砒砂岩区沙棘液流及细根变化对土壤水分变化的响应

李洪杰，郭月峰，姚云峰，祁 伟，刘 璐，张恩泽

（1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院，呼和浩特 010018；2.内蒙古自治区水利水电勘探设计院，呼和浩特 010020）

摘 要：[目的] 研究砒砂岩区土壤含水量对沙棘液流速率及细根变化的响应，为沙棘在砒砂岩等干旱缺水地区的合理栽培和经营提供参考。[方法] 利用 Granier 茎干液流测定系统，对砒砂岩地区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡沙棘（*Hippophae rhamnoides*）人工林的茎干液流进行长期监测，并同时对植物的细根及细根周围的土壤水分进行测定，运用相关性分析法分析沙棘人工林在生长季（6—10 月）的茎干液流日变化规律及植物细根对土壤水分变化的响应。[结果] ①土壤含水量与沙棘液流速率呈现出在前期（6—7 月）较低，中后期（7—9 月）不断升高，后期（9—10 月）有迅速下降的变化趋势。而沙棘细根的生长速率也呈现出中后期较高，前期和后期较低的变化趋势。②比较生长季各月份土壤含水量和沙棘液流速率的变化趋势趋于一致，从大到小排列依次为：8 月＞7 月＞9 月＞6 月＞10 月。③土壤含水量变化与沙棘液流速率变化呈极显著正相关关系（$p<0.01$），随着土壤含水量增大，沙棘液流速率逐渐升高；沙棘细根生长速率与沙棘液流速率呈显著正相关关系（$p<0.05$），沙棘细根生长速度越快，沙棘液流速率越大；反之，沙棘细根生长速度越慢，沙棘液流速率越低。土壤含水量变化与细根生长速率呈极显著正相关关系（$p<0.01$），随着土壤含水量升高，沙棘细根生长速率逐渐增大。[结论] 砒砂岩地区沙棘液流变化是影响土壤水分变化的主要因素，而沙棘细根变化同样影响土壤水分的变化，相对而言，沙棘液流变化比沙棘细根变化影响土壤水分变化大。说明植物蒸腾是砒砂岩区影响土壤水分变化的主要因素。

关键词：沙棘；砒砂岩区；液流速率；细根；相关性分析

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2021)05-0038-06 **中图分类号**：S152.7，S793.6

文献参数：李洪杰，郭月峰，姚云峰，等.砒砂岩区沙棘液流及细根变化对土壤水分变化的响应[J].水土保持通报，2021，41(5)：38-43. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20210809.005；Li Hongjie，Guo Yuefeng，Yao Yunfeng，et al. Response of water flow and fine roots of sea-buckthorn to soil moisture in a feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(5)：38-43.

Response of Water Flow and Fine Roots of Sea-Buckthorn to Soil Moisture in a Feldspathic Sandstone Area

Li Hongjie，Guo Yuefeng，Yao Yunfeng，Qi Wei，Liu Lu，Zhang Enze

（1.*College of Desert Management，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia* 010018，*China*；2.*Inner Mongolia Water Resources and Hydropower Exploration and Design Institute，Hohhