

腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分特征

唐国栋^{1,2}, 葛楠^{1,2}, 张铁军^{1,2}, 郭建英^{1,2}, 刘艳萍^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学
观测研究站, 北京 100038; 2.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 研究腾格里沙漠东北缘 1992 年飞播造林区主要植物群落土壤水分特征, 为区域人工固沙植被合理建设与管理提供理论依据。[方法] 采用环刀法测定研究区 4 种不同植物群落不同坡位 200 cm 深度土壤含水量, 分析其土壤水分分布、变异性及土壤贮水亏缺度。[结果] ①不同植物群落土壤平均含水量呈现: 花棒群落(0.57%) > 沙拐枣群落(0.55%) > 花棒 + 沙拐枣群落(0.51%) > 沙拐枣 + 花棒群落(0.51%), 花棒群落土壤含水量与花棒 + 沙拐枣群落和沙拐枣 + 花棒群落之间具有显著差异($p < 0.05$), 不同坡位平均土壤含水量均呈现出: 坡底 > 坡中 > 坡顶的趋势。花棒和沙拐枣组合的植被群落土壤水分垂直变异性以及随坡位的变异性小于花棒群落和沙拐枣群落。②不同植物群落 200 cm 深度土壤总贮水量变化范围为 15.45~17.79 mm, 土壤贮水量随土层深度变化趋势与土壤含水量一致。③不同植物群落土壤贮水亏缺度呈现: 花棒 + 沙拐枣群落(97.74%) > 沙拐枣 + 花棒群落(97.62%) > 花棒群落(97.48%) > 沙拐枣群落(97.44%)。[结论] 研究区土壤含水量偏低, 不足 1%, 丘间低地大于坡中和坡顶, 垂向随土层深度增大, 花棒和沙拐枣组合的植物群落土壤含水量垂直变异性更低。因此, 花棒和沙拐枣组合的植物群落能够更大程度利用不同土层土壤水分, 整体水分吸收和利用效率更高, 对于干旱环境的适应性更强。

关键词: 飞播; 植物群落; 土壤水分特征; 腾格里沙漠东北缘

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0010-08

中图分类号: S715.3

文献参数: 唐国栋, 葛楠, 张铁军, 等. 腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 10-17. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.002; Tang Guodong, Ge Nan, Zhang Tiejun, et al. Soil water characteristics of different aerial-seeded plant communities at northeastern edge of Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 10-17.

Soil Water Characteristics of Different Aerial-seeded Plant Communities at Northeastern Edge of Tengger Desert

Tang Guodong^{1,2}, Ge Nan^{1,2}, Zhang Tiejun^{1,2}, Guojian Ying^{1,2}, Liu Yanping^{1,2}

(1. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] Soil water characteristics of different plant communities at different slope positions on aerial-seeded afforestation areas in 1992 were studied at the northeastern edge of the Tengger Desert in order to provide a theoretical basis for the rational construction and management of an artificial sand fixation vegetation system in the arid desert areas of Northwest China. [Methods] Soil water contents at the depth of 200 cm for different plant communities at different slope positions were measured using the ring knife method. The water distribution, variability and water storage deficit of soil were analyzed. [Results] ① The average soil water contents of different plant communities followed the order of *Hedysarum scoparium* community (0.57%) > *Calligonum mongolicum* community (0.54%) > *H. scoparium* + *C. mongolicum* community (0.51%) > *C. mongolicum* + *H. scoparium* community (0.51%). There was a significant

收稿日期: 2023-06-27

修回日期: 2023-09-11

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“黄河流域腾格里沙漠飞播造林区水资源高效利用新业态技术研究”(2022YFHH0096); 中国水科院基本科研业务费项目(MK2021J12); 阿拉善左旗 2020 年飞播造林科技支撑项目(MK0199B012021)

第一作者: 唐国栋(1991—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 工程师, 主要从事荒漠化防治、干旱半干旱区生态水文方面的研究。Email: 18247158690@163.com。

difference ($p < 0.05$) between the *H. scoparium* and the *H. scoparium* + *C. mongolicum* communities, as well as the *C. mongolicum* + *H. scoparium* community. The average soil water contents at different slope positions followed the order of bottom slope > middle slope > top slope. The vertical variability of soil water in the two combined communities of *H. scoparium* and *C. mongolicum*, and its variability with slope position were significantly smaller than the vertical variability of soil water in the *H. scoparium* and *C. mongolicum* communities. ② The variation range of total soil water storage in different plant communities was between 15.45 mm and 17.79 mm, and the trend of soil water storage with soil depth was consistent with soil water content. ③ Soil water storage deficits for the different plant communities followed the order of *H. scoparium* + *C. mongolicum* community (97.74%) > *C. mongolicum* + *H. scoparium* community (97.62%) > *H. scoparium* community (97.48%) > *C. mongolicum* community (97.44%). [Conclusion] Soil water content was relatively low (less than 1%). Soil water content at the bottom of the sand dune was greater than at the middle slope and top slope positions, and soil water content increased with soil depth. The vertical variability of soil water content in the *H. scoparium* and *C. mongolicum* combined communities was lower than the soil water content of the single species communities. Therefore, a plant community comprised of a combination of *H. scoparium* and *C. mongolicum* can utilize soil water to a greater extent, has greater water absorption, and uses soil water more efficiently. These combination plant communities are better adapted to arid environments.

