

不同带间距对沙区河岸固沙林带的带间土壤水分和植被群落特征的影响

黄伟^{1,2}, 杨光^{1,2}, 马勇³, 刘一⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3.乌海市水土保持工作站, 内蒙古 乌海 016000; 4.呼伦贝尔市水利事业发展中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要: [目的] 黄河沿岸地带是水土流失最严重的地区之一。研究沙区河岸固沙林带不同带间距下的土壤水分和植被群落特征, 确定最优配置模式下的带间距, 为建设沙区河岸固沙林带行带式造林提供依据。[方法] 以内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗西柳沟不同带间距行带式固沙林为研究对象, 对带间距 8, 16, 22, 28 m 的固沙林样地进行土壤取样和植被调查, 统计不同带间距固沙林带的带间土壤物理性质以及植被群落特征, 并分析土壤水分与植被间的相关性。[结果] ①不同行带式固沙林中的土壤水分与植被指数整体上均随带间距增大而提升。②各样地带间 0—100 cm 范围内不同土层土壤水分也随水平间距增加而升高, 至 11 m 后变化趋于稳定。③各样地带间土壤水分均与植被指数大体呈极显著正相关, 但均匀度指数与丰富度指数有所差异。带间距越大, 植被恢复效果越好, 带间距 22 m 时约达峰值。[结论] 以低覆盖度行带式固沙林进行沙地治理时, 植被恢复效果随带间距增大而增长, 但带间距并非越宽越好。22 m 带间距的行带式固沙林带间植被恢复效应最佳, 对沙地的近自然修复效果最优。

关键词: 沙区河岸; 带间距; 土壤水分; 植被群落; 固沙林带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0009-11

中图分类号: S775

文献参数: 黄伟, 杨光, 马勇, 等. 不同带间距对沙区河岸固沙林带的带间土壤水分和植被群落特征的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 9-19. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.002; Huang Wei, Yang Guang, Ma Yong, et al. Effects of different band spacings of riparian sand-fixation forest belts on soil moisture and vegetation community characteristics in riverbank sandy areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 9-19.

Effects of Different Band Spacings of Riparian Sand-fixation Forest Belts on Soil Moisture and Vegetation Community Characteristics in Riverbank Sandy Areas

Huang Wei^{1,2}, Yang Guang^{1,2}, Ma Yong³, Liu Yi⁴

(1.College of Dessert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forestry and Grassland Administration of China, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3.Wuhai Water and Soil Conservation Workstation, Inner Mongolia 016000, China; 4.Hulunbuir Water Resources Development Center, Hulunbuir, Inner Mongolia 021000, China)

Abstract: [Objective] The coastal area of the Yellow River is one of the areas experiencing the most severe soil and water loss. The soil moisture and vegetation community characteristics of riparian-sand-fixing forest belt in sandy areas were studied under different zone spacing, and the belt spacing under the optimal allocation mode was determined in order to provide the basis for the construction of row and belt afforestation of riparian sand-fixing forest belt in sandy areas. [Methods] The study was conducted on sand-fixation forest belts with different band spacings at Xiliugou, Dalat Banner, Ordos City, Inner Mongolia. Soil sampling and

收稿日期: 2023-06-26

修回日期: 2023-07-31

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项“沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范”(2019ZD003); 内蒙古自治区科技计划“黄土丘陵沟壑区智慧水土保持技术”(2021GG0070)

第一作者: 黄伟(1997—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: huangw1118@126.com。

通信作者: 杨光(1974—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: yg331@126.com。

vegetation surveys were carried out in the sand-fixation forest sample plots with different band spacings of 8 m, 16 m, 22 m, and 28 m. Soil physical properties and vegetation community characteristics were analyzed. The correlation between soil moisture and vegetation was also determined. [Results] ① The soil moisture and vegetation index of different sand-fixation forest belts increased with increasing band spacing. ② The soil moisture for different soil layers in the 0—100 cm soil layer in various zones of the band spacing also increased with the increasing horizontal spacing, and the change tended to be stable after 11 m. ③ Soil moisture in different zones was positively correlated with vegetation index in general, but the evenness index and richness index were different. The greater the band spacing, the better the vegetation restoration effect, and the peak value of the restoration effect was approximately reached when the band spacing was 22 m. [Conclusion] The vegetation restoration effect increased with increasing sand-fixation forest belt band spacing when sandy land was treated with a low coverage row-type sand-fixation forest, but it is not always that the wider the band spacing, the better the vegetation restoration effect. The 22 m band spacing had the best vegetation restoration effect of all of the row-type sand-fixation forest band spacings, and the near-natural restoration effect on sandy land was the best.

Keywords: sandy bank; band spacing; soil moisture; vegetation community; sand-fixing forest belt

内蒙古自治区是中国的西北生态屏障,作为生态定位的地区,其生态环境治理固然是重中之重。内蒙古黄河沿岸是水土流失最严重的地区之一,尤其沙区河岸,土壤质地松散使其水土流失尤为严重,造成输沙量剧增,黄河水体愈加浑浊^[1-3]。沙区河岸的水土流失不仅会影响当地河岸居民的生产生活,也会造成黄河水体含沙量增高,严重影响下游的水体质量。为解决沙区河岸的水土流失问题,植被恢复是水土保持与荒漠化防治的重要手段之一,过去一直采取以高覆盖度为主的治沙路线^[4]。但在干旱、半干旱区更适合近自然的低覆盖度疏林或稀疏灌丛的造林模式,造林密度过高会导致区域地下水位显著下降,尤其是高密度的乔木造林,往往出现幼龄林衰退或死亡的现象^[5]。优化种植密度后,避免了土壤水分过度消耗,林分能够充分发挥界面生态效益,明显提高固沙林生产力和促进带间植被、微生物和土壤修复的作用^[6]。密度高的固沙林,即使土壤修复效果显著,但由于固沙林本身对水分的大量吸收,林带根系也会限制水分向土壤深层渗漏,使得植被恢复效果不佳,物种多样性难以增加^[7-8]。

经多年研究,在单株占地面积不变基础上,采取“两行一带”配置,带间距远远大于行距,既能起到固土防沙化作用,又能促进林分生长^[9]。水分是影响植被生长的重要因素,降雨是土壤水分补给的主要来源,林冠截流会使林下与林中的水分补给有明显差异^[10]。不同带间距的行带式固沙林土壤及植被的修复效果也不尽相同,更大的带间距使带间植被多样性增大,植被恢复的促进作用增加^[11]。本文为探讨沙区河岸固沙林带对沙地近自然修复的影响,通过实地调查不同带间距的行带式固沙林样地的土壤水分和

带间植被群落特征,经过数理统计与分析,为沙区河岸固沙林带行带式造林的最优配置模式和最优行间距的确定提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗,处于黄河十大孔兑一级支流西柳沟小流域,地理位置为 109°41′35″—109°41′58″E, 40°27′53″—40°28′16″N。达拉特旗海拔 1 000~1 500 m,南部属黄土丘陵沟壑区,中部为库布齐沙漠东端,北缘为黄河岸。所属区域属半干旱温带大陆性气候,多年平均降水量 310.3 mm,蒸发量 2 157 mm,多年平均气温 6.1℃^[12]。土壤主要以栗钙土为主,植被多为人工林和草原植被,主要植被有油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、羊草(*Leymus chinensis*)、黄芪(*Astragalus propinquus*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等^[13]。

