

高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征

何晓帆, 田丽慧, 汪海娇, 金耀涛, 李耀

(青海大学 省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘 要: [目的] 研究高寒半干旱区沙棘群落内的土壤水分时空变异特征及其影响因素, 为青海湖流域沙地生态系统恢复提供科学依据, 为半干旱风沙区生态环境保护 and 建设提供理论指导。[方法] 以青海湖东克土沙地不同年限栽植的人工沙棘(*Hippophae rhamnoides*)群落为研究对象, 在 2020 和 2021 年生长季, 对各沙棘群落进行植被调查和土壤取样。通过经典统计学方法, 对沙棘在不同沙丘地貌部位的植被特征和土壤水分的时空变化特征进行综合分析。[结果] ①就植株株高来看, 2008 年栽植的沙棘(08SJ)植株高度最高, 其次为 1987 年栽植的沙棘(87SJ), 2015 年栽植的沙棘(15SJ)株高最小。植被盖度表现为: 87SJ > 15SJ > 08SJ; ②土壤含水量表现为: 87SJ > 08SJ > 15SJ, 87SJ 与 15SJ 均在迎风坡土壤含水量最高, 而 08SJ 土壤含水量在背风坡达最大值; ③土壤水分呈现明显的季节变化, 各样地都表现为生长旺盛期土壤含水量最低而生长末期最高; ④土壤水分随土层深度的增加整体表现为 0—20 cm 处土壤含水量最高, 在 60 cm 深度以下变化逐渐趋于稳定。[结论] 土壤水分在高寒半干旱沙区沙棘群落下的分布除受到局地降水量、植被分布格局的影响外, 还与沙丘微地貌形态有关。

关键词: 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)群落; 土壤水分; 季节变化; 垂直分异; 青海湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0023-11

中图分类号: S793.6

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230420.001; 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.

Temporal-spatial Variation of Soil Moisture Content of Different *Hippophae Rhamnoides* Communities in an Alpine Desert

He Xiaofan, Tian Lihui, Wang Haijiao, Jin Yaotao, Li Yao

(State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xi'ning, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The temporal-spatial variation of soil moisture and its influencing factors for semi-arid alpine desert communities of *Hippophae rhamnoides* were studied in order to provide a scientific basis for the restoration of ecosystems of Qinghai Lake and semi-arid deserts. [Methods] *H. rhamnoides* plantations were taken as the research object. In the growing seasons of 2020 and 2021, vegetation investigation and soil sampling was carried out on the *H. rhamnoides* communities in the Ketu sandy land on the eastern shore of Qinghai Lake. Through the use of classical statistical methods, the vegetation characteristics of *H. rhamnoides* and the temporal-spatial changes of soil moisture in different dune geomorphic parts were comprehensively analyzed. [Results] ① In terms of vegetation growth, plant height of *H. rhamnoides* planted in 2008 (08SJ) was the tallest, followed by plant height in 1987 (87SJ). Plant height in 2015 (15SJ) was the shortest. Vegetation coverage followed the order of 87SJ > 15SJ > 08SJ. ② Soil moisture content of *H. rhamnoides* communities followed the order of 87SJ > 08SJ > 15SJ. Among these communities, the soil moisture contents of the *H. rhamnoides* planted in 1987 (87SJ) and the *H. rhamnoides* planted in 2015 (15SJ) were the

收稿日期: 2022-07-22

修回日期: 2022-09-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“高寒半干旱沙地沙棘的水分来源与生态适应机制”(41961017); 中国科学院西部青年学者项目(2021-1-1)

第一作者: 何晓帆(1998—), 女(汉族), 河北省枣强县人, 硕士研究生, 研究方向为沙地生态水文。Email: xiaofanhewy@163.com。

通讯作者: 田丽慧(1988—), 女(汉族), 甘肃省静宁县人, 博士, 副教授, 主要从事沙地生态水文学等方面的研究。Email: lhtian@qhu.edu.cn。

highest on the windward slope, while the soil moisture content of the *H. rhamnoides* planted in 2008 (08SJ) reached the maximum value on the leeward slope; ③ Soil moisture content showed obvious seasonal variation, and the soil moisture content was the lowest in the vigorous growth period, and highest at the end of the growing season. ④ Soil moisture content was highest in the 0—20 cm soil layer, and changed little below a depth of 60 cm. [Conclusion] Vegetation distribution pattern, precipitation, and its seasonal changes were the main factors affecting the temporal-spatial variation of soil moisture under *H. rhamnoides* communities in a semi-arid alpine desert ecosystem.

Keywords: *Hippophae rhamnoides* communities; soil moisture; temporal variations; vertical change; Qinghai Lake

水分作为连接土壤、植被和大气的关键要素^[1]及物质和能量流动过程的运输载体^[2],是地上生态系统水循环和水资源转化过程的关键环节,也是影响干旱地区众多植物存活及其分布格局的重要因子^[3-5]。水分经土壤到达植物根系被吸收,通过细胞传输进入植物茎,由植物木质部分到达叶片,再由叶片气孔扩散到静空气层,最后参与大气的湍流变换,即 SPAC(土壤—植物—大气连续体)理论^[6]。土壤水分主要影响沙地生态系统的管理与发展,对沙区结构的稳定性以及功能的表现强度具有显著影响,也是决定沙地生态系统植被分布格局和驱动群落演替过程的主要因子^[6-7]。因此,开展土壤时空变异特征的研究可为沙地人工林的可持续发展与管理提供合理的指导。

土壤、气候、植被和地形条件等自然要素对土壤水分具有综合性影响,在时间尺度和空间尺度均表现出较强的异质性^[8-11]。沙地土壤水分含量的变化规律、土壤水分与植被和环境之间的互馈关联作用,是影响沙地生态系统结构及其稳定性的重要因素^[6]。沙地土壤水分含量主要体现为降水分布差异导致的土壤含水量呈现出季节性变化^[6],表层或者浅层的可利用水源常用于植被维持自身生长发育,主要受到降水的向下入渗和土壤的蒸散发作用,深层土壤水分常以“土壤水库”的身份产生影响,在干旱时对浅根系植物进行水分补给^[12]。土壤水分在空间上的差异是表征干旱、半干旱区土壤水分变化的重要因素之一^[13-14],也是沙地恢复重建的主要依据及驱动植被演替的关键因子。沙地灌丛群落从演替初期到群落较为稳定的固沙时期,土壤水分在空间上的异质性与灌木物种的分布格局在一定程度上相互响应^[15],如果不考虑土壤水分这一条件,盲目对沙区进行人工植被恢复治理可能会导致植物吸收水分的土层逐渐变干,导致生态环境恶化^[16]。因此,对沙地土壤水分的时空异质性的动态变化的研究有助于定量分析水文过程与生态格局之间的关系,这也是深入认识人工固沙植被的稳定性发展的关键环节。