Keywords: aerial seeding; plant communities; soil water characteristics; the northeastern edge of Tengger Desert

腾格里沙漠是中国沙尘暴源区之一,区域自然条件复杂多变,气候干旱,植被稀少,风沙活动强烈,是典型的生态脆弱区,也是我国风沙防治的重点地区^[1]。飞播造林具有速度快、省劳力、成本低、范围广等特点,是人烟稀少,人工造林困难的干旱荒漠区生态修复与植被重建最直接有效的措施^[2]。自20世纪80年代初,为了有效遏制沙漠边缘扩张,在腾格里沙漠东北缘实施了大规模的飞播造林,迅速提高了腾格里沙漠东北缘的植被覆盖度^[3-4]。然而,同一播区随时间推移植物群落的组成与分布格局发生分异,且部分飞播区域植被出现了非自然衰退甚至死亡现象。研究^[5-7]表明土壤水分作为干旱荒漠区植被重建的主要制约因子,对干旱荒漠区生态系统构建、土壤侵蚀和小气候变化等过程有着重要的影响。陈嘉嘉等^[8]对腾格里沙漠人工植被区不同植被类型土壤水分变化特征研究发现,植被分布显著影响土壤水分的时空分布规律,降水对不同植被群落覆盖的土壤水分的影响均随土层深度增加逐渐降低。顾梦鹤等^[9]对库布齐沙漠8种人工防护林的土壤水分特征研究发现,在地理环境、土壤质地和水分条件都一致情况下,不同配置防护林的土壤水分有着较大差异。付华等^[10]对腾格里沙漠东南缘白沙蒿飞播区土壤水分研究发现,适宜的飞播密度可通过对土壤水分的合理调节和利用有效延长飞播林地的利用年限。该研究区1992年实施飞播造林,播种方式为花棒和沙拐枣混播,经过30 a的恢复,植被覆盖度由小于5%提高至22%,沙

丘由流动沙丘发育为固定沙丘^[2],植物群落组成为花棒群落、沙拐枣群落和两者的混合群落。本研究通过分析不同植物群落雨季前土壤水分细尺度分布特征,揭示不同植物群落土壤水分差异及其贮水亏缺度,旨在为干旱荒漠区飞播造林植被配置模式优化及退化植被系统修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东北缘,行政区划隶属于阿拉善左旗(39°11′—39°18′N,104°53′—104°57′E),土壤类型以非地带性风沙土为主,属于典型的中温带干旱荒漠区。年平均降水量在100~200 mm之间,降水主要集中在6—9月;年平均气温为9.1℃,最高气温可达36.1℃,最低气温为-22.4℃;该地区风力强劲,风沙活动强烈,年平均风速为1.9 m/s,主风向为西北风^[11]。主要群落组成为飞播植物种花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*),伴生有蒙古韭(*Allium mongolicum*)、针茅(*Stipa capillata*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等旱生草本。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与基本信息 于2022年6月,选择腾格里沙漠东北缘1992年飞播造林区4种主要植物群落(花棒群落、沙拐枣群落、花棒+沙拐枣群落、沙

拐枣+花棒群落)为试验样地,在每个植物群落试验样地内分别选取 1 个相同坡向的典型沙丘,沿沙丘走向在迎风坡底、迎风坡中、坡顶、背风坡中、背风坡底 5 个坡位分别选取 1 个小样地作为土壤水分特征研究的基本单元(图 1)。为了明晰研究区土壤水分特征与环境因子之间的相关性,对试验样地植物群落特征、地形特征以及土壤结皮发育等情况进行了调查。

在每个植物群落试验样地内不同坡位分别设置 3 个 20 m×20 m 的灌木样方,在每个灌木样方内采用五点法设置 5 个 1 m×1 m 的草本样方。采用每目检尺法对各调查单元内的植物群落特征进行调查,并对研究区调查样地植物群落特征与土壤特征进行初步分析,其中土壤结皮盖度采用目视估算法进行测定,结果详见表 1。

