 个样方的调查结果显示, 所有样方中出现的植物种类共有 94 种, 隶属于 21 科 58 属, 物种多为菊科、禾本科、苋科、豆科等, 不同样方中的优势种主要是菊科的黑沙蒿、白沙蒿; 禾本科的沙鞭、芨芨草、三芒草、芦苇; 苋科的沙蓬、虫实、雾冰藜、蛛丝蓬、猪毛菜、盐爪爪等; 豆科的沙冬青、拧条锦鸡儿等, 这些植物大都是典型的旱生或者超旱生植物, 具有植株矮小、根系发达、叶片小或者变厚、角质层发达、植株多绒毛等适应干旱的典型特征。有些植物如沙蓬、虫实、雾冰藜、蛛丝蓬、猪毛菜等是裸露沙地上的先锋植物, 具有结实量大, 借风传播, 仅需少量水分就能快速萌发生长等特点, 形成了特殊的单一植物的植物群落景观。本研究调查获得的植物种类信息与已有的研究结果相似<sup>[20]</sup>, 乌兰布和沙漠区植物区系属于典型的亚洲荒漠植物类型, 植物的优势科比如菊科、禾本科、豆科等绝大部分都为世界广布科。乌兰布和沙漠区气候方面的严酷性, 国家气象科学数据中心的公开数据显示该区域最湿润季平均降水 80.86 mm, 最干旱季平均降水 4.12 mm, 很多植物很难适应如此严峻的干旱少雨、蒸发量大的气候特点, 只有那些世界广布性的大科中的一些物种才

表 4 绿洲区和荒漠区不同土层土壤养分指标  
Table 4 Soil nutrients indexes relative to soil layer in oasis area and desert area

区域 Area	土层/ Soil layer/cm	含氮量 Nitrogen content/%	有机碳含量 Organic carbon content/%	有机质含量 Organic matter content/%	全磷含量 Total phosphorus content/ (g/kg)	速效磷含量 Available phosphorus content/ (mg/kg)	速效钾含量 Available potassium/ (mg/kg)	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzed nitrogen content/%	全钾含量 Total potassium content/%
绿洲区	0—10	0.0364±0.0049	0.0990±0.0203	0.1707±0.0349	0.2308±0.0860	4.3400±1.6846	110.3055±36.1105	0.0101±0.0037	1.8635±0.2377
Oasis area	10—20	0.0445±0.0136	0.1400±0.1061	0.2414±0.1829	0.2202±0.1011	4.6600±1.3885	92.3269±45.8988	0.0073±0.0053	1.9116±0.1183
	20—40	0.0361±0.0119	0.0987±0.0633	0.1701±0.1091	0.2397±0.1500	5.0200±2.9626	79.0232±36.1947	0.0053±0.0016	1.9060±0.1331
	40—60	0.0343±0.0060	0.1050±0.0483	0.1809±0.0833	0.2512±0.1675	3.3000±1.4782	79.1831±35.9718	0.0092±0.0050	1.9106±0.1100
荒漠区	60—80	0.0332±0.0052	0.0969±0.0384	0.1671±0.0661	0.2271±0.1325	3.6400±1.3975	70.2681±34.5114	0.0062±0.0044	1.9070±0.1825
	80—100	0.0352±0.0063	0.0978±0.0345	0.1686±0.0594	0.2537±0.1679	4.3600±1.6861	77.5762±35.0441	0.0095±0.0051	1.8380±0.1399 <sup>a</sup>
Desert area	0—10	0.0449±0.0274	0.0828±0.0517	0.1428±0.0891	0.1804±0.0282	2.9400±0.9182	177.6351±150.6283	0.0132±0.0121	1.8815±0.0635
	10—20	0.0345±0.0059	0.0523±0.0089	0.0902±0.0153	0.1679±0.0387	3.0200±1.0183	133.7975±79.1910	0.0199±0.0178	1.8199±0.0478
绿洲区	20—40	0.0333±0.0054	0.0465±0.0142	0.0801±0.0245	0.1388±0.0211	3.2400±1.6547	122.4810±61.9377	0.0189±0.0194	1.9093±0.1724
	40—60	0.0362±0.0094	0.0483±0.0093	0.0833±0.0160	0.1414±0.0206	4.0000±2.6693	129.9123±75.5381	0.0067±0.0044	1.9417±0.2061
	60—80	0.0329±0.0027	0.0642±0.0195	0.1106±0.0337	0.1586±0.0510	2.6600±1.2422	123.0532±76.0466	0.0079±0.0031	1.8969±0.1668
	80—100	0.0347±0.0068	0.0604±0.0234	0.1041±0.0404	0.1609±0.0725	2.6400±1.1803	133.7561±90.9284	0.0104±0.0088	1.9482±0.1678 <sup>b</sup>