青海湖流域地处高寒半干旱气候区,降水少且季

节分配不均,生态环境十分脆弱。土壤水分作为青海湖流域沙地限制植被生长的关键因素、平衡水资源和水文循环过程的重要因子^[17-18],具有重要的研究价值。不同学者对该区固沙植被与土壤水分的关系进行了相关研究。鲁瑞洁等^[19]选取青海湖流域典型的固沙植物沙蒿(*Artemisa desterorum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和乌柳(*Salix cheilophila*)为研究对象,探讨了 3 种植物对土壤温湿度、有机质及养分组成的响应。汪海娇等^[20]以不同植被恢复区为研究区,探讨了该区土壤水分的时空变化特征,研究表明土壤水分的时空分布与沙丘微地貌形态之间具有一定的相关关系,但对不同年限栽植的固沙植物在不同沙丘微地貌之间的土壤水分时空变化特征研究较少。

沙棘从 20 世纪 80 年代就作为主要治沙物种栽植在青海湖流域的流动沙丘上,现已成为该区分布最广的人工固沙植物。该区沙棘的造林面积达到 176.4 hm²,沙棘造林沙丘的植被盖度平均增加 11.6%^[21]。针对该区的沙棘,已开展了沙棘群落与风沙活动特征的变化规律^[21]及综合防风固沙效益^[22]等方面的研究。那么,经过 30 a 的发展,人工固沙植被影响下的沙地土壤水分时空分布如何?这需要我们继续深入研究。因此,本文选择不同年限栽植的沙棘群落作为研究对象,基于样方植被调查及野外定点取样测定土壤水分,系统研究高寒半干旱区沙棘群落内的土壤水分的时空变异特征及其影响因素,以期青海湖流域沙地生态系统恢复提供科学依据,为半干旱风沙区生态环境保护 and 建设提供理论指导。

1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州青海湖东克土沙地(36°47′—36°50′N,100°47′—100°50′E)。海拔 3 176~3 340 m,面积约为 7.53×10⁴ hm²,地处我国东部季风区、西北干旱区和西南高寒区的交叉地带,属高原半干旱高寒气候区。该区气候具有日照充足、冬寒夏凉的特点。该区年均气温为 0.93℃,年均

降水量约 438.6 mm^[23]。冬季盛行 W-NW 风,年均风速约 4.5 m/s,全年 N-NE 方位风频最高,约占全年的 35%^[24]。植被以旱生灌木为主要植物群落,沙蒿为天然固定沙丘的优势种,天然植被多为青海苔草(*Carex qinghaiensi*)。该区植物的生长季通常为 5—9 月,但沙棘的生长期可达 10 月中下旬。

2 研究方法

2.1 试验样地选择及数据来源

在以上研究区内选择 1987,2008 和 2015 年栽植沙棘的沙丘作为研究样地进行标记(表 1),并分别在每个样地的 3 个地貌部位迎风坡(W)、丘顶(T)和背风坡(L)各围设一个 10 m×10 m 的固定样方,自 2017 年 5 月以来开展植被生长及生态水文的长期监测。87SJ 为 1987 年以 1.5 m×1.5 m 的规格铺设麦草沙障后栽植沙棘实生苗,伴生青海苔草和赖草(*Leymus secalinus*)。08SJ 为 2008 年铺设 1.5 m×1.5 m 规格麦草沙障后栽植沙棘实生苗,2009 年通过种子直播柠条(*Caragana korshinskii*),柠条造林密

度为每 1 hm² 植 9 200 株^[23],天然植被主要为青海苔草。15SJ 为 2015 年铺设 1.5 m×1.5 m 规格麦草沙障后栽植沙棘实生苗,同年通过高杆深栽方式栽植乔木种小叶杨(*Populus simonii*),小叶杨造林密度为每 1 hm² 植 2 500 株^[24],该样地几乎无天然植被生长。对标记的固定样方于 2020 和 2021 年夏季进行植被调查,主要包括物种数、高度、冠幅等指标,并计算灌木盖度和群落的物种丰富度(表 2)。降水数据来自于该区架设的自计式雨量筒的监测数据。该区沙丘的地下水在丘顶的埋深深度为 13~15 m,人工治理沙丘的高度在 8~12 m,该区地下水较难被生长在沙丘上的人工固沙植物吸收利用^[23]。经调查,87SJ 样地沙棘下方发育有生物结皮;08SJ 沙丘的迎风坡和丘顶的生物结皮明显,但背风坡的沙棘下方几乎无结皮发育;15SJ 样地内无结皮发育。该区沙棘根系特征表现为主根越来越粗,15SJ 沙棘根系分布在 0—60 cm 土层,08SJ 的根深达 260 cm,87SJ 根深则超过 340 cm^[25],但沙棘吸水根系主要分布在 100 cm 以内,因此,本研究只考虑 120 cm 土层深度。

表 1 试验样地基本信息
Table 1 Features of study sites in Ketu sandy land at eastern shore of Qinghai Lake

样地编号	沙丘高度/m	样地位置	海拔/m	地下水位埋深/m	治理方式	治理时间
87SJ	9.0	36°47′N,100°47′E	3 218	13.0	麦草沙障+沙棘实生苗栽植	1987 年
08SJ	10.6	36°46′N,100°46′E	3 230	14.6	麦草沙障+沙棘实生苗栽植+直播柠条	2008 年
15SJ	10.3	36°46′N,100°46′E	3 215	13.3	麦草沙障+沙棘实生苗栽植	2015 年

注:地下水位埋深为沙丘丘顶处地下水位埋深而非丘间地。

表 2 试验样地植被群落特征
Table 2 Vegetation community characters in Ketu sandy land at eastern shore of Qinghai Lake

样地编号	优势种	高度/cm	东西长/cm	南北长/cm	沙棘盖度/%	沙棘盖度比例/%	密度/株	丰富度
87SJ-W	沙蒿	33.88±12.27	47.75±22.30	66.63±30.35	13.54±0.24	6.80	40	5
87SJ-T	沙棘	55.39±24.83	53.03±29.49	64.08±30.29	15.39±0.42	56.33	38	6
87SJ-L	沙棘	71.41±22.32	59.61±26.39	79.58±35.37	33.43±0.44	91.69	64	6
08SJ-W	沙棘	65.49±14.85	49.57±20.98	60.31±24.53	11.69±0.24	55.00	35	5
08SJ-T	沙棘	77.27±27.84	71.06±28.44	81.67±28.50	21.82±0.48	48.00	33	6
08SJ-L	沙棘	59.56±19.44	60.59±23.92	72.65±29.34	16.60±0.43	64.35	34	7
15SJ-W	沙棘	28.80±12.87	34.44±17.27	44.46±19.03	14.09±0.42	43.31	30	6
15SJ-T	沙棘	27.40±12.31	27.51±13.72	31.91±14.30	16.60±0.53	79.71	33	7
15SJ-L	沙棘	32.77±15.35	29.14±13.30	34.15±14.21	27.91±0.60	58.72	35	6