2 材料与方法

2.1 试验设置与调查

选取达拉特旗西柳沟黄河沿岸防护林为研究对象,土壤质地为砂壤土,固定沙地。林场于 1997 年东西走向栽植两行一带配置行带式杨树林。研究表明低覆盖度行带式杨树林的植被恢复效应在带间距 10—20 m 范围内随带间距变化递增^[14-15],故设置 4 种带间距(8, 16, 22, 28 m)为试验样地,不同样地的株行距、带间距、树高、胸径、冠幅见表 1。

表 1 试验杨树林样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plot of experimental poplar forest

处理	树龄/a	株行距/(m×m)	带间距/m	株高/m	胸径/cm	冠幅/m
A	25	2×3	8	12.8±0.37	16.3±1.03	4.3±0.28
B	25	2×3	16	13.1±0.54	16.9±0.84	4.6±0.41
C	25	2×3	22	13.5±0.69	17.3±0.77	5.1±0.33
D	25	2×3	28	13.3±0.58	17.1±0.48	4.9±0.29

注:A,B,C,D分别为杨树林8,16,22,28 m 带间距的处理。下同。

试验开始于2022年8月17日选取样地及前期准备工作,于8月29日至9月6日进行取土及植被调查,此时段10日内无降雨。当地降水数据见图1(数据源于达拉特旗水土保持监测站年度监测报告)。由图1可知当地降水主要集中在5—8月,试验时段雨季基本结束,降雨对土壤水分的补给基本完毕,植被的生长程度约达峰值,行带式固沙林带间的植被恢复效果最为显著^[16]。土壤取样取0—100 cm 土层深度剖面,分5层取样,用100 cm³ 环刀在0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层深度处自下而上每层分别做3次重复取样。取样点选择在8,16,22,28 m 这4种带间距的杨树林样地中取相同林下水平间距位置,故本试验选取距林带2,4,8,11,14 m 处(距林带2 m 位置各林带共有,其他分别为各样地带间及中心位置),取3次做重复,点位选取详见图2。对0—100 cm 的土样取样后及时称重并记录,再以烘箱105℃烘干至

恒重后称重并记录,测定土壤水分及容重。植被调查采用样方法,选择1 m×1 m样方格,在林带中的上述土壤取样点附近各打3个样方作重复,分别调查样方内植物种类、种类个数、植物种株高、植物种盖度、样方内植物总数及植被盖度^[17]。

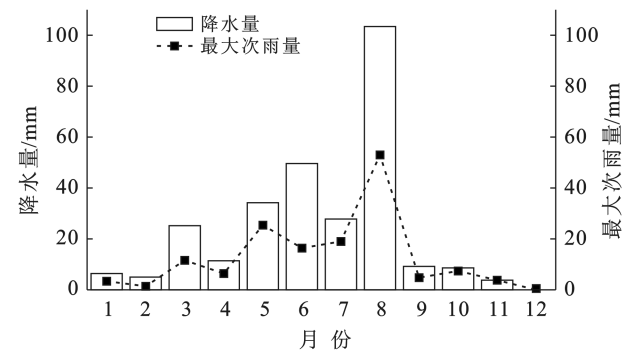


图 1 2022 年达拉特旗逐月降水量

Fig.1 Monthly precipitation in Dalat Banner in 2022

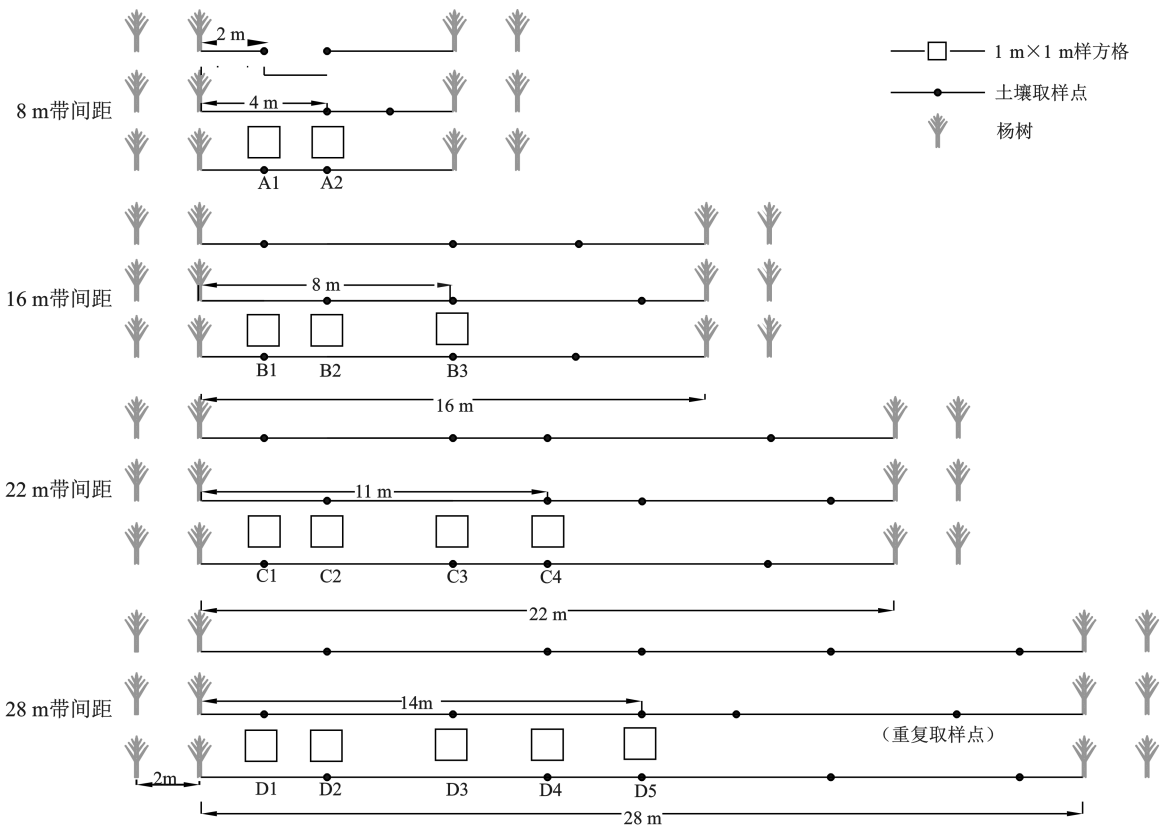


图 2 调查取样点位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of investigation and sampling location

2.2 土壤物理性质测定

采用环刀法取样,对取样后环刀进行浸水、烘干处理,并分别在各时期称重,测定土壤水分、土壤容重。

2.3 植物群落物种多样性分析

为更加科学准确地测定群落植被物种多样性,选取物种重要值、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数研究群落物种多样性特征。