数值的上标小写字母(a,b)不同表示具有显著性差异( $P<0.05$ )

能适应在乌兰布和沙漠生存,并占一定优势。研究区域的植物生活型只有灌木和草本两类,灌木和多年生草本占物种总量的 76.40%,是群落结构中相对稳定的部分,一年生草本受降雨及其他环境因子影响大,为群落结构中的不稳定成分。与乌兰布和沙漠属于同一植物区系范围内的新疆的塔里木河流域和内蒙的额济纳旗分布有胡杨等乔木,但乌兰布和沙漠样地范围内并没有发现乔木种类,可能与胡杨分布的这些地区都是河流两岸及有较浅的地下水有关,而乌兰布和沙漠区除了东部地区靠近黄河之外,其腹地并没有河流,且地下水位深(荒漠区流动沙地和半固定沙地地下水埋深达 10.0—11.5 m)<sup>[32]</sup>,并不适合乔木生长。

在本研究 30 个样地中, Margalef 丰富度、Shannon-Wiener 多样性、Pielou 均匀度和 Simpson 多样性 4 个指数的平均值都比较小,总体来说植物多样性水平较低。有研究表明,腾格里沙漠东南边缘沙区和内蒙雅布赖风沙区植物群落 Shannon-Wiener 指数分别在 0.60—1.63 之间和 0.23—1.09 之间<sup>[3, 33]</sup>;新疆的库姆塔格沙漠东南缘沙区和阜康绿洲荒漠过渡带植物群落 Shannon-Wiener 指数分别在 0.08—1.71 之间和 0.48—1.57 之间<sup>[34—35]</sup>。相比而言,乌兰布和沙漠地区的植物群落多样性比上述几个荒漠地区较高一些(30 个样地的 Shannon-Wiener 指数在 0.5201—2.0351 之间),可能与乌兰布和近十多年来的人工造林和东北部人工绿洲的影响有关。但大部分荒漠区植被的多样性水平普遍较低,这与荒漠严酷的生态环境条件有关。30 个样地的物种丰富度差异较为明显,有些仅仅只有 1 个物种,有些物种多达 17 种。Shannon-Wiener 多样性指数在 30 个样地中差异也比较明显,这也与物种丰富度指数一致,Shannon-Wiener 多样性指数最高的样地中每个样方中物种数都在 10 种以上。此外,各个样地植物群落的多样性指数的变化趋势基本一致,即样方内物种种类组成较多,且各物种的数量差异不显著时,这 4 个多样性指数的数值表现较高,相反,样方内物种组成较为单一,各指数值则较低。乌兰布和沙漠区包括了西部、西北部、西南部和南部的自然植被区,也包含东北部的绿洲及周边区域,令人意外的是,绿洲样地中植物种类及多样性并不是 30 个样地中最高的,这可能与绿洲外围防护林等人工造林有关,这些林带形成了一定的防风带,阻止沙丘流动的同时也可能降低了靠风来传播种子的植物的扩散能力,因此绿洲区的植物多样性反而不是最高的。

### 3.2 乌兰布和沙漠的植物群落特征及多样性

一般而言,在植物学、生态学上对某一地区的植被进行分类主要依靠植物群落的自身特点来划分,常以《中国植被》中的分类系统为参考<sup>[28]</sup>。在以往乌兰布和沙漠区的植物群落研究中,乌拉等就是采用这种传统分类方法将乌兰布和沙漠植被划分为梭梭、柠条、白刺和黑沙蒿等 9 个群丛<sup>[36]</sup>,马全林等应用数量分类方法将乌兰布和沙漠植被划分为 30 个群落类型<sup>[20]</sup>。本研究基于大量调查数据资料及精确定位,首次绘制了乌兰布和沙漠植物群落分布图(图 2),另外根据植物群落特征将乌兰布和沙漠植被类型划分为 16 个群系 35 个群丛。我们划分的主要群落类型与乌拉等传统分类划分结果及马全林等数量分类结果基本一致,但本研究的群落分类类型划分到群丛级别,相比较来说更为精细,同时,还有较多草本植物群落类型。35 个群丛在地理分布上看主要集中在乌兰布和沙漠区的西部、西南和南部,有趣的是,这些分布有天然植被的区域靠近内陆,气候也更为干燥,而在相对地下水位较高且较为湿润的中部和东部黄河西岸附近却是大片的沙漠区,几乎没有植物。实际调查发现,这些大片的沙漠区为大面积的流动沙丘,虽然距离黄河较近,但是由于乌兰布和沙漠气候干燥,降雨极少,再加上风吹流沙反复掩埋和翻动植物种子,植物很难在此区域扎根,因此,此区的风沙治理很难依赖于植物自然扩张和演替,需要人工先将流动沙丘固定,植物才能进一步扎根定植。马全林等研究认为乌兰布和沙漠区的盐爪爪、马蔺、柽柳和芦苇群落生境对应较高的土壤水分、盐分和粘粒含量,属于小生境群落<sup>[20]</sup>,我们调查发现在乌兰布和沙漠东北部分布的芦苇群丛、柽柳群丛、柠条群丛的植物植株相对较为高大,与其他群丛的植物群组成有较大的差别,推测主要是受东北部绿洲的小气候(绿洲区干燥度比荒漠区低,荒漠区平均干燥度为 7.934,绿洲区平均干燥度为 7.198)和局部地下水位较高的影响。