注:表中数值为均值±标准误。

2.2 土壤水分与颗粒组成测定

土壤水分采用烘干法测定。在 2020 年生长季中

后期和 2021 年整个生长期,每月中旬在选定的样方内用土钻进行人工取样。每个样地的取样深度为

120 cm,分 7 个层次,即 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120 cm,每层取 3 钻土,混匀后装入铝盒中,每月共计取得 63 个铝盒样品。样品带回室内用 1/100 电子天平先称湿重 g_1 (g),然后将其放入 105 ℃烘箱内烘干至恒重,待冷却后称得干重 g_2 (g)。利用公式计算各土层样品的土壤质量含水量 φ ,计算公式为:

$$\varphi(\%)=(g_1-g_2)/(g_2-g_0)\times 100 \tag{1}$$

式中: φ 为质量含水量(%); g_0 为铝盒重; g_1 为铝盒重+初始土样重; g_2 为铝盒重+烘干土样重。

对采集的各层土壤样品在青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室利用 Mastersizer 3000 粒度测量仪(Marlvern Co., UK)进行土壤颗粒组成的测定。

2.3 数据处理

不同沙棘群落在同一地貌部位的土壤含水量的差异性以及同一样地沙棘在不同部位的土壤含水量的差异性在 SPSS 26 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)中采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行两两比较。本文中所有相关分析图皆应用 Origin 2018(Origin Lab., Northampton, USA)绘制。

3 结果与分析

3.1 植被生长状况

由表 2 可知,除 87SJ 迎风坡优势种为沙蒿外,其他样地的优势种均为沙棘,各样地之间的物种数几乎

相同。沙棘在 87SJ 背风坡密度最大,迎风坡仅有少量分布。08SJ 和 15SJ 样地的沙棘数量相差不大,都为人工栽植之后保存的数量。2008 年栽植的沙棘长势最好,且在丘顶表现最为突出,其他两个沙丘的沙棘在背风坡长势最好。从沙棘的盖度变化情况来看,盖度与植株生长态势及密度呈正相关关系,87SJ 背风坡的沙棘盖度最高(33.43%±0.44%),15SJ 背风坡的盖度最高为 27.22%±0.60%,而 08SJ 丘顶的盖度最高为 21.82%±0.48%。

3.2 降水分布特征

研究区 2020 和 2021 年降水均主要集中在 5—9 月,全年降水量峰值出现在 8 月,分别为 102.30 和 125.90 mm。其中生长季降水最低值为 3.70 mm,出现在 2020 年生长季末期的 10 月。对比来看,2021 年生长季的总降水量(422.20 mm)高于 2020 年(410.40 mm),2020 年生长季初期(5—6 月)降水量高于 2021 年,生长旺盛期的 8 月及生长末期(9—10 月)降水量低于2021 年,而 2021 年 7 月降水量明显偏低,仅为 60.40 mm。2021 年的全年总降水量(459.50 mm)要略高于 2020 年(437.80 mm)。

3.3 土壤颗粒分布特征

研究样地土壤中的黏粒和极粗砂含量极少,以中砂和细砂为主。由表 3 可以看出,随着固沙年限的增加,粉粒和黏粒含量逐渐增加,87SJ 粉粒含量最高,可达 6.26%。从整个土壤剖面(120 cm 深度)来看,08SJ 土壤中的细颗粒物相对较多,而 87SJ 和 15SJ 土壤相对较为粗化。

表 3 研究样地 0—120 cm 深度土壤粒度组成
Table 3 Particle size composition of 0—120 cm soil layer at study sites

位 置	黏 粒	粉 粒	极细砂	细 砂	中 砂	粗 砂	极粗砂
87SJ-W	0.32(0.21)	6.74(0.82)	1.03(1.02)	22.81(4.81)	54.60(6.69)	14.39(9.16)	0.10(0.17)
87SJ-T	0.34(0.13)	6.37(0.73)	1.47(0.70)	25.53(5.51)	54.57(2.04)	11.72(4.97)	0.00(0.00)
87SJ-L	0.50(0.25)	5.68(1.51)	0.69(0.76)	23.79(3.24)	58.61(3.47)	10.72(3.16)	0.00(0.00)
08SJ-W	0.10(0.10)	6.12(1.30)	5.48(3.40)	40.88(3.12)	42.99(4.54)	4.33(2.43)	0.10(0.11)
08SJ-T	0.05(0.07)	5.05(1.30)	5.78(2.21)	42.85(2.88)	42.47(4.24)	3.73(0.53)	0.06(0.08)
08SJ-L	0.09(0.08)	5.27(1.09)	4.47(2.76)	36.60(3.32)	47.25(5.49)	6.30(1.40)	0.01(0.03)
15SJ-W	0.29(0.12)	3.94(1.76)	3.36(1.11)	50.67(2.96)	38.23(3.61)	3.38(1.70)	0.00(0.00)
15SJ-T	0.22(0.13)	4.19(1.17)	3.24(1.03)	29.67(11.15)	47.99(3.42)	14.68(7.13)	0.00(0.00)
15SJ-L	0.22(0.12)	3.75(1.17)	3.69(1.70)	32.74(10.44)	44.29(2.02)	15.30(7.58)	0.00(0.00)

注:各粒级粒径分别为:黏粒 $d<0.005$ mm,粉粒 0.005~0.05 mm,极细砂 0.05~0.063 mm,细砂 0.063~0.25 mm,中砂 0.25~0.5 mm,粗砂 0.5~1 mm,极粗砂 1~2 mm;数据表示平均值(标准误)。

从土壤颗粒的垂直分布来看(图 1),随着深度的增加,各样地粉粒、黏粒含量变化不明显。87SJ 在丘顶和背风坡的土壤颗粒组成在垂直方向上变化相似,

随着土层深度的增加,细砂含量先减小后增加,在 60 cm 以下趋于稳定。迎风坡表层粗颗粒物居多,中粗砂含量达(74%±0.8%),在 20 cm 以下呈缓慢

下降趋势。08SJ 在迎风坡和背风坡的细颗粒物随深度增加先减少后增多,背风坡细砂含量在 100—120 cm 深度呈减小趋势,丘顶的中粗砂含量在表层 20 cm 处明显减小后随土层深度增加而增加。15SJ 迎风坡和丘顶在表层 0—10 cm 的细砂含量高于中粗

砂,丘顶的细砂含量在 10—20 cm 迅速下降至最低值 ($23\% \pm 0.3\%$),中粗砂含量呈现相反趋势,在 40 cm 以下变化不明显,稳定在 $61\% \sim 63\%$ 范围内。背风坡细砂含量在 40—60 cm 明显增加,在 100—120 cm 处达最大值 ($46\% \pm 0.6\%$)。