物种重要值(IV):

$$IV=\frac{h+d+c}{3}\tag{1}$$

Simpson 多样性指数(D):

$$D=1-\sum_i n_i^2\tag{2}$$

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H):

$$H=-\sum_{i=1}^s [n_i \ln n_i]\tag{3}$$

Pielou 均匀度指数(J):

$$J=\frac{H}{\ln S}\tag{4}$$

Margalef 丰富度指数(d):

$$d=(S-1)\ln N\tag{5}$$

式中: h, d, c 为群落中第 i 种物种的相对高度、相对密度、相对盖度; S 为群落中的总种数; n_i 为第 i 种的个体数量占总个体数量的比例; N 为观察到的总个体数。

2.4 数据分析

在 Excel 2019 中对数据基础处理,在 SPSS 27 中

采用单因素方差分析(Anova)对土壤水分物理性质的均值及误差显著性进行分析,并在 Origin 2021 中绘制统计图表,运用 R 语言在 R studio 中完成土壤水分与植被指数间的 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 土壤物理性质

通过单因素方差分析得到不同样地各个位置土壤水分的均值与差异显著性。由表 2 可知,土壤水分在不同带间距样地间和不同土层深度间均存在显著差异,且不同土层深度间的差异更显著。在 0—100 cm 土层范围内,带间距 8 m 样地土壤体积含水率在 2.11%~5.97% 之间,带间距 16 m 样地土壤体积含水率在 2.49%~6.52% 之间,带间距 22 m 样地土壤体积含水率在 3.15%~7.98% 之间,带间距 28 m 样地土壤体积含水率在 3.09%~7.96% 之间。不同带间距杨树林各位置的土壤容重在 1.22~1.56 g/cm³ 之间。由图 3 可知,林下水平距离 2 m 处在不同样地林带间的土壤容重大体上随土层深度变化递减,其中带间距 8~22 m 土壤容重相近,而带间距 28 m 样地相同位置的土壤容重整体偏高,且随深度变化的趋势与其他样地有显著差异。其他点位的土壤容重大约在 0—60 cm 时随土层深度增加而增大,在 60—100 cm 时又逐渐随土层深度增加而减小。总体上,带间距 8, 16 m 样地的 0—100 cm 土层的土壤容重小于带间距 22, 28 m 样地,且前者各 0—100 cm 土层深度间的差异较小,后者土层间差异更显著。

表 2 不同处理林带间土壤水分分布

Table 2 Soil moisture distribution between forest belts of different treatment

采样点 编号	带间距/ m	林下水平 距离/m	不同土层深度土壤含水率/%				
			0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
A ₁	8	2	4.58±0.24 ^{bC}	4.98±0.24 ^{abG}	5.57±0.23 ^{aEF}	2.85±0.23 ^{cl}	2.38±0.27 ^{cl}
A ₂		4	4.97±0.26 ^{bBC}	5.57±0.13 ^{aEF}	5.66±0.28 ^{aEF}	4.80±0.30 ^{cF}	2.72±0.56 ^{dH}
B ₁	16	2	4.87±0.36 ^{aBC}	5.14±0.22 ^{aG}	5.31±0.17 ^{aF}	3.45±0.16 ^{bH}	2.60±0.11 ^{cH}
B ₂		4	5.17±0.36 ^{bB}	5.31±0.29 ^{bFG}	5.76±0.24 ^{aE}	5.21±0.22 ^{bE}	3.03±0.49 ^{cG}
B ₃		8	6.16±0.45 ^{cA}	5.86±0.16 ^{dDE}	6.38±0.14 ^{bCD}	6.84±0.22 ^{aBC}	5.67±0.49 ^{dA}
C ₁	22	2	5.12±0.26 ^{bB}	5.56±0.21 ^{abEF}	6.11±0.27 ^{aD}	3.88±0.16 ^{cG}	3.56±0.41 ^{cE}
C ₂		4	5.15±0.45 ^{dB}	6.16±0.23 ^{bCD}	6.64±0.24 ^{aB}	5.77±0.24 ^{cD}	3.28±0.11 ^{eFG}
C ₃		8	6.25±0.26 ^{cA}	6.49±0.29 ^{cC}	6.67±0.24 ^{bB}	6.91±0.23 ^{aBC}	4.46±0.41 ^{dD}
C ₄		11	6.38±0.37 ^{cA}	7.68±0.21 ^{aA}	7.74±0.24 ^{aA}	6.86±0.20 ^{bBC}	5.28±0.45 ^{dB}
D ₁	28	2	5.16±0.29 ^{bB}	5.43±0.24 ^{bFG}	6.33±0.19 ^{aCD}	3.93±0.19 ^{cG}	3.48±0.34 ^{cEF}
D ₂		4	5.34±0.28 ^{bB}	5.69±0.12 ^{aEF}	5.58±0.19 ^{aEF}	5.51±0.21 ^{abDE}	3.25±0.16 ^{cFG}
D ₃		8	6.32±0.38 ^{cA}	6.21±0.19 ^{cCD}	6.58±0.19 ^{bBC}	7.15±0.21 ^{aAB}	4.58±0.35 ^{dD}
D ₄		11	6.28±0.59 ^{dA}	7.26±0.18 ^{bB}	7.77±0.19 ^{aA}	6.56±0.29 ^{cC}	5.12±0.22 ^{eBC}
D ₅		14	6.57±0.43 ^{dA}	6.889±0.13 ^{cB}	7.64±0.22 ^{aA}	7.36±0.24 ^{bA}	4.94±0.24 ^{eB}

注:表中土壤含水率数据中小写字母表示不同土层深度间的差异显著性,大写字母表示不同水平距离间差异显著性。下同。

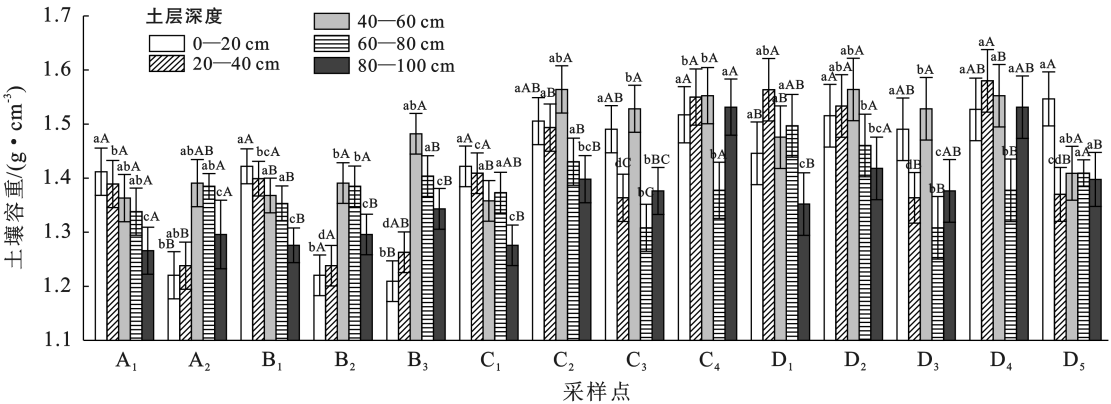


图 3 不同样地林带间的土壤容重差异

Fig.3 Soil bulk density difference between forest belts of different sample plots