### 3.3 乌兰布和沙漠不同环境条件下的自然植被生物量差异及影响因素

环境条件对其周边自然植被的影响不仅体现在物种组成,同时也体现在生物量的差异,尤其是干旱荒漠环境中由于水分条件的限制,物种组成和生物量极为有限,以阜康荒漠-绿洲过渡带为例,荒漠植物覆盖度相

对较低,平均只有 25%,且鲜重与干重差异巨大,这是荒漠植物适应干旱环境的结果,与其特殊的水文、土壤环境条件密切相关<sup>[37]</sup>。从地上生物量的比较结果显示,乌兰布和沙漠绿洲区植被地上生物量却显著高于荒漠区,造成这种现象的原因之一可能是绿洲区相对有较浅的地下水位(地下水埋深介于 1—4 m)<sup>[32,38]</sup>,土壤含水量相对较高(绿洲区土壤含水量为 14.90%—18.10%<sup>[39]</sup>,本实验室测定的该区域荒漠区土壤含水量在 0.81%—1.60%),一旦植物在此区域扎根,由于水分条件较充足,植物生长旺盛,植株较高大,因此生物量更高。荣浩等研究表明荒漠草原地上生物量与土壤含水量间呈正相关关系<sup>[40]</sup>,王涛<sup>[41]</sup>的研究也表明绿洲化进程中生物(生态)效应主要表现为植被盖度和地上、地下生物量增加。

### 3.4 乌兰布和沙漠不同环境条件下的土壤养分差异及影响因素

土壤为植物提供必要的物质基础,植被类型与土壤性质密切相关,因此,土壤环境对植物的类型及分布具有重要影响,反过来植被的变化也必将影响土壤性质<sup>[42—43]</sup>。有研究表明植被在一定程度上不仅会影响土壤理化性质,还会由于死亡根系和枯枝落叶的累积、分解以及转化改变土壤养分含量,改善土壤质量<sup>[44—45]</sup>。对乌兰布和沙漠绿洲区和荒漠区的土壤养分比较发现,尽管绿洲区的植被地上生物量比荒漠区的高,但是土层深度在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 各层的土壤养分大多没有显著差异。这些现象表明可能乌兰布和沙漠区域常年风沙较大,一部分枯枝落叶被风吹走,并没有完全进入土壤形成腐殖质。另外,植被对土壤的改良是一个与土壤微生物互作的漫长过程,因此,绿洲对乌兰布和沙漠区的土壤养分各指标值的影响并不一致,绿洲区植物对土壤养分的影响在短期内并未显现,在短期内绿洲对周边荒漠区的生态影响效应主要体现在生物量和少数土壤养分参数上的差异。绿洲是荒漠中某些地理位置形成特殊的生境类型,因此比较分析绿洲区及荒漠区样地的物种、生物量及土壤养分,对了解绿洲对沙漠的生态影响具有重要意义。从长远看,要判断绿洲的建设对植物群落物种组成影响是正向还是负向,是否能够改良周边土壤等都需要在这些地区选取固定样地进行长期监测与评估。

## 4 结论

乌兰布和沙漠区内共记录 94 种植物,隶属于 21 个科 58 属。优势科为世界分布的菊科、禾本科和苋科等大型科;从群落中植物株数来看,苋科植物最多,占全部物种数量的 64.20%。

本研究绘制了首张乌兰布和沙漠全区植物群落分布图,群落类型包括 16 个群系 35 个群丛,分布面积最大的前 5 个群系是梭梭群系、白刺群系、沙冬青群系、泡泡刺群系及红砂群系,共占乌兰布和沙漠总面积 51.50%,表明以这些灌木最适应此区自然环境。