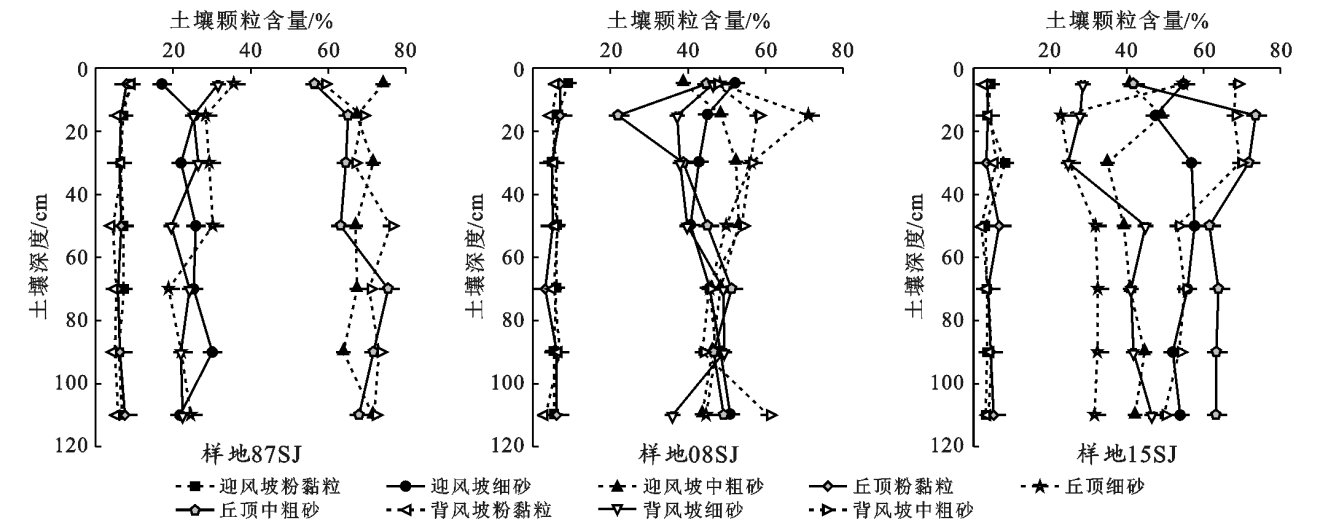


图 1 研究样地 (0—120 cm) 粒度垂直分布特征

Fig.1 Vertical distribution of soil particle size characteristics of 0—120 cm layer at study sites

3.4 土壤水分的季节变化特征

不同沙棘群落内土壤含水量随季节呈现波动性变化,在生长季均表现出先减小后增加再减小的趋势(图 2)。生长季初期的 5 月,植物的需水量小,对土壤水分消耗较少,08SJ 和 15SJ 样地的土壤含水量均达全年的次高值 ($3.12\% \pm 0.58\%$, $2.56\% \pm 0.93\%$), 87SJ 沙棘下方的土壤含水量达全年最高值 ($4.09\% \pm 1.04\%$)。6 月,87 SJ 丘顶与背风坡土壤含水量呈现出显著差异 ($p < 0.05$),而 08SJ 迎风坡与背风坡土壤含水量表现出极显著差异 ($p < 0.01$)。7 月,08SJ 迎风坡与丘顶土壤含水量存在极显著差异 ($p < 0.01$),各样地土壤含水量在 2020 年 7 月均较高,87SJ 沙棘土壤含水量为全年最高值 ($4.36\% \pm 1.44\%$),08SJ 和 15SJ 均为生长季次高值 $2.33\% \pm 0.61\%$, $2.47\% \pm 1.07\%$,而在 2021 年 7 月,各样地土壤含水量均为全年最低值,87SJ 土壤含水量最低值为 $1.77\% \pm 0.36\%$,08SJ 最低值为 $1.46\% \pm 0.40\%$,15SJ 土壤含水量仅为 $1.19\% \pm 0.40\%$,此时,15SJ 迎风坡与背风坡沙棘土壤含水量差异显著 ($p < 0.05$)。在生长季末期(9—10 月),87SJ 沙棘土壤含水量达生长季次高值 ($4.25\% \pm 0.60\%$)。15SJ 迎风坡与丘顶沙棘土壤含水量存在显著差异 ($p < 0.05$),此时,15SJ 沙棘土壤含

水量为全年最高值 ($3.30\% \pm 1.43\%$)。

3.5 土壤水分的空间变化特征

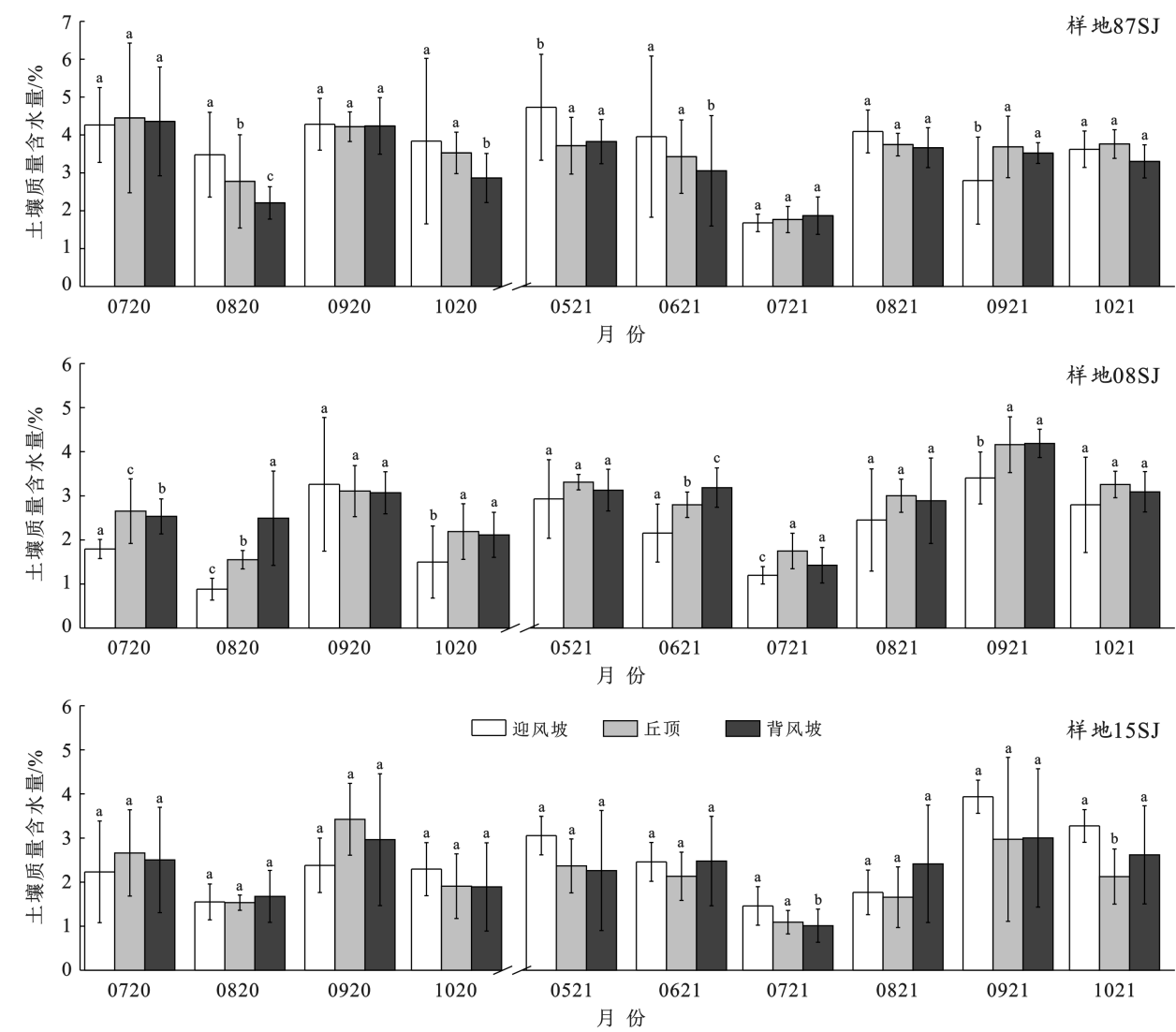
3.5.1 不同沙棘群落和不同地貌部位土壤水分的空间差异性 由方差分析可得,不同沙棘群落之间土壤含水量具有极显著差异 ($p < 0.01$) (表 4)。其中,87SJ 土壤平均含水量最大,为 $3.49\% \pm 0.08\%$ 。其次为 08SJ,土壤含水量为 $2.60\% \pm 0.06\%$,15SJ 土壤含水量最低,仅为 $2.30\% \pm 0.07\%$ 。从表 5 可知,87SJ 和 15SJ 样地不同地貌部位之间土壤含水量差异不明显 ($p > 0.05$),08SJ 迎风坡的土壤含水量明显小于丘顶和背风坡 ($p < 0.01$),而丘顶与背风坡土壤含水量差异不明显 ($p > 0.05$)。

表 4 不同沙棘群落下方土壤含水量差异性分析结果

Table 4 Analysis results of soil moisture content difference under different *Hippophae rhamnoides* communities

样地编号	土壤平均含水量/%	标准误	显著性	95%置信区间	
				下限	上限
87SJ-T	3.507 7	0.171 33	0.000 **	0.392 5	1.068 1
08SJ-T	2.777 4	0.171 33	0.000 **	0.252 6	0.928 2
15SJ-T	2.187 0	0.171 33	0.000 **	0.982 9	1.658 5

注: * 表示平均值差值的显著性水平为 0.05, ** 表示平均值差值的显著性水平为 0.01。下同。



注：相同字母表示无显著差异($p>0.05$),不同字母表示有显著差异($p<0.05$)。

图 2 各沙棘群落不同地貌部位土壤含水量的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of soil moisture content at different geomorphic parts in *Hippophae rhamnoides* communities

表 5 不同地貌部位沙棘土壤含水量差异性分析结果

Table 5 Analysis results of soil moisture content differences of *Hippophae rhamnoides* communities in different geomorphic parts

样地编号(土壤含水量/%)	样地 87SJ			样地 08SJ			样地 15SJ		
	W	T	L	W	T	L	W	T	L
87SJ/W(3.67%±0.17%)	1	0.424	0.066	—	—	—	—	—	—
87SJ/T(3.51%±0.13%)	0.424	1	0.295	—	—	—	—	—	—
87SJ/L(3.29%±0.13%)	0.066	0.295	1	—	—	—	—	—	—
08SJ/W(2.24%±0.14%)	—	—	—	1	0.001**	0.001**	—	—	—
08SJ/T(2.78%±0.10%)	—	—	—	0.001**	1	0.834	—	—	—
08SJ/L(2.81%±0.11%)	—	—	—	0.001**	0.834	1	—	—	—
15SJ/W(2.44%±0.11%)	—	—	—	—	—	—	1	0.163	0.383
15SJ/T(2.19%±0.12%)	—	—	—	—	—	—	0.163	1	0.599
15SJ/L(2.28%±0.15%)	—	—	—	—	—	—	0.383	0.599	1

3.5.2 垂直分异特征 沙棘在不同地貌部位之间的土壤含水量随着土层深度的变化呈现不同的趋势 (图 3)。87SJ 迎风坡土壤含水量在 100—120 cm 处出现最低值(3.27%±1.16%),丘顶土壤含水量在 0—

40 cm 波动最大,40 cm 以下趋于稳定,最小值($3.17\% \pm 0.99\%$)出现在 20—40 cm 处,而背风坡土壤含水量在 10—20 cm 出现最小值($3.11\% \pm 1.44\%$)。迎风坡和丘顶的土壤含水量最大值均在表层 10 cm,土壤含水量分别为 $4.47\% \pm 1.98\%$, $4.25\% \pm 1.58\%$,而背风坡的最大值($3.52\% \pm 0.84\%$)出现在 80—100 cm。08SJ 沙棘迎风坡和丘顶土壤含水量随着土层深度的增加呈现先增加后减小的趋势。其中,迎风坡土壤含水量在 20—40 cm 达最大值($2.94\% \pm 1.57\%$),在 100—120 cm 出现极低值($1.56\% \pm 0.75\%$),丘顶表层 10 cm 的土壤含水量最低,土壤含水量最大值($2.98\% \pm 0.95\%$)出现在 60—80 cm 处,背风坡土壤含水量随着土层深度先减小后增加,拐点出现在 40—60 cm 处,在 100—120 cm 达最大值($3.11\% \pm 0.87\%$)。15SJ 沙棘土壤含水量在 3 个地貌部位的变化不同。迎风坡土壤含水量随着土层深度的增加呈现先减小后增加再减小的趋势,表层 10 cm 为土壤含

水量最大值($2.84\% \pm 1.14\%$)。丘顶土壤含水量随着土层深度的增加降低明显,0—60 cm 随土层深度增加逐渐降低,60 cm 以下,土壤含水量表现为先缓慢增加后减小。背风坡土壤含水量随土层深度的增加呈现先增加后减小的趋势,20—40 cm 处为最大值($3.16\% \pm 1.12\%$)。3 个地貌部位土壤含水量最小值均出现在 100—120 cm。从整个土壤剖面来看,各样地迎风坡土壤含水量随土层深度增加变化幅度较大。从雨季前、中、后不同土层深度含水量变化(图 4)可知,各沙丘在雨季前期(5 月)表层 10 cm 的土壤含水量最低,随着深度的增加,土壤含水量增加。进入雨季(8 月),表层 10 cm 的土壤含水量明显增加,随着土层深度的增加,土壤含水量变化较为稳定。随着生长季的结束(10 月),表层土壤含水量明显减少,深层土壤含水量趋于增加。根据降水季节变化及其土壤湿度剖面图可反映出,该区 0—20 cm 土壤含水量的波动随着降水季节变化波动较为明显。

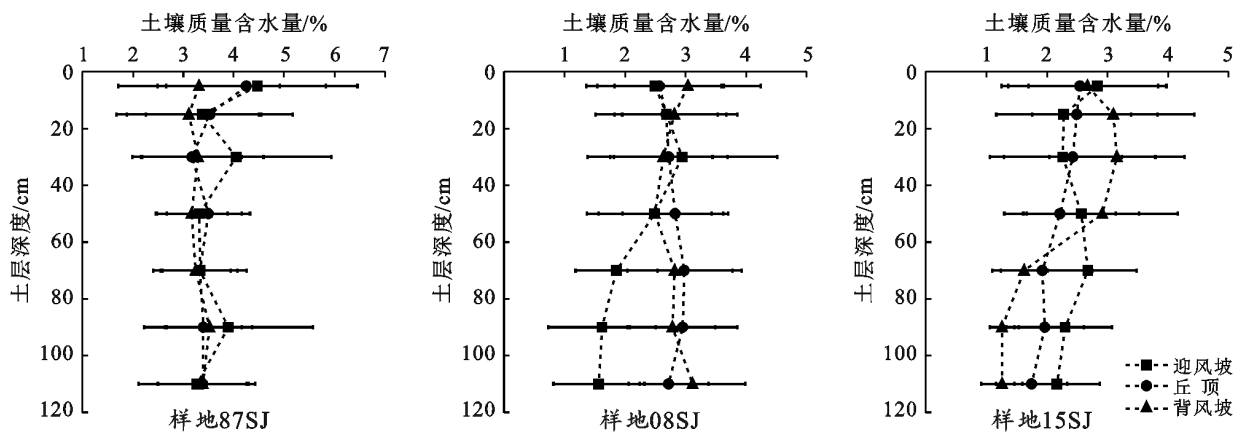


图 3 不同地貌部位土壤含水量的垂直变化

Fig.3 Vertical variation of soil moisture content in *Hippophae rhamnoides* communities at different geomorphic parts

4 讨论

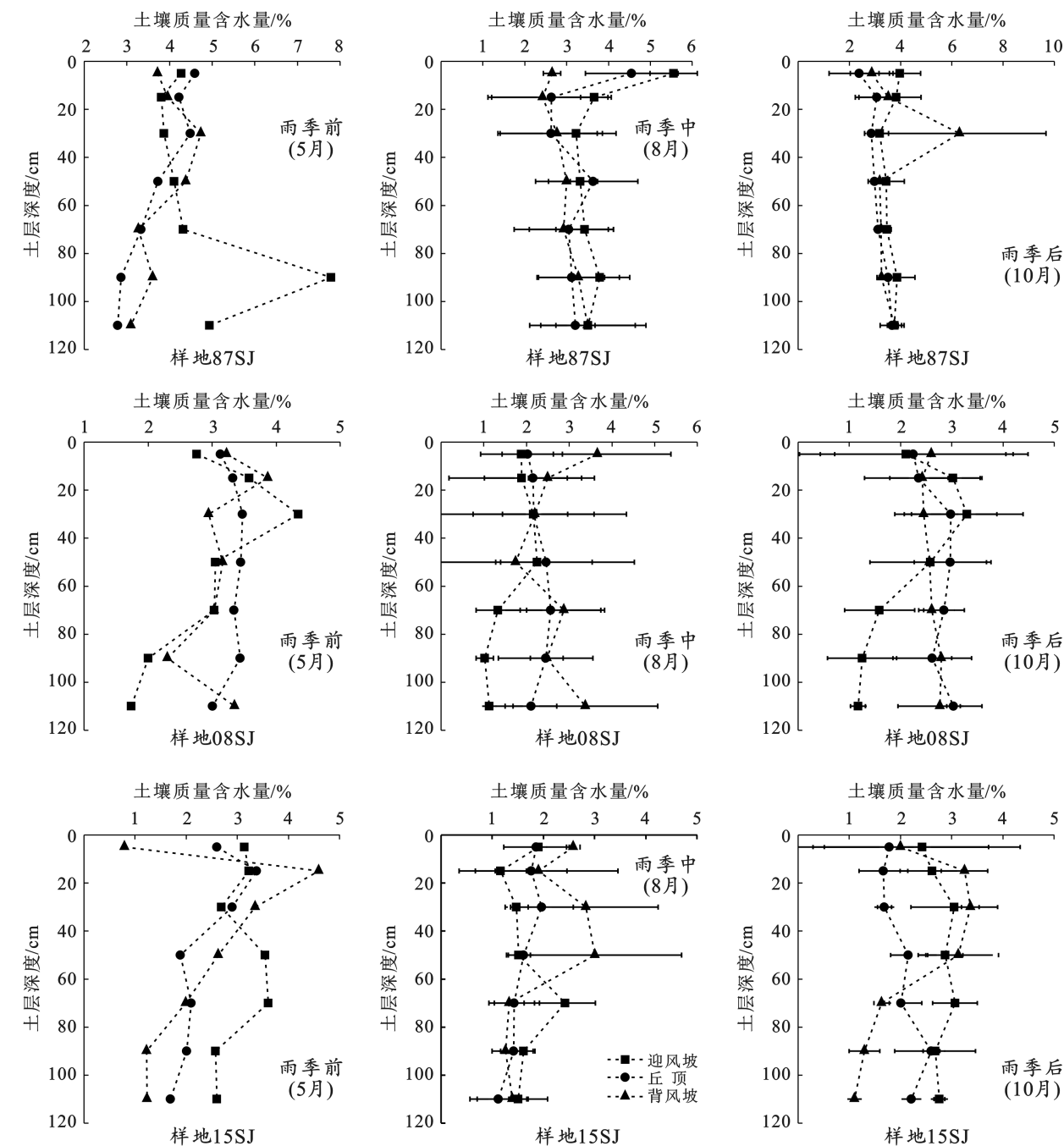
4.1 土壤水分季节变化的影响因素

青海湖流域沙地的治理方式主要是生物措施或者生物措施与机械措施相结合,土壤水分是该区植被恢复的主要限制因素之一^[26]。干旱、半干旱区地下水一般埋藏较深,该区研究样地地下水位在 10 m 以上,而沙丘高度多数在 7 m 以上(表 1),该区土壤水分几乎无地下水补给,降水是该区土壤水分的主要来源^[27]。研究区 1—4 月降雨事件极少,累计降雨量在 20~30 mm 范围,因此前期累计降雨量对土壤含水量无明显影响。青海湖流域位于季节冻土分布区,季节冻土带中由于气态水凝结形成的高含水带,即湿润砂层,可称之为冷生湿润砂层^[28]。有研究表明冷生

湿润砂层的存在对荒漠植被的生长十分有利,但对该区的人工固沙植被而言,该区沙丘的地下水埋深过深,气态水运移途径长,冷生湿润砂层对植物生长的作用不明显。该区地表解冻后的初始土壤含水量、植被蒸腾和土壤蒸发在一定程度上也会对土壤水分的季节分布起作用^[29-30]。5 月地表解冻对土壤水分进行即时补充,此时处于萌发期的植物对土壤水分消耗较少,与此同时,各沙丘的土壤含水量保持在一个较高的值(图 4)。6 月植物进入生长初期,土壤含水量迅速下降。进入雨季 7 月,地表降水对土壤的补给促使土壤含水量明显增加^[26,31],但在 2021 年 7 月土壤含水量却出现当年生长季的最低值,究其原因,2021 年 7 月该区的降水量仅为 60.40 mm,降水补给无法满足土壤蒸发和植物蒸腾作用对土壤水分的消耗。

生长旺盛期的 8 月,温度升高,降水持续增加,但此时土壤蒸散发作用最为强烈,植物呼吸加快,植物需要源源不断的吸收土壤中的水分以维持自身生长,土壤含水量降至整个生长季最低值。但在 2021 年 8 月该区降水频繁,当月降水可达 125.90 mm,土壤含水量又表现为上升状态。9 月该区植物开始进入生长季