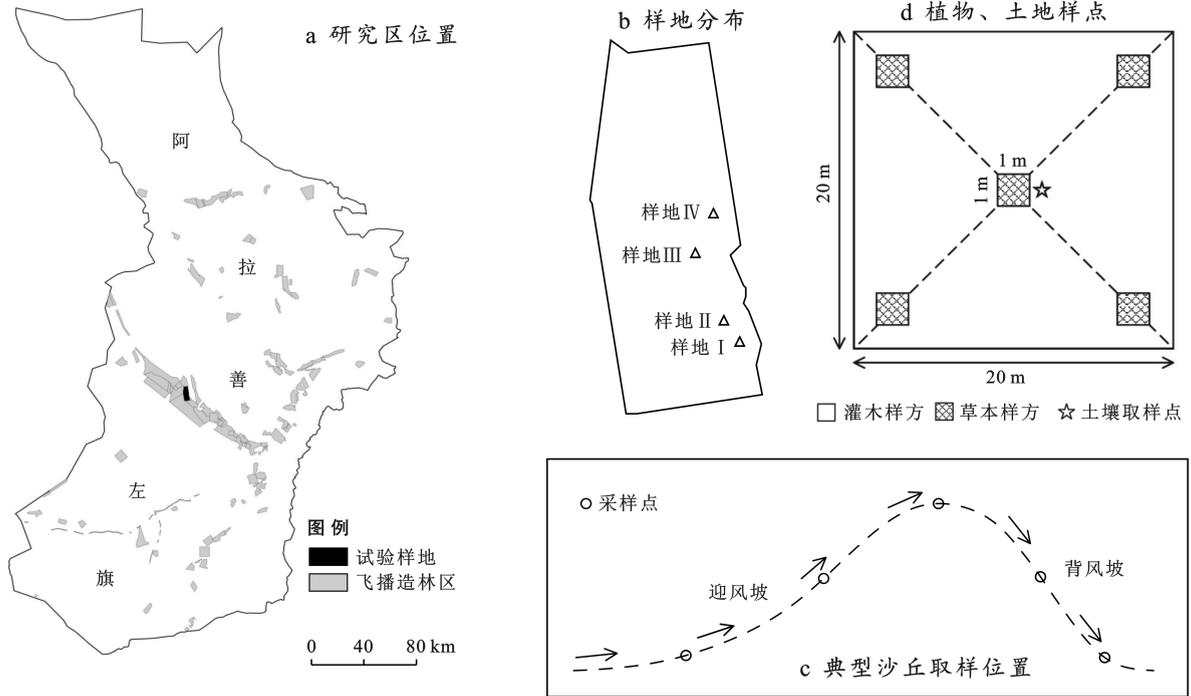


图 1 研究区地理位置与调查样地布设

Fig.1 Geographical location of study area and layout of survey plots

表 1 试验样地基本信息

Table 1 Basic information of test plots

样地	群落组成	地理位置	植物群落特征										
			灌木数量比例	灌木高度/cm	灌木冠幅/cm	灌木基径/cm	灌木密度(株/400 m ²)	灌木盖度/%	草本植物组成	草本盖度/%	结皮盖度/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%
I	花棒	104.935 36°E 39.213 63°N	花棒 100%	164±12	174±10	1.6±0.2	32±8	21±5 ^a	雾冰藜、针茅、沙米	3±1 ^{ab}	39±9 ^{ab}	1.45±0.11 ^b	45.27±3.98 ^a
II	沙拐枣+花棒	104.929 72°E 39.219 61°N	沙拐枣 9% 花棒 91%	182±32	151±35	3.1±0.7	35±1	24±3 ^{ab}	针茅、雾冰藜	2±1 ^{ab}	51±18 ^a	1.50±0.12 ^a	43.37±4.44 ^b
III	花棒+沙拐枣	104.919 71°E 39.238 19°N	沙拐枣 75% 花棒 25%	122±23	124±19	1.8±0.6	44±8	27±2 ^b	针茅、沙米	4±1 ^a	51±17 ^a	1.46±0.07 ^b	44.77±2.77 ^a
IV	沙拐枣	104.926 01°E 39.249 24°N	沙拐枣 100%	79±24	93±7	1.2±0.4	33±5	19±2 ^b	蒙古韭	2±1 ^b	35±12 ^b	1.46±0.12 ^b	45.05±4.63 ^a

注:不同字母表示不同植物群落同一指标之间的显著差异($p < 0.05$)。

1.2.2 土壤样品采集与指标测定 已有研究^[12]表明,研究区固沙灌木根系主要分布在 200 cm 土层深度范围内。因此,本研究在每个灌木样方内选取飞播灌木标准株 1 株,在株下与株间空地人工挖取地下深

度为 200 cm 的土壤剖面,4 个试验样地共 50 个土壤剖面。因表层土壤水分变化剧烈,所以按照 0—10, 10—20, 20—30, 30—60, 60—100, 100—150, 150—200 cm 分 7 层取样,每层采用规格为 60 mm×60 mm

的铝盒与 100 cm³ 的环刀各取 3 次混合土样,土壤取样完成后在野外立即用 0.01 g 电子天平称取土样鲜重。

土壤含水量采用烘干法测定,即将带回实验室的土样放入 105 °C 鼓风干燥箱内烘干 12 h 称取干重。土壤含水量计算公式为:

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为质量含水量(%); W_0 为铝盒重; W_1 为铝盒和湿土重; W_2 为铝盒和烘干土重。

土壤容重采用环刀法测定。将取回土壤样本放入烘箱中在 105 °C 下烘至恒重,待冷却后称烘干土重,利用公式计算土壤容重。计算公式为:

$$d_v = \frac{W_1 - W_2}{V} \quad (2)$$

式中: d_v 为土壤容重(g/cm³); W_1 环刀重和湿土重; W_2 为环刀重和烘干土重(g); V 为环刀的体积(cm³)。

土壤孔隙度采用容重换算法计算,计算公式为:

$$K_i = \left(1 - \frac{d_v}{f}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: K_i 为土壤孔隙度(%); d_v 为土壤容重(g/cm³); f 为平均土壤密度常数(2.65 g/cm³)。