3.2 土壤水分空间变化特征

3.2.1 距林带不同距离处土壤水分随土层深度的垂直变化 根据表 2 中的各点位土壤体积含水率平均值绘制土壤水分随土层深度变化曲线,分析各样地相同林下水平距离的土壤水分不同深度变化特征,比较不同带间距样地之间的差异。

由图 4a 可见,各样地林下 2 m 水平距离位置的土壤水分在土层 0—60 cm 范围内大致随深度增加,土层深度超过 60 cm 后水分递减,样地间的水分差异上,带间距 28 m,22 m 样地明显高于 16 m,8 m。在相同 4 m 水平距离点位中,整体上各样地土壤水分基本在土层 0—60 cm 范围内随深度递增,在 60 cm 深度之后出现递减趋势,在 80 cm 深度后开始锐减

(图 4b)。相同 8 m 水平距离中,仅选择带间距 16 m,22 m,28 m 样地,其中带间距 22 m 样地的土壤水分在土层 0—80 cm 范围内随深度逐渐递增,在深度 80 cm 之后剧烈减少。带间距 16 m,28 m 样地的土壤水分基本上在土层 0—40 cm 随深度递减,40—80 cm 递增,80 cm 深度以下递减,带间距 28 m 样地水分下降幅度更大。带间距 22 m,28 m 样地土壤水分整体高于带间距 16 m 样地,但土层深度近似 100 cm 时前者显著低于后者,土层较深时带间距 22 m,28 m 土壤水分相对较低。林下 11 m 水平距离点位,带间距 22 m,28 m 样地两者土壤水分在各土层深度基本相似,仅在 0—20 cm 土层中带间距 28 m 样地的土壤水分略高于带间距 22 m 样地。

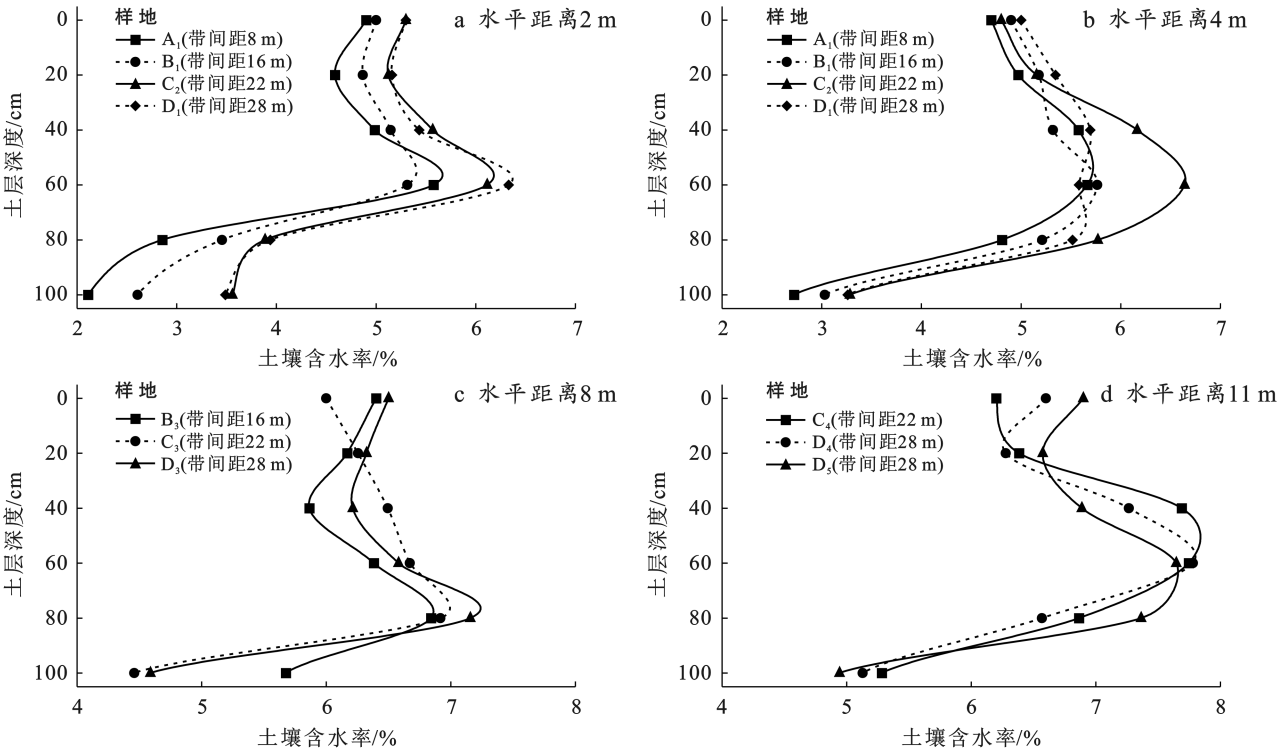


图 4 不同样地在林下相同水平距离处土壤水分垂直变化

Fig.4 Vertical variation of soil moisture in different sample plots at same horizontal distance under forest

3.2.2 不同水平距离土壤水分变化特征 根据表 2 中土壤水分平均值,对不同带间距杨树林不同位置水分差异绘制土壤体积含水率随林下水平距离变化曲线。由图 5 可知,不同带间距杨树林土层深度 0—100 cm 范围内的土壤水分在水平方向上随水平距离变化均呈递增趋势。在带间距 8 m 样地中,土层 0—20 cm 范围内水分变化较为平稳,土层 60—80 cm 范围内随水平距离变化递增趋势显著,其余均随水平距离增大而略微上升。带间距 16 m 样地中,土层 0—

60 cm 范围内土壤水分随水平距离递增较平缓,而土层 60—100 cm 范围内上升趋势显著。带间距 22 m, 28 m 样地的土壤水分变化曲线较相似,两个样地的土层 60—80 cm 范围土壤含水量在水平距离 2~8 m 处均随水平距离增大而大幅度上升。带间距 28 m 样地曲线图中虽然整体趋势递增,但部分区段或有递减趋势,曲线较为曲折,且水平距离超过 11 m 后,各土层水分变化并不显著,土壤含水量极值近似处 11 m 位置。