后期,此时植物蒸腾耗水减弱,地表蒸发作用不明显,加之降水对土壤含水量补充的滞后性^[31],因此,本月的土壤含水量往往表现为生长季的最高值或极高值。进入 10 月,随着温度的降低,土壤蒸发作用减弱,但处于生长季末期的沙棘仍需蒸腾耗水,加之本月降水明显减少,导致土壤含水量降低。



注:5月仅为2020年5月的数据,8月和10月为2020和2021年的平均值。

图 4 研究区雨季前、中、后期土壤湿度剖面图

Fig.4 Soil moisture profiles before, during and after the rainy season of the study sites

在干旱半干旱地区,植株的冠幅、植被覆盖度是影响群落土壤水分的重要因子,二者与土壤含水量呈一定的负相关关系,植株冠幅越大,其满足自身生长

所需水分越多,对水分消耗量越大^[32]。但在该区,自然固定沙丘的土壤含水量高于流动沙丘^[33],这是由于流动沙丘降水的入渗速度快,缺乏地上植被对降水

的有效拦截及植被冠层对地表蒸散发的遮挡,因此87SJ的土壤含水量相对较高。不同微地貌之间土壤水分的季节变化较相似,但植株个体之间自身耗水的不同也会导致土壤含水量具有差异性^[20]。因此,该区沙棘在沙丘不同地貌部位的土壤含水量的季节分布也具有差异性。

4.2 土壤水分空间变化的影响因素

人工植被的生长对土壤表层沉积物的改良产生了积极影响:固沙植被的人工栽植减弱了沙丘的风蚀作用,细颗粒物质留存^[21]。土壤颗粒越细,导水率越低,水分不易进入细颗粒孔隙,即“二相驱替”现象难以发生。Pan等^[29]用粒度分析方法进行了土壤质地与表层土壤水分关系研究表明:土壤含水量与黏土、粉土含量呈正相关,与含砂量呈负相关。前文研究表明,87SJ沙丘土壤中的黏粒和粉粒的含量居多,这与张登山等^[34]对青海湖东克土沙地不同类型沙丘地表沉积物的粒度特征进行水平变化分析得出的“固沙年限越短,细颗粒物质含量呈降低趋势,而粗颗粒物质逐渐增多”结论一致。87SJ沙丘植被恢复年限长,植被密度大,能有效拦截细颗粒物质降落至地表,水分不易流失,储存在土壤中供植物吸收以满足自身生长发育,土壤含水量最高。

此外,植被盖度和土壤结皮也是影响土壤含水量及土层表面蒸散发的主要因子。人工沙棘的栽植增加了该区沙丘地表的植被覆盖度,抑制了表层土壤水分的散失^[35]。本研究区人工植被恢复治理后的沙丘群落优势种的盖度在11.69%~33.43%之间,土壤平均含水量维持在1.26%~4.47%,其中,87SJ沙棘盖度维持在33%左右,除迎风坡外,沙棘盖度占比均>50%,甚至背风坡盖度占比达到90%以上,而该沙丘土壤含水量稳定在3.5%左右。这说明:一方面,在该植被盖度下植物不仅能充分利用该区的降水,而且能抑制水分的渗漏,进而能够有效地储存水分^[26],另一方面,张志山等^[36]对沙坡头试验站内流沙和不同年代建植的植被区生物结皮类土壤蒸发特征进行研究表明,正是由于生物结皮具有较高的持水能力,导致水分被蒸发的可能性增加到干旱时束缚土壤水分进而抑制蒸发。87SJ沙棘土壤下方生物结皮发育明显,能有效地抑制土壤水分蒸发。15SJ沙丘栽植沙棘距今已有7a,恢复时间较短,地表无结皮,细颗粒物质易受风蚀,即使有降雨的补充,在植物强烈的蒸腾作用下,加之地表蒸发明显,土壤水分极易散失^[37-38]。

4.3 土壤水分垂直变化的影响因素

土壤水分的垂直分布与区域降水和植物根系吸水有关。表层土壤水分主要通过土壤蒸发和植被蒸

腾作用而消耗^[26],而随着土层深度的增加环境对土壤的影响逐渐减弱^[39]。已有研究表明,该区降水对表层20cm土壤含水量的影响较为显著,主要表现在下渗的影响,而对深层土壤水分的补充较少^[40],植物更多地通过根系的固结作用来防止土壤水分的自然蒸散与风蚀流失^[26]。在高寒沙地,土壤水分和养分都较为匮乏,受季节性降水的影响,0—40cm土层的土壤含水量较高,根系也集中分布在此层以获取较高的水分和养分^[41]。研究区沙棘吸水根系集中分布在地下20—60cm土层^[42],通过前文的研究结果可知,15SJ样地0—20cm土壤含水量最高,这是由于沙棘根系具有二态性特点,即表层根系吸收表层土壤受降水补给的浅层土壤水,深层根系利用深层土壤水。08SJ土壤含水量最高值出现在60—80cm,这可能是因为08SJ样地的土壤表层大多为中砂,且结皮发育较弱,导致水分易于下渗到土壤深层供给植物生长需求^[35,40]。虽然该区人工栽植的沙棘在30余年后出现衰退趋势,但总体表现良好,且在稳定生长,这充分说明沙棘可作为一种优良的固沙植物在该区推广种植。

综上所述,不论沙地不同地貌部位优势种是沙棘还是沙蒿,沙棘始终作为沙地分布最广的植被,不仅提高了各层的土壤含水量,也稳定了各深度层的水分变化。已有研究表明,植物具有较为突出的调蓄功能,随着恢复年限的增加,水分受植物的调控作用也越明显^[43]。人工治理增加了高寒区沙丘土壤表层的植被覆盖度,抑制了土壤水分蒸发进而提高地表土壤含水量,而表层较高的土壤含水量又可以提高临界起沙风速,从而有效将风蚀对植被的影响降到最低,这促进了植物的初期生长^[35,44]。因此,在沙区恢复治理过程中,在充分考虑沙地土壤含水量的情况下,合理栽植人工植被对于高寒沙地生态环境的改善具有重要的作用。

5 结论

(1) 生长季土壤水分与降水的季节变化具有一致性,在生长季末期,土壤含水量表现为一定的滞后性。

(2) 研究样地整体表现为0—20cm处土壤含水量最高,60cm以下随土层深度增加土壤含水量逐渐趋于稳定。在微地形影响下,土壤水分总体表现为迎风坡变化最为强烈,背风坡和丘顶变化幅度相对较小。

(3) 在高寒沙地,随着固沙年限的增加,土壤含水量呈现增加的趋势。栽植沙棘30a的群落下方的土壤含水量最高,栽植沙棘5a的沙丘土壤含水量最

低,这符合该区自然固定沙丘的土壤含水量大于流动沙丘土壤含水量的变化规律^[33]。

[参 考 文 献]