变异系数计算公式^[13]为:

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \quad (4)$$

式中: C_v 为变异系数; S 为标准差; \bar{X} 为平均土壤含水量。

土壤贮水量计算公式^[14]为:

$$D_i = \theta \times H \times \frac{\rho_b}{\rho_s} \times 0.1 \quad (5)$$

式中: D_i 为土壤贮水量(mm); θ 为某一厚度土层内的土壤含水量(%); H 为土层厚度(cm); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); ρ_s 为土壤水分密度(g/cm³)。

田间持水量采用环刀法测定,即将取回的土样在水中浸泡 24 h,称取饱和土质量,将饱和土样置于沙盘静置 12 h 使重力水完全排除,放入烘箱中在 105 °C 下烘至恒重,待冷却后称取烘干土质量。田间持水量计算公式^[15]为:

$$F = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中: F 为田间持水量(%); W_1 为饱和土质量(g); W_2 为烘干土质量(g)。

土壤贮水亏缺度计算公式^[16]为:

$$DSW_i = \frac{F_i - D_i}{F_i} \times 100\% \quad (7)$$

式中: DSW_i 为土壤贮水亏缺度; F_i 为田间持水量(mm); D_i 为土壤实际贮水量。

1.2.3 数据处理与分析 利用 Excel 2019 对数据进行前期处理,采用 SPSS 26 进行单因素方差分析以检验各土层土壤含水量及贮水量的显著性差异;计算变异系数(C_v)以分析各土壤层土壤水分的稳定性;采用 Origin 9.0 制图。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落土壤水分特征

由图 2 可知,200 cm 土层深度范围不同植物群落土壤含水量较低,均小于 1%。不同植物群落土壤含水量在表层(0—30 cm)最低(0.41%~0.42%),深层(150—200 cm)土壤含水量最高(0.59%~0.69%),200 cm 范围内平均土壤含水量在 0.51%~0.57%之间,平均土壤含水量表现为:花棒群落(0.57%)>沙拐枣群落(0.54%)>花棒+沙拐枣群落(0.51%)>沙拐枣+花棒群落(0.51%),花棒与花棒+沙拐枣群落和沙拐枣+花棒群落之间具有显著差异($p < 0.05$)。不同植物群落土壤含水量垂向分布特征相似,随土层深度均呈波动增长趋势,浅层(0—30 cm)土壤含水量变化幅度较大,随着土层深度增加,不同植物群落土壤含水量增幅均达到 0.1%以上;而在 30—60 cm 土层,土壤含水量出现明显下降趋势;随后在 60—100 cm 土层土壤含水量又呈上升趋势。不同植物群落间土壤含水量差异随土层深度增大,0—10 cm,各群落样地土壤含水量均集中在 0.42%左右,而在 150—200 cm 土层中,土壤含水量最大的花棒群落为 0.69%,土壤含水量最小的花棒+沙拐枣群落为 0.59%。不同植物群落不同坡位平均土壤含水量呈现:迎风坡底(0.57%)>背风坡底(0.54%)>背风坡中(0.52%)>迎风坡中(0.52%)>坡顶(0.50%)。不同群落土壤含水量垂直变异系数在 0.11~0.17 之间,花棒群落 0—200 cm 深度范围内土壤含水量垂直变化幅度最大(0.40%~0.80%),变异系数 0.17;其次为沙拐枣群落,变化范围 0.40%~0.75%,变异系数 0.15,沙拐枣+花棒群落和花棒+沙拐枣群落不同坡位土壤含水量变化范围较小,变化范围分别为 0.41%~0.66%和 0.41%~0.64%,变异系数分别为 0.14,0.11(表 2)。

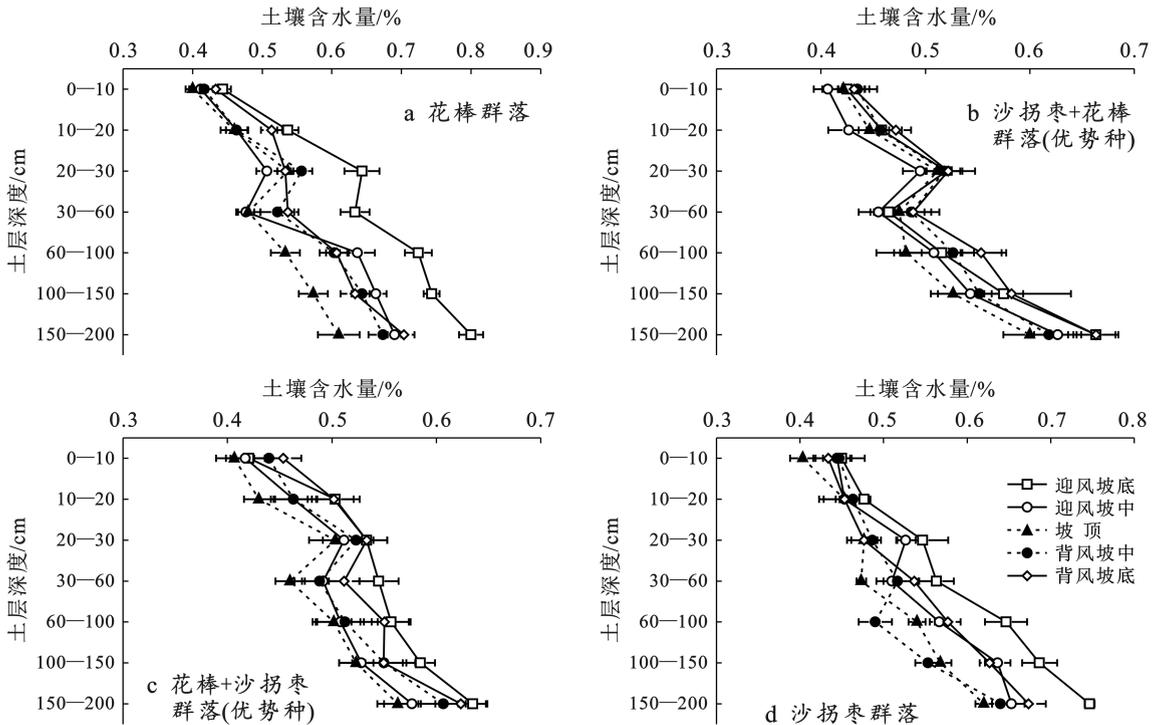


图 2 腾格里沙漠东北缘不同植物群落不同坡位土壤水分特征

Fig.2 Soil water characteristics of different slope position with different plant communities at northeastern edge of Tengger Desert

表 2 腾格里沙漠东北缘不同植物群落下雨季前土壤水分垂直特征统计

Table 2 Statistics on vertical characteristics of soil moisture before rainy season under different plant communities at northeastern edge of Tengger Desert

群落组成	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差(SD)	标准误(SE)	垂直变异系数(C_v)
花棒	0.40	0.80	0.57 ^a	0.10	0.02	0.17
沙拐枣+花棒	0.41	0.66	0.51 ^b	0.07	0.01	0.14
花棒+沙拐枣	0.41	0.64	0.51 ^b	0.06	0.01	0.11
沙拐枣	0.40	0.75	0.54 ^{ab}	0.09	0.02	0.15

注:小写字母表示不同植物群落平均土壤含水量的显著差异($p < 0.05$)。

2.2 不同植物群落土壤贮水量分布特征

不同植物群落土壤贮水量分布如图 3 所示。0—200 cm 土层土壤总贮水量在 15.45~17.79 mm 之间,不同植物群落表现为:花棒群落(17.79 mm) > 沙拐枣群落(17.49 mm) > 花棒+沙拐枣群落(15.74 mm) > 沙拐枣+花棒群落(15.45 mm)。不同植物群落土壤贮水量随土层深度呈增大趋势,土壤贮水量变化范围为 0.55~5.29 mm。随土层深度变化土壤贮水量变异性最大的是沙拐枣群落,变异系数为 0.71,其次是花棒群落,变异系数为 0.71,沙拐枣+花棒群落与花棒+沙拐枣群落变异性相对较小,变异系数分别为 0.67,0.67。

从不同坡位植物群落土壤贮水特征来看,花棒群落在沙丘不同坡位的土壤贮水量变化范围在 16.82~18.49 mm 之间,变异系数 0.03,为 4 种植物群落中变异性最小的群落;沙拐枣+花棒群落在沙丘不同坡位

土壤贮水量变化范围在 15.55~16.28 mm 之间,变异系数 0.06,为 4 种植物群落中变异性最大的群落;沙拐枣群落、花棒+沙拐枣群落在沙丘不同坡位土壤贮水量变化范围分别在 16.14~18.73 mm, 15.02~17.07 mm 之间,变异系数均为 0.06,变异程度在前 2 种植物群落之间。

2.3 不同植物群落土壤贮水亏缺特征

不同植物群落土壤贮水亏缺度如图 4 所示。总体呈现:花棒+沙拐枣群落(97.74%) > 沙拐枣+花棒群落(97.62%) > 花棒群落(97.48%) > 沙拐枣群落(97.44%)。

土壤贮水亏缺度随土层深度的变化总体呈现降低趋势,亏缺范围在 96.31%~98.41%。不同植物群落中沙拐枣群落在表层(0—30 cm)土壤贮水亏缺度最大,为 98.00%,在深层(150—200 cm)土壤贮水亏缺度最小,为 96.66%。从不同坡位植物群落土壤贮水