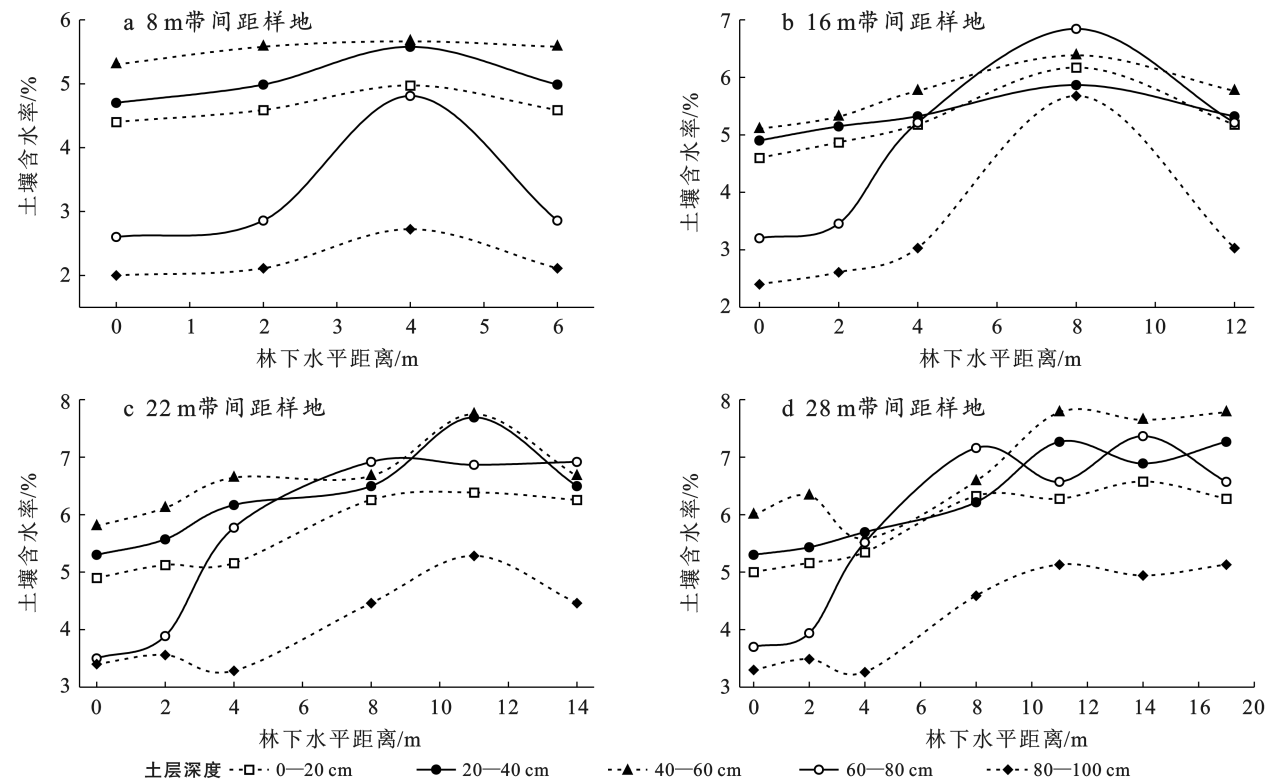


图 5 各样地不同土层土壤含水量随林带带间不同水平距离变化

Fig.5 Changes of soil water content in different soil layers of each plot with different horizontal distances between forest belts.

3.3 植被物种多样性特征

3.3.1 植被群落特征 根据样方内植被群落中各植物种的高度、多度和盖度计算重要值,对各个样地的带间植被群落类型通过优势种与伴生种进行分类^[18]。不同样地林带间植被群落经调查统计后,植被群落特征分类合并结果详见表 3。

3.3.2 植被物种多样性指数 根据植被调查所得数据计算得到行带式杨树林各带间距样地带间的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数(见表 4)。

Simpson 多样性指数与 Shannon-Wiener 物种多样性指数在各个点位间的变化近似相同,两者基本随林下水平距离增大而增大,整体上随带间距增大而增

大,但带间距 22 m 与 28 m 样地间差异不大。Pielou 均匀度指数各带间距样地均在在水平距离 2~4 m 范围内均呈递增趋势,在 4 m 之后有衰减迹象,带间距 22 m 样地在 8 m 后上升,带间距 28 m 样地在 11 m 后上升,总体上随水平距离增大而增长。Margalef 丰富度指数整体上随带间距增大而增大,在各样地中基本随林下水平距离呈递增趋势,但带间距 22 m 在水平距离 8 m 时达极值,带间距 28 m 样地丰富度指数在林带中随水平距离递增。

不同带间距行带式杨树林中的相同林下水平间距的植被物种多样性指数基本随带间距的增大而增大,而在且同一样地中植被物种多样性指数也都随林下水平间距增加而呈递增趋势。

表 3 不同样地林带带间植被群落特征

Table 3 Characteristics of vegetation communities between different forest belts in different plots

样地	群落优势种	其他伴生种	种数	盖度
A	芨芨草+沙蒿	狗尾草、碱蓬、马齿苋、大籽蒿	6	28%
	芨芨草+马唐	马齿苋、地槐、虎尾草、沙蒿、狗尾草	7	29%
B	芨芨草+碱蓬	沙葱、虎尾草、马齿苋、猪毛菜、马唐、沙蒿	8	36%
	阿尔泰狗娃花+大籽蒿	狗尾草、马齿苋、猪毛菜、地槐、虎尾草	7	36%
C	沙蒿+蒺藜	狗尾草、砂蓝刺头、芨芨草、虎尾草、碱蓬、猪毛菜	8	42%
	芨芨草+碱蓬+马唐	虎尾草、香青兰、沙蒿、大籽蒿、狗尾草、马齿苋	9	48%
	狗尾草+地角儿苗	芨芨草、沙蒿、马齿苋、碱蓬、马唐	7	36%
D	芨芨草+碱蓬	沙蒿、虎尾草、马唐、猪毛菜、蒺藜、砂蓝刺头	8	45%
	芨芨草+狗尾草+地角儿苗	虎尾草、沙蒿、地槐、马齿苋、碱蓬、蒺藜、马唐	10	47%

注:芨芨草(*Achnatherum splendens*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、碱蓬(*Suaeda glauca* Bunge)、马齿苋(*Portulaca oleracea*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、地槐(*Sophora flavescens*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、地角儿苗(*Oxytropis bicolor* Bunge)。

表 4 不同样地林带带间植被物种多样性指数

Table 4 Vegetation species diversity index between forest belts in different plots

样地带 间距/m	水平 距离/m	Simpson	Shannon- Wiener	Pielou	Margalef
8	2	0.55	1.10	0.57	1.29
	4	0.60	1.18	0.61	1.58
16	2	0.56	1.22	0.62	1.52
	4	0.72	1.51	0.85	1.64
22	8	0.74	1.60	0.78	1.75
	2	0.62	1.31	0.78	1.53
28	4	0.79	1.77	0.88	1.65
	8	0.78	1.77	0.80	1.73
	11	0.80	1.82	0.90	1.67
	2	0.72	1.49	0.66	1.44
	4	0.77	1.71	0.88	1.67
	8	0.79	1.74	0.77	1.50
	11	0.82	1.79	0.72	1.90
	14	0.80	1.82	0.92	1.76

取不同样地林带带间植被物种多样性指数的平均值绘制曲线(详见图 6),在不同带间距的固沙林中,Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数基本随带间距增大而增大;Pielou 均匀度指数属先增后减趋势,在带间距 22 m 达到峰值,带间距 28 m 要略低于带间距 22 m;Margalef 丰富度指数在达到 16 m 带间距后基本处于平稳发展无明显增长。总体上固沙林的带间距越大,植被群落物种多样性指数越高,但并非一直递增,增长趋势在带间距 22 m 左右时开始变得平缓,甚至有下降趋势。