- [1] 何其华,何永华,包维楷.干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J].山地学报,2003,21(2):149-156.
- [2] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,10(3):251-259.
- [3] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(Z1):397-410.
- [4] Xia Jun, Ning Like, Wang Quan, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semiarid regions of West China under a scenario of climate change [J]. Climatic Change, 2017,144(4):549-563.
- [5] 杨大文,丛振涛,尚松浩,等.从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J].水利学报,2016,47(3):390-397.
- [6] 洪光宇,王晓江,王少昆,等.沙地土壤水分时空动态研究进展[J].水土保持研究,2021,28(3):390-398.
- [7] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition [J]. Plant, Cell & Environment, 1992,15(9):1073-1082.
- [8] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J].应用生态学报,2001,12(5):715-720.
- [9] Yongseok Gwak, Sanghyun Kim. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope [J]. Hydrological Processes, 2017,31(2):431-445.
- [10] 张璐,朱仲元,张圣微,等.半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J].农业工程学报,2020,36(13):124-132.
- [11] Cho Eunsang, Choi Minha. Regional scale spatiotemporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean Peninsula [J]. Journal of Hydrology, 2014,516:317-329.
- [12] 郭欣欣,付强,卢贺,等.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.
- [13] Manuel del J, Andrea R, Ignacio R I. Point rainfall statistics for ecohydrological analyses derived from satellite integrated rainfall measurements [J]. Water Resources Research, 2015,51(4):2974-2985.
- [14] Liu Yang, Wei Wei, Le Chen, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semiarid Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(9):3199-3217.
- [15] 朱林峰,张宇清,秦树高,等.油蒿群落不同恢复阶段的土壤水分空间异质性及植被特征[J].水土保持通报,2015,35(6):58-63.
- [16] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
- [17] 张涵丹,卫伟,陈利顶,等.典型黄土区油松树干液流变化特征分析[J].环境科学,2015,36(1):349-356.
- [18] 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.
- [19] 鲁瑞洁,刘小棣,李金凤,等.青海湖地区典型固沙植物对根下土壤改良作用的初步研究[J].水土保持学报,2015,29(4):177-181.
- [20] 汪海娇,田丽慧,张登山,等.青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征[J].干旱区研究,2021,38(1):76-86.
- [21] 张素敏,李树刚,王忠辉.沙棘属植物的研究进展[J].北方果树,2005(4):3-5.
- [22] 周鑫,田丽慧,张登山,等.青海湖沙区不同植被防风固沙效益研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(8):180-185.
- [23] 田丽慧,汪海娇,张登山,等.高寒沙地典型固沙植物在沙丘不同地貌部位的水分利用特征[J].生态学报,2021,41(15):6215-6226.
- [24] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征[J].生态学报,2019,39(6):2109-2121.
- [25] Tian Lihui, Wu Wangyang, Zhou Xin, et al. The Ecosystem effects of sand-binding shrub *Hippophae rhamnoides* in Alpine semi-arid desert in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Land, 2019,8(12):183-197.
- [26] 鲁瑞洁,唐清亮,魏殿生,等.青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J].中国沙漠,2013,33(3):797-803.
- [27] 王正宁,王新平.荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征[J].中国沙漠,2010,30(5):1108-1113.
- [28] 万力,曹文炳,胡伏生.生态水文地质学[M].北京:地质出版社,2005:70-80.
- [29] Pan Yanxia, Wang Xinping. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, Northern China [J]. Hydrological Processes, 2009,23(11):1591-1601.
- [30] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1983,62(1/4):179-200.
- [31] 王锴,杨泽元,袁悦,等.毛乌素沙地南缘降水入渗滞后补给与模型参数敏感性分析[J].水土保持通报,2019,39(2):68-75.
- [32] 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.
- [33] 唐清亮.青海湖湖东沙地不同类型沙丘土壤水分变化规律的研究[D].北京:北京师范大学,2012.

[34] 张登山,田丽慧,鲁瑞洁,等.青海湖湖东沙地风沙的粒度特征[J].干旱区地理,2013,36(2):203-211.

[35] 移小勇,赵哈林,李玉霖,等.科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J].水土保持学报,2006,20(2):10-13,53.

[36] 张志山,何明珠,谭会娟,等.沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性:以沙坡头沙漠研究试验站为例[J].土壤学报,2007,44(3):404-410.

[37] 鲁瑞洁,唐清亮,桑艳礼,等.青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化[J].水土保持研究,2012,19(2):111-115.

[38] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等.沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.

[39] 冯起,高前兆,苏培玺,等.半湿润地区植被影响下的沙地水分动态[J].干旱区研究,1994,11(4):58-63.

[40] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift:Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots [J]. Oecologia, 1987, 73(4):486-489.

[41] 张立恒,李清雪,王学全,等.高寒沙区中间锦鸡儿人工林细根动态及其周转[J].干旱区研究,2020,37(1):212-219.

[42] Meinzer F C, Clearwater M J, Goldstein G. Water transport in trees; current perspectives, new insights and some controversies [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001,45(3):239-262.

[43] Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Hongwei, et al. Water uptake by *Artemisia ordosica* roots at different topographic positions in an Alpine Desert Dune on the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Frontiers in Earth Sciences, 2022,10:686441.

[44] 孙姗姗,刘新平,魏水莲,等.沙地植物幼苗生长对降水和风速变化的响应[J].干旱区研究,2019,36(4):870-877.

~~~~~

(上接第 22 页)

[18] Aishan T, Halik Ü, Kurban A, et al. Eco-morphological response of floodplain forests (*Populus euphratica* Oliv.) to water diversion in the lower Tarim River, Northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(2):533-545.

[19] 杨玉海,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J].生态学报,2008,28(2):602-611.

[20] 张正偲,董治宝,赵爱国.腾格里沙漠东南部近地层沙尘水平通量和降尘量随高度的变化特征[J].环境科学研究,2010,23(2):165-169.

[21] 吉启慧.粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J].中国沙漠,1996,16(2):173-179.

[22] 钟卫,孔纪名,杨涛.植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞试验[J].干旱区研究,2009,26(6):872-876.

[23] 汪季,胡志敏.近地表风沙运动结构对不同植被覆盖度的响应[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):30-33.

[24] 王倩,毛东雷,赵枫,等.策勒绿洲—沙漠过渡带不同植被沙丘表面风沙沉积物粒度特征分析研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):96-102.

[25] Betz F, Halik Ü, Kuba M, et al. Controls on aeolian sediment dynamics by natural riparian vegetation in the Eastern Tarim Basin, NW China [J]. Aeolian Research, 2015,18:23-34.

[26] 代亚亚,何清,陆辉,等.塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄区近地层沙尘水平通量及粒度特征[J].中国沙漠,2016,36(4):918-924.

[27] 俎瑞平,张克存,屈建军,等.塔克拉玛干沙漠风况特征研究[J].干旱区地理,2005,28(02):167-170.

[28] 张正偲,董治宝.腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J].中国环境科学,2011,31(11):1789-1794.

[29] 霍文,何清,刘新春.塔克拉玛干沙漠及其大气降尘点粒度特征分析[J].水土保持研究,2009,16(4):207-211.

[30] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:61-88.

[31] 朱震达,陈治平,谭见安,等.沙漠地区风沙地貌调查方法[M].北京:科学出版社,1961:27-35.

[32] Shao Yaping. Similarity theory for saltation and application to Aeolian mass flux [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005,115:319-338.