亏度来看,呈现:迎风坡中(97.50%)<迎风坡底(97.50%)<坡顶(97.54%)<背风坡底(97.62%)<

背风坡中(97.69%),可以看出迎风坡土壤贮水亏缺度要低于背风坡。

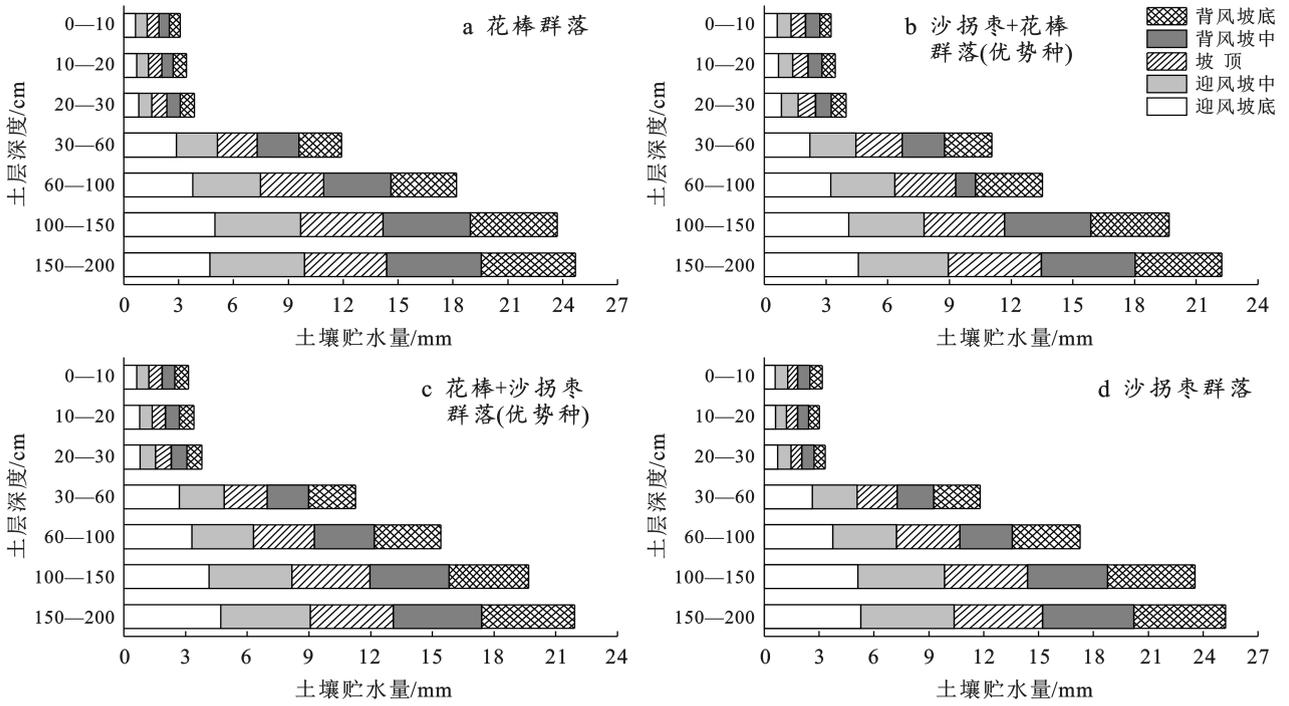


图 3 腾格里沙漠东北缘不同植物群落下土壤贮水分布

Fig.3 Distribution of soil water storage under different plant communities at northeastern edge of Tengger Desert