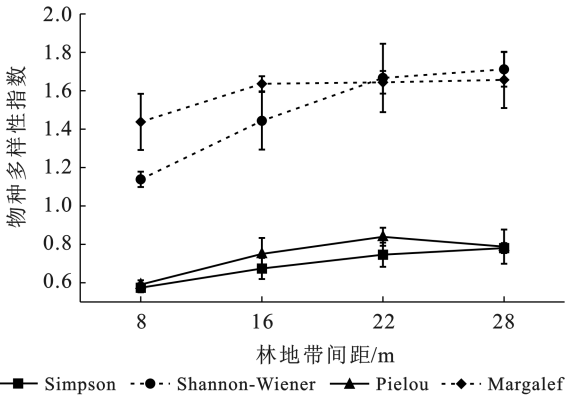


图 6 不同样地林带带间植被物种多样性指数均值
Fig.6 Mean value of vegetation species diversity index between forest belts in different plots

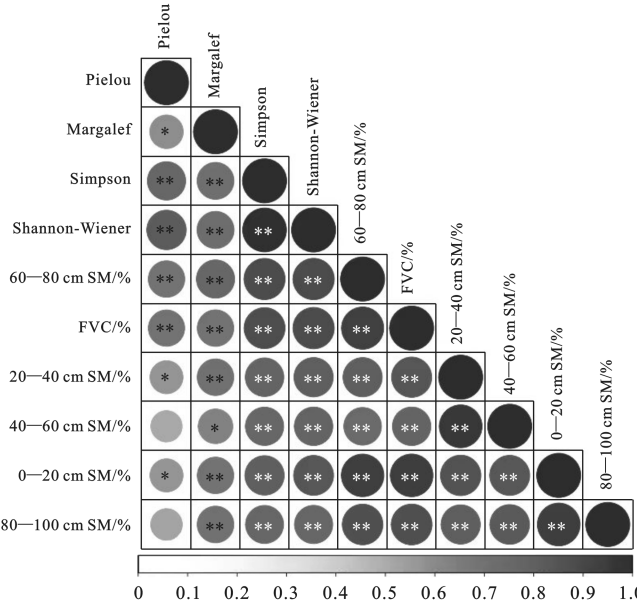
3.4 土壤水分与植被群落各指标的相关性分析

采用 R 语言软件对不同带间距行带式杨树林带间土层 0—100 cm 的土壤含水量与其相应植被指数进行 Pearson 相关性分析。由图 7 可见,0—100 cm 范围内各土层的土壤水分均相互呈极显著正相关,且 FVC 植被盖度、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 物种多样性指数均与其他指标呈极显著正相关。Margalef 丰富度指数除 40—60 cm 土层土壤水分外,与 Pielou 均匀度指数呈显著正相关,与其他指标均呈极显著正相关。而 Pielou 均匀度指数仅与 60—80 cm 土层土壤水分呈极显著正相关,与 0—40 cm 土层呈显著正相关,与 60—100 cm 范围内其他土层无显著相关性。

4 讨论

土地沙化一直是生态环境治理的重点问题,众多

学者对荒漠化防治提出了种种建议^[19]。在干旱半干旱地区防风固沙最常见的措施是栽植沙生植被与防护林,能够修复土壤和改善沙地植被盖度^[20]。低覆盖度行带式种植方式不同于高密度造林,能够使人工植被更好地向自然植被和谐过渡,达到近自然恢复的生态治理效果^[21]。水分是影响植被生长的重要因素之一,行带式固沙林的土壤水分和植被生长指标也随带间距变化产生差异^[22]。



注:Pielou 为均匀度指数, Margalef 为丰富度指数, Simpson 为多样性指数, Shannon-Wiener 为物种多样性指数, 0—20 cm SM%, 20—40 cm SM%, 40—60 cm SM%, 60—80 cm SM%, 80—100 cm SM% 分别为 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的土壤体积含水率(%), FVC 为植被盖度。

图 7 土壤水分与植被指数的 Pearson 相关性分析
Fig.7 Correlation between soil moisture and vegetation indices

在 4 种带间距行带式杨树林样地中的土壤水分与植被物种多样性指数,整体上带间距 8 m<带间距 16 m<带间距 22 m,带间距 28 m 与带间距 22 m 近似,与李卫等^[23]研究结果近似。降水是土壤水分的重要补给来源,水分从土壤表层逐渐向下渗漏,80—100 cm 土层的水分在土层 0—100 cm 深度范围内显然最低,但土壤水分并非完全随土层深度递减变化^[24]。植被根系较密集的位置,所在土层的土壤容重相对较高,并随土层深度递减^[25]。土壤孔隙度与土壤容重负相关,使得在 0—100 cm 土层深度范围内,有植被根系分布的 0—60 cm 土层的土壤孔隙度较小,土壤渗漏能力较低于 60—100 cm 土层,土壤水分通常在 40—80 cm 土层范围内含水率最高。反观根系分布最密集的林下位置,土壤孔隙度较小,虽然随土层深度变化递增,但也使 80—100 cm 土层土壤水分补给显著差于 20—60 cm 土层。在不同带间距样地

中,较宽样地的土壤容重明显高于较窄的样地,前者一方面土壤修复程度较好,另一方面土壤孔隙度较小,使得 0—60 cm 土层的土壤水分向下渗漏较少,使带间草本植被根系的可利用水分更高^[26]。

在各带间距样地中,林下 2 m 位置的 0—100 cm 各土层水分显著低于带间其他位置的土壤水分。杨树的根系在垂直方向上,细根主要分布在 0—20 cm 土层,粗根常集中在 20—60 cm 土层,60—100 cm 土层范围内仍有少量细根,水平方向上主要根系围绕树干分布 1 m 左右半径,但少量根系可能会伸展至冠幅 6 倍^[27-28]。根系的耗水使得林带根系分布区域土层 0—60 cm 的土壤水分被大量吸收^[29]。带间距 8 m 的行带式杨树林栽植密度较低,带间几乎均有杨树根系分布,甚至林带一侧的细根会伸展到另一侧林下土壤中,在土壤水分利用上种内竞争也较为激烈,进而不仅使土壤水分被过度利用,也会严重影响带间灌草类植被的生长。在同一带间距样地中,林下 2 m 水平距离的土壤水分总是低于带间其他位置,不仅是因为林下根系分布密集,同时也有林带的冠层截流效应,从树干向四周伸展的树木冠层会使林下的降水补给从冠层汇流入杨树主干直至被根部,而林下的土壤难以得到补给,使得林下的草本植被生长受到明显的限制^[30]。林下根系耗水、林带的冠层截流和土壤水分渗漏能力差异,使得行带式杨树林不同带间距、不同林下水平距离和不同土层深度的土壤水分各不相同。