乌兰布和沙漠区的植物群落多样性水平较低,这主要归因于此区域严酷的生态环境。绿洲区植物多样性并没表现出更高的水平,但在植被地上生物量上与荒漠区的差异达到了显著水平。整体上看,绿洲区和荒漠区的土壤养分指标间基本不存在显著性差异。因此,乌兰布和沙漠东部流动沙丘区域防风固沙治理需要结合自然地貌特征及植物习性因地制宜,而绿洲对周围区域的生态影响需要通过长期监测来评估。

### 参考文献 (References):

- [1] 高苏日固嘎, 斯琴朝克图, 乌兰图雅, 赛西雅拉图, 张卫青, 美丽. 克氏针茅草原群落物种多样性与生物量关系对放牧强度的响应. 生态学报, 2022, 42(23): 9736-9746.
- [2] 宋兆斌, 辛智鸣, 朱雅娟. 内蒙古荒漠-草原过渡带灌木群落特征. 中国沙漠, 2022, 42(2): 104-112.
- [3] 司建华, 冯起, 常宗强, 王耀斌, 田永祯, 谢宗才, 高立平. 阿拉善雅布赖风沙区荒漠植物群落结构和物种多样性研究. 西北植物学报, 2011, 31(3): 602-608.
- [4] 梁铭忠, 蒋忠诚, 沈利娜, 徐淑庆. 广西龙虎山植物功能群物种多样性垂直格局. 中国岩溶, 2011, 30(3): 308-312.
- [5] 张君诚, 宋育红, 张钦增, 陈作毅, 张杭颖. 珍贵药材黄花倒水莲的群落结构及物种多样性研究. 植物遗传资源学报, 2012, 13(5): 819-824.
- [6] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 褚建民, 袁祺, 甘红豪, 赵帅, 陈加伟, 徐晓庆. 浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释. 中国沙漠, 2021, 41(6): 65-77.
- [7] 于潇, 刘金银, 于应文. 封育对兰州北部荒漠化草原植被构成及物种多样性的影响. 云南农业大学学报: 自然科学, 2022, 37(4):

672-678.