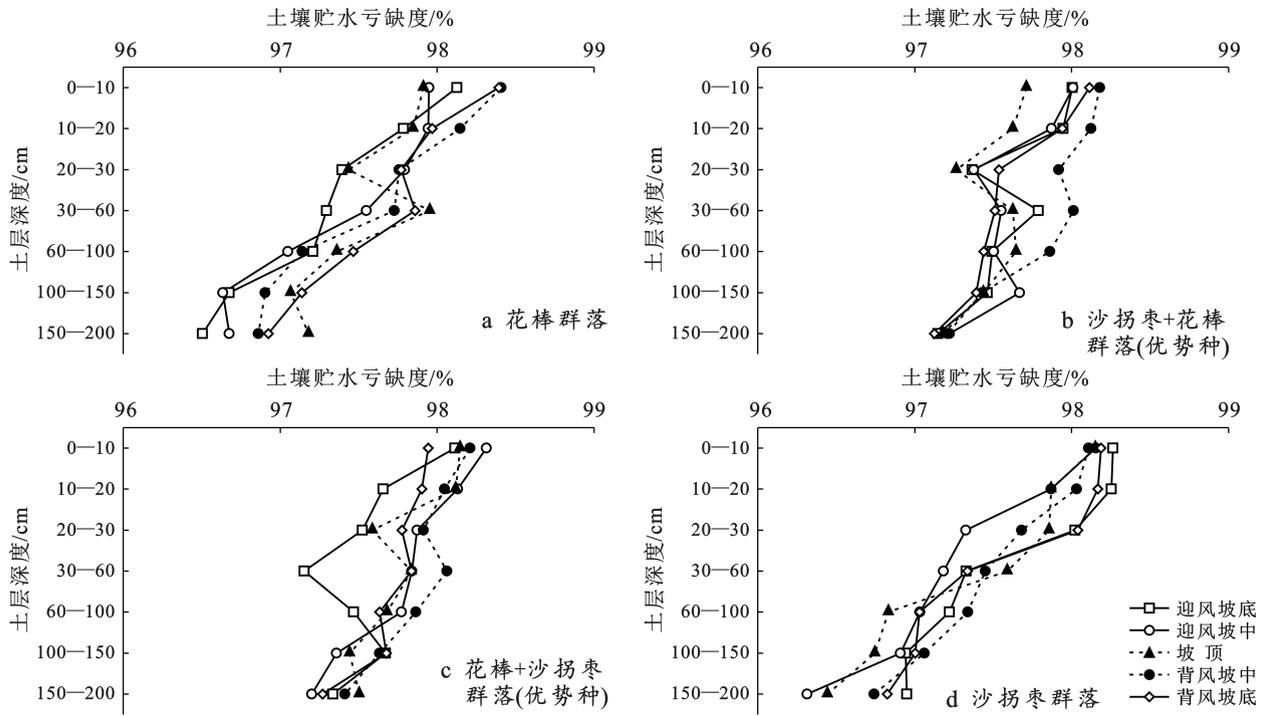


图 4 腾格里沙漠东北缘不同植物群落下土壤贮水亏缺度

Fig.4 Soil water storage deficit under different plant communities at northeastern edge of Tengger Desert

3 讨论

土壤水分是干旱荒漠区植被生长发育和恢复的

主要限制因子,本研究结果显示雨季前腾格里沙漠东北缘飞播造林区 200 cm 深度土壤含水量极低,均小于 1%。这与叶冬梅等^[17]在乌兰布沙漠东北部流动

沙地、白刺灌丛半固定和固定沙地雨季前观测结果较为接近。而安桂香等^[18]研究表明塔克拉玛干沙漠南缘沙拐枣群落生长季土壤含水量可达 1.5%~7.0%，刘源等^[19]研究表明库布齐东段典型人工固沙林(油蒿林、沙柳林和柠条林)土壤含水量平均为 6.39%~8.29%，雨季前在 5%左右。可见本研究区土壤含水量偏低，尤其是表层(0—30 cm)土壤含水量不足 0.5%，这极大地限制了区域植被的恢复与稳定维持。同时，地形因素对土壤水分的分布也有较大影响^[20]。张圆浩等^[21]研究发现沙丘不同坡位土壤水分含量表现为：迎风坡底>背风坡底>迎风坡中>坡顶>背风坡中的趋势，这与本研究中不同植物群落在沙丘各坡位土壤含水量总体呈现：迎风坡底>背风坡底>背风坡中>迎风坡中>坡顶的趋势有所不同。一般来说，流动沙丘或半固定沙丘背风坡较陡，土壤疏松，土壤含水量较低，而本研究区经过 30 a 的生态恢复演变为固定沙丘，迎风坡和背风坡植被分布差异性较小，土壤容重逐步趋于一致，沙丘坡度变缓，这有利于降雨在坡中位置入渗和保存^[22]。此外，坡顶相对于迎风坡中地下水位较高，使得坡顶土壤含水量在一定程度上低于迎风坡中。

在气候等其他环境因子相对一致的情景下，植被类型、植物群落结构被认为是影响土壤水分时空分布的关键因素^[23]。本研究发现不同植物群落土壤含水量随土层深度的变化总体呈现波动式增长，即土壤含水量在表层(0—30 cm)最低，随土层深度的变化土壤含水量有增大的趋势，深层(150—200 cm)土壤含水量达到最大，这与艾宁等^[24]的研究结果一致。究其原因在于沙丘表层(0—30 cm)土壤水分蒸发量大，加之取样前没有降雨补给，使得表层土壤含水量极低^[25]。随着土层深度的增加，土壤水分蒸发逐渐减少，到达深层土壤水分由于得到了地下水的补给土壤含水量达到最大，并且土壤水分随深度的变化逐渐趋于稳定，并在土壤深层形成相对稳定层^[26-27]。不同植物群落土壤贮水量随土层深度的变化均呈现增大趋势，与土壤含水量变化趋势一致，而土壤贮水亏缺度随土层深度的变化总体呈现降低趋势，这与王晶等^[28]、莫保儒等^[29]研究结果一致。其原因在于表层土壤蒸发活动强烈，在没有降雨补给的情况下，表层土壤贮水亏缺度最大；而随着土层深度变化，地下水对土壤水分的补给使得土壤贮水量逐渐增大亏缺度逐渐减小。

此外，与花棒、沙拐枣群落相比，花棒与沙拐枣组成的群落虽然平均土壤含水量及土壤总贮水量均有所降低，但土壤含水量垂直差异性更小，这主要由

于花棒和沙拐枣根系垂直分布差异所致，花棒主根较为发达，根系深度超过了 200 cm，而沙拐枣则侧根较为发达，横向分布于 40—100 cm 土层，由此导致花棒与沙拐枣组合的群落能够更大程度利用不同土层土壤水分，整体水分吸收和利用效率更高，因此花棒与沙拐枣组合的群落平均土壤含水量及土壤水分垂直变异性低于花棒、沙拐枣群落。同时，花棒与沙拐枣组合的群落植被盖度更高，其地表枯落物及土壤结皮盖度更大，植物冠层以及地表枯落物和土壤结皮能够有效减少地表水分蒸发，因此花棒与沙拐枣组合植物群落对于受自然蒸散与风蚀影响更大的沙丘顶部的固持水土作用更明显。可见，在干旱荒漠区构建人工固沙植被系统过程中，应充分考虑植物种水分消耗策略以及植物与土壤水分分布特征之间的相互关系，选择适宜的物种以及合理的林分搭配模式，以促进干旱荒漠区人工固沙植被系统水—植被协调可持续发展。