水分是影响植被生长的重要指标,从相关性矩阵可知 0—100 cm 土层范围内土壤水分与大部分植被指标均呈极显著正相关,行带式杨树林不仅土壤水分随带间距和林下水平间距增加而增大,植被恢复效应也同递增,这与姜丽娜等^[11,14-15]研究结果相似。但 Pielou 均匀度指数与 Margalef 丰富度指数的变化趋势并非完全递增,均匀度与各土层土壤水分无极显著关系,其中土层 80—100 cm 土壤水分对地表灌草作物生长基本无影响^[31]。而 40—60 cm 土层土壤水分较高时,由于水分渗漏作用也表明 0—100 cm 土层范围整体较高^[32]。造成土壤水分较高地带生长分布不均是由于此地带更适于优势种生长,但水分并不足以供给所有灌草植被,从而造成种间竞争较大,抑制其他伴生种生长^[33]。故均匀度指数与丰富度指数与土壤水分无极显著正相关性。各带间距样地的带间植被生长情况差异显著,但带间距 22 m 与带间距 28 m 的带间植被总体恢复程度近似。林下水平间距 8 m 内土壤水分差异较大,8 m 之后会平缓递增趋于稳定,但试验调查中发现带间距 28 m 样地会有较贫瘠的地带,局部植被生长零稀。相比于带间距 22 m,带

间距 28 m 的行带式杨树林的带间土壤的平均土壤含水率可能更高,但并不利于带间植被修复,优势种的大肆生长也导致其他植物种生存条件变差^[34]。两行一带行带式杨树林中,总体上带间距越大,土壤水分越高,带间距 22 m 相比 28 m 两者土壤水分特征近似,但带间距 28 m 样地的植被生长分布并不稳定。相比带间距 28 m,带间距 22 m 的样地的带间的平均土壤水分总体略低于前者,一定程度上相当于水分的中度干扰使得带间植被物种多样性更好^[35],使带间距 22 m 行带式杨树林植被恢复效应最佳。

5 结论

(1) 不同带间距行带式固沙林带间 0—100 cm 土层的土壤水分大致随带间距增加而升高,整体上带间距 8 m<16 m<22 m,带间距 28 m 与 22 m 近似,其相对应的土壤容重带间距 22 m,28 m 明显高于带间距 8 m,16 m,反之带间距 22 m,28 m 样地的土壤孔隙度相对较低。其中各样地带间土壤水分大体均随林下水平间距增大而升高,林下 2 m 范围内最低,林下水平间距增至约 11 m 时达到峰值。

(2) 不同带间距行带式固沙林带间植被物种多样性差异显著,各指数在整体上带间距 8 m<16 m<22 m,带间距 28 m 与 22 m 近似,其中 Pielou 均匀度指数与 Margalef 丰富度指数在带间距 28 m 样地中相对带间距 22 m 较差。不同带间距行带式固沙林带间各土层土壤水分与各植被指数间大体上均呈极显著正相关,仅有 Pielou 均匀度指数与 Margalef 丰富度指数有所差异。

(3) 带间距 22 m 行带式固沙林的土壤水分与植被指数均优于其他带间距的固沙林样地,带间距 22 m 的行带式固沙林带间植被恢复效应最佳。沙区河岸行带式固沙林的林带间距选择中,带间距越大植被恢复效果越好,带间距达到 22 m 时为极值,故选取 22 带间距种植行带式固沙林最优。

[参 考 文 献]

- [1] 张云芝,胡云锋,韩月琪,等.全球主要生态退化区 and 研究热点区的空间分布与演变[J].生态学报,2021,41(19):7599-7613.
- Zhang Yunzhi, Hu Yunfeng, Han Yueqi, et al. Spatial distributions and evolutions of global major ecological degradation regions and research hotspot regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7599-7613.
- [2] Wei Yunjie, Zhen Lin, Du Bingzhen. The evolution of desertification control and restoration technology in typical ecologically vulnerable regions [J]. Journal of Resources and Ecology, 2022,13(5):775-785.
- [3] Liang Yuting, Hu Yunfeng, Han Yueqi. Spatial distribution and dynamic changes in research hotspots for desertification in China based on big data from CNKI [J]. Journal of Resources and Ecology, 2019,10(6):692.
- [4] 杨文斌,李卫,党宏忠.低覆盖度治沙:原理、模式与效果[M].北京:科学出版社,2016.
- Yang Wenbin, Li Wei, Dang Hongzhong. Low coverage desertification control: principle, model and effect [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 杨文斌,王涛,冯伟,等.低覆盖度治沙的理论与沙漠科技进步[J].中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- Yang Wenbin, Wang Tao, Feng Wei, et al. The theory and progress of sand control with low coverage [J]. Journal of Desert Research, 2017,37(1):1-6.
- [6] Qiu Dexun, Xu Ruirui, Wu Changxue, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2022,609:127730.
- [7] 代林利,周丽丽,伍丽,华,等.不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征[J].生态学报,2022,42(2):710-719.
- Dai Linli, Zhou Lili, Wu Lihua, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):710-719.
- [8] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(03):75-80.
- Yang Wenbin, Wang Tao, Xiong Wei, et al. Overview of the core hydrological principle of low coverage desertification control theory [J]. Journal of Desert Research, 2019,41(03):75-80.
- [9] 何晓帆,田丽慧,汪海娇,等.高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征[J].水土保持通报,2023,43(2):23-33.
- He Xiaofan, Tian Lihui, Wang Haijiao, et al. Temporal-spatial variation of soil moisture content of different *Hippophae rhamnoides* communities in an alpine desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):23-33.
- [10] 冯伟,李卫,杨文斌,等.毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应[J].水土保持研究,2019,26(3):101-107.
- Feng Wei, Li Wei, Yang Wenbin, et al. Dynamic response of soil moisture to rainfall in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest of mu us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):101-107.
- [11] 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等.低覆盖度行带式固沙林对土壤