- [ 8 ] 陈瑶, 李云红, 邵英男, 刘玉龙, 刘延坤. 阔叶红松林物种多样性与土壤理化特征研究. 生态环境学报, 2022, 31(4): 679-687.
- [ 9 ] 管诗敏, 郑心炫, 吴雅华, 李岩林, 杨桂梅, 杨钰华, 王伟耀, 黄柳青. 平潭岛海岸自然植被物种和功能多样性特征. 西南林业大学学报: 自然科学, 2021, 41(6): 71-78.
- [ 10 ] 卢建男, 刘凯军, 王瑞雄, 李彦杰, 宁志英, 陈雪萍, 赵思腾, 王少昆, 赵学勇. 中国荒漠植物-土壤系统生态化学计量学研究进展. 中国沙漠, 2022, 42(2): 173-182.
- [ 11 ] 赵哈林. 沙漠生态学. 北京: 科学出版社, 2012.
- [ 12 ] 董雪, 辛智鸣, 段瑞兵, 黄雅茹, 菅凯敏, 马海峰. 乌兰布和沙漠典型灌木群落多样性及其生态位. 干旱区研究, 2020, 37(4): 1009-1017.
- [ 13 ] 李映坤, 李锦荣, 董雷, 罗祥英, 韩兆恩, 王茹. 乌兰布和沙漠周边典型植物群落防风阻沙效果. 中国沙漠, 2022, 42(6): 65-73.
- [ 14 ] Li J Q, Li Z L, Dong S P, Wei M H, Zhou J Y. Spatial and temporal changes in vegetation and desertification (1982-2018) and their responses to climate change in the Ulan Buh Desert, Northwest China. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143(3): 1643-1654.
- [ 15 ] 董丝雨. 努力创造新时代中国防治荒漠化新奇迹——写在第二十九个世界防治荒漠化与干旱日到来之际. 人民日报, 2023-06-17(4) [2023-12-21]. [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2023-06/17/nw.D110000renmrb\\_20230617\\_1-04.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2023-06/17/nw.D110000renmrb_20230617_1-04.htm).
- [ 16 ] 周建秀, 刘志宁, 谷雨, 李静. 黄河西岸乌兰布和沙漠综合治理区生态环境状况及动态变化. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 28-34.
- [ 17 ] 苏从先, 胡隐樵. 绿洲和湖泊的冷岛效应. 科学通报, 1987, 32(10): 756-758.
- [ 18 ] 马媛, 刘芳, 郝玉光, 蔺方春, 刘宇婷, 刘亚楠, 杨战, 王嘉鹏. 乌兰布和沙漠典型植被群落生长特性. 温带林业研究, 2021, 4(2): 19-24, 53.
- [ 19 ] 王佳庭, 于明含, 杨海龙, 吴其淦, 刘泰含. 乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1543-1550.
- [ 20 ] 马全林, 张德奎, 袁宏波, 郑庆钟, 丁峰, 张锦春, 魏怀东, 靳虎甲, 刘有军, 孙涛, 王继和. 乌兰布和沙漠植被数量分类及环境解释. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 160-167.
- [ 21 ] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 边凯, 郝玉光, 刘芳. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征. 农业工程学报, 2019, 35(4): 145-152.
- [ 22 ] 贾鹏, 王乃昂, 程弘毅, 李卓仑, 宁凯, 张洵赫, 梁晓燕, 牛震敏. 基于3S技术的乌兰布和沙漠范围和面积分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 131-138.
- [ 23 ] 张正国. 干旱区灌木地上生物量估测[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.
- [ 24 ] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen—total//Page A L, Miller R H, Keeney D R eds. Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy. 1982.
- [ 25 ] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter//Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH eds. Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods. Madison: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. 1996, 961-1010.
- [ 26 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 27 ] Hill M O. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. Ecology, 1973, 54(2): 427-432.
- [ 28 ] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [ 29 ] 刘芳. 乌兰布和沙区的植物资源. 内蒙古师大学报: 自然科学汉文版, 2000, 29(3): 215-220.
- [ 30 ] Kuiters A T. Diversity-stability relationships in plant communities of contrasting habitats. Journal of Vegetation Science, 2013, 24(3): 453-462.
- [ 31 ] 王晓悦, 许艺馨, 李春环, 余海龙, 黄菊莹. 长期降水量变化下荒漠草原植物生物量、多样性的变化及其影响因素. 植物生态学报, 2023, 47(4): 479-490.
- [ 32 ] 田有亮, 何炎红, 郭连生. 乌兰布和沙漠东北部土壤水分植被承载力. 林业科学, 2008, 44(9): 13-19.
- [ 33 ] 孔丽娟, 沈吉庆. 腾格里沙漠东南边缘植物群落物种多样性分析. 宁夏农学院学报, 2003, 24(4): 25-28, 41.
- [ 34 ] 张林静, 岳明, 张远东, 顾峰雪, 潘晓玲, 赵桂仿. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性特征. 地理科学, 2003, 23(3): 329-334.
- [ 35 ] 张锦春, 王继和, 赵明, 刘虎俊, 廖空太, 徐先英. 库姆塔格沙漠南缘荒漠植物群落多样性分析. 植物生态学报, 2006, 30(3): 375-382.
- [ 36 ] 乌拉. 乌兰布和沙漠植被及其保护. 陕西林业科技, 2007(4): 133-137.
- [ 37 ] 霍举颂, 刘卫国, 刘建国, 李宏侠, 徐悦, 玛丽娅·奴尔兰. 影响阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物数量特征的土壤驱动力分析. 生态学报, 2017, 37(24): 8304-8313.
- [ 38 ] 李清河, 赵英铭, 江泽平, 王志刚. 乌兰布和沙漠东北部天然植被动态及生态用水量研究. 水土保持学报, 2006, 20(5): 146-149.
- [ 39 ] 曹琪琪. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化进程中土壤性质演变特征及影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [ 40 ] 荣浩, 何京丽, 张欣, 张林, 杨红艳. 荒漠草原不同植被恢复模式地上生物量与土壤水分的关系. 草原与草坪, 2018, 38(5): 71-76.
- [ 41 ] 王涛. 我国绿洲化及其研究的若干问题初探. 中国沙漠, 2010, 30(5): 995-998.
- [ 42 ] 曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系. 草业学报, 2003, 12(1): 18-22.
- [ 43 ] 欧阳学军, 黄忠良, 周国逸, 褚国伟, 李炯, 史军辉, 徐国良. 鼎湖山亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究. 水土保持学报, 2003, 17(4): 51-54.
- [ 44 ] Song X Z, Peng C H, Zhou G M, Jiang H, Wang W F. Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil organic carbon levels: a meta-analysis. Scientific Reports, 2014, 4: 4460.
- [ 45 ] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. CATENA, 2011, 85(1): 58-66.