4 结论

(1) 腾格里沙漠东北缘飞播造林区不同植物群落 200 cm 深度雨季前土壤含水量变化范围为 0.40%~0.80%，表现为：花棒群落>沙拐枣群落>花棒+沙拐枣群落>沙拐枣+花棒群落，不同坡位平均土壤含水量呈现：坡底>坡中>坡顶，花棒和沙拐枣组合的植物群落土壤含水量垂直变异程度更低，对不同深度土壤水分的利用更为均衡。

(2) 不同植物群落土壤总贮水量在 15.45~17.79 mm 之间，土壤贮水量垂直变化趋势与土壤含水量一致，均随土层深度增加呈波动式增长。

(3) 土壤贮水亏缺度呈现：花棒+沙拐枣群落>沙拐枣+花棒群落>花棒群落>沙拐枣群落。土壤贮水亏缺度随土层深度增加呈降低趋势，且迎风坡土壤贮水亏缺度低于背风坡。

[参 考 文 献]

- [1] 缙倩倩, 韩致文, 杜鹤强, 等. 中国沙尘暴源区及其治理研究述评[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1559-1564.
- [2] 田永祯, 司建华, 程业森, 等. 阿拉善沙区飞播造林试验研究初探[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 149-153.
- [3] 满多清, 吴春荣, 徐先英, 等. 腾格里沙漠东南缘荒漠植被盖度月变化特征及生态恢复[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 142-146.
- [4] 祁京, 焦亮, 陈可, 等. 腾格里沙漠南缘昌岭山 1872 年以来干湿变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1318-1326.
- [5] Xia Jun, Ning Like, Wang Quan, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid re-

- gions of West China under a scenario of climate change [J]. *Climatic Change*, 2017, 144(3): 549-563.
- [6] 秦洁, 司建华, 贾冰, 等. 巴丹吉林沙漠植被群落特征与土壤水分关系研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(1): 207-222.
- [7] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1112-1121.
- [8] 陈嘉嘉, 黄磊, 贾鸿飞, 等. 腾格里沙漠人工植被区不同植被类型土壤水分垂直变异特征及其动态变化模型[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(4): 126-133.
- [9] 顾梦鹤, 谢泽慧, 王春晖, 等. 库布其沙漠8种防护林的土壤水分特征[J]. *草业科学*, 2017, 34(12): 2437-2444.
- [10] 付华, 周志宇, 陈善科. 腾格里沙漠东南缘飞播区白沙蒿植被密度与土壤水分关系的研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 51-56.
- [11] 赵晨光, 程业森, 李慧瑛, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被恢复区土地利用/覆被变化及其驱动因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6): 131-138.
- [12] 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.
- [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, 72.
- [14] 郝宝宝, 艾宁, 贾艳梅, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被类型土壤水分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 196-200.
- [15] 宗巧鱼, 艾宁, 刘广全, 等. 撂荒年限对陕北黄土区山地枣林土壤水分的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 70-76.
- [16] 王宁, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 255-262.
- [17] 叶冬梅, 秦佳琪, 韩胜利, 等. 乌兰布和沙漠流动沙地土壤水分动态、土壤水势特征的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(3): 126-130.
- [18] 安桂香, 曾凡江, 孙旭伟, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘不同植被区土壤水分状况研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 63-67, 164.
- [19] 刘源, 段玉玺, 王博, 等. 库布齐东段典型人工固沙林土壤水分时空变化特征[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 1-8.
- [20] Gwak Y, Kim S. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2): 431-445.
- [21] 张圆浩, 阿拉木萨, 印家旺, 等. 沙丘土壤含水量与地下水埋深时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1427-1436.
- [22] 郭伟, 张鸾, 刘爽, 等. 晋北风沙区人工林土壤水分及粒度特征[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(2): 80-87.
- [23] Chen, Liding, Zhilin Huang, Jie Gong, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2007, 70(2): 200-208.
- [24] 艾宁, 张智勇, 宗巧鱼, 等. 水蚀风蚀交错区典型人工林土壤水分亏缺特征[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(3): 272-280.
- [25] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, et al. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2897-2908.
- [26] Jun Li, Chengyi Zhao, Yajun Song, et al. Spatial patterns of desert annuals in relation to shrub effects on soil moisture [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 21(2): 221-232.
- [27] Xinping Wang, Cui Yan, Yanxia Pan, et al. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2): 134-143.
- [28] 王晶, 朱清科, 刘中奇, 等. 黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 220-223.
- [29] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011-4020.