- 及植被的修复效应[J].生态学报,2013,33(10):3192-3204.
- Jiang Lina, Yang Wenbin, Lu Qi, et al. The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(10):3192-3204.
- [12] Wang Zhao, Zhang Tinglong, Pei Chenyang, et al. Multisource remote sensing monitoring and analysis of the driving forces of vegetation restoration in the mu us sandy land [J]. Land, 2022,11(9):1553.
- [13] 封扬帆,李鹏,张祎,等.西柳沟流域拦沙坝沟道冲刷减蚀能力模拟[J].水土保持学报,2022,36(5):24-31.
- Feng Yangfan, Li Peng, Zhang Yi, et al. Simulation on the gully erosion reduction ability of check dam in Xiliugou basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(5):24-31.
- [14] 王普庆,侯素珍.西柳沟丘陵区土壤组成及对流域产沙的影响[J].人民黄河,2020,42(2):1-4.
- Wang Puqing, Hou Suzhen. Influence of different grain sizes of soil composition of Xiliugou gullied rolling loess area to the sediment yield of watershed [J]. Yellow River, 2020,42(2):1-4.
- [15] 姜丽娜.低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤、植被修复效应的研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- Jiang Lina. Study on the effect of low coverage belt sand-fixing forest on promoting interzone soil and vegetation restoration [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [16] 付永硕,张晶,吴兆飞,等.中国植被物候研究进展及展望[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(3):424-433.
- Fu Yongshuo, Zhang Jing, Wu Zhaoifei, et al. Vegetation phenology response to climate change in China [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(3):424-433.
- [17] Kassa G, Bekele T, Demissew S, et al. Plant species diversity, plant use, and classification of agroforestry homegardens in Southern and Southwestern Ethiopia [J]. Heliyon, 2023,9(6):e16341.
- [18] 姜丽娜,杨文斌,姚云峰,等.不同配置的行带式杨树固沙林与带间植被修复的关系[J].中国水土保持科学,2011,9(2):88-92.
- Jiang Lina, Yang Wenbin, Yao Yunfeng, et al. Relationship between sand-fixing forest of *Populus* under different belts distribution pattern and their undergrowth vegetation recovery [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011,9(2):88-92.
- [19] Feng Yuanyuan, Wang Shihang, Zhao Mingsong, et al. Banner from 2010 to 2020 based on remote sensing data [J]. Water, 2022,14(11):1777.
- [20] 吴雪琼,杨文斌,李卫,等.低覆盖度行带式种植模式下赤峰杨根系分布特征[J].林业科学研究,2015,28(2):255-260.
- Wu Xueqiong, Yang Wenbin, Li Wei, et al. Root distribution of *Populus × xiaozhuanica* cv. 'chifengensis' planted under low coverage belt-scheme [J]. Forest Research, 2015,28(2):255-260.
- [21] 郭艳菊,马晓静,许爱云,等.宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征[J].生态学报,2022,42(4):1571-1581.
- Guo Yanju, Ma Xiaojing, Xu Aiyun, et al. Spatial characteristics of soil moisture and vegetation in desertification grassland in Eastern Ningxia sand-wind area, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(4):1571-1581.
- [22] 赵鑫,辛一凡,张应龙,等.不同植被类型对毛乌素沙地背风坡土壤水分时空变化的影响[J].西北林学院学报,2021,36(3):36-43.
- Zhao Xin, Xin Yifan, Zhang Yinglong, et al. Effects of different vegetation types on temporal and spatial variation of soil moisture on leeward slope of Mu Us sandy land [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021,36(3):36-43.
- [23] 李卫,冯伟,杨文斌,等.低覆盖度行带式固沙林带间土壤水分动态特征[J].水土保持学报,2015,29(2):163-167.
- Li Wei, Feng Wei, Yang Wenbin, et al. Soil moisture dynamic characteristics of low coverage sand-fixing forest belts [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):163-167.
- [24] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.
- Li Ping, Wang Dongmei, Ding Cong, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(5):1610-1620.
- [25] 印家旺,阿拉木萨,苏宇航,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J].水土保持通报,2022,42(4):90-98.
- Yin Jiawang, Ala Musa, Su Yuhang, et al. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):90-98.
- [26] 刘茜茹,冯天骄,王平,等.晋西黄土区长期植被恢复对土壤表层入渗与水分储量差异的影响[J].水土保持通报,2023,43(2):50-59.
- Liu Xiru, Feng Tianjiao, Wang Ping, et al. Effect of long-term vegetation restoration on surface soil water

infiltration and and water storage in loess area of western province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):50-59.

[27] 席本野.杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J].北京林业大学学报,2019,41(12):37-49.
Xi Benye. Morphology, distribution, dynamic characteristics of *Poplar* roots and its water uptake habits [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(12):37-49.

[28] Avice J C, Ourry A, Lemaire G, et al. Root protein and vegetative storage protein are key organic nutrients for alfalfa shoot regrowth [J]. Crop Science, 1997,37(4):1187-1193.

[29] 董玉峰,姜岳忠,王卫东,等.大汶河流域杨树根系的生物量组成和空间分布[J].中国水土保持科学,2014,12(5):30-35.
Dong Yufeng, Jiang Yuezhong, Wang Weidong, et al. Composition and spatial distribution of *Populus* root biomass in the Dawenhe Watershed [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014,12(5):30-35.

[30] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(3):75-80.
Yang Wenbin, Wang Tao, Xiong Wei, et al. Overview of hydrological principle of low vegetation coverage sand control [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(3):75-80.

[31] 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.
Chen Jiajia, Huang Lei, Jia Hongfei, et al. Vertical variability and dynamic simulation of soil moisture in different artificial vegetation arrangements in the Tengger Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(4):126-133.

[32] 吴丽丽,刘丹一,杨文斌,等.降雨量、土壤蓄水量对流动沙地土壤水分深层渗漏的影响[J].中国沙漠,2020,40(3):210-218.
Wu Lili, Liu Danyi, Yang Wenbin, et al. Relationship between precipitation and soil water storage and soil deep percolation in mobile sand land [J]. Journal of Desert Research, 2020,40(3):210-218.

[33] 孙于卜.晋西黄土区果农间作系统种间土壤水分竞争及调控[D].北京:北京林业大学,2019.
Sun Yubu. Interspecific soil water competition and regulation of fruit intercropping system in loess region of Western Shanxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[34] 朱羚,金一兰,丛日慧,等.环境因素及种间竞争在群落多样性格局中的作用[J].干旱区研究,2018,35(6):1427-1435.
Zhu Ling, Jin Yilan, Cong Rihui, et al. Effects of environmental factors and interspecific competition in community biodiversity pattern [J]. Arid Zone Research, 2018,35(6):1427-1435.

[35] 罗超,郭小平,冯昶栋,等.乌海周边土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系[J].草业学报,2021,30(11):13-28.
Luo Chao, Guo Xiaoping, Feng Changdong, et al. The characteristics of the soil seed bank in Wuhai and surrounding areas and the relationship with vegetation and soil factors [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021,30(11):13-28.

(上接第 8 页)

[28] Tracy S R, Nagel K A, Postma J A, et al. Crop improvement from phenotyping roots: Highlights reveal expanding opportunities [J]. Trends in Plant Science, 2020,25(1):105-118.

[29] Zhang Xiang, Xiao Yang, Wan Hui, et al. Using stable hydrogen and oxygen isotopes to study water movement in soil-plant-atmosphere continuum at Poyang Lake wetland, China [J]. Wetlands Ecology and Management, 2017,25(2):221-234.

[30] 邢丹,王震洪,申刚,等.丛枝菌根真菌对岩溶区植物水分吸收利用的促进作用探讨[J].世界林业研究,2019,32(3):24-29.
Xing Dan, Wang Zhenhong, Shen Gang, et al. Promoting mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi on plants water absorption and utilization in karst area [J]. World Forestry Research, 2019,32(3):24-29.

[31] 袁聚云.土质学与土力学[M].第 4 版.北京:人民交通出版社,2009.
Yuan Juyun. Soil properties and Soil Mechanics [M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press,2009.

[32] 徐智敏,孙亚军,高尚,等.干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义[J].煤炭学报,2019,44(3):767-776.
Xu Zhimin, Sun Yajun, Gao Shang, et al. Law of mining induced water conduction fissure in arid mining area and its significance in water-preserved coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(3):767-776.

[33] 毕银丽,李明超,柯增鸣,等.土层重构模式下接种 DSE 对玉米根系形态及水分利用的影响[J].煤炭学报,2023,48(8):3191-3203.
Bi Yinli, Li Mingchao, Ke Zengming, et al. Effects of DSE inoculation on maize growth and water use under soil reconfiguration mode [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(8):3191-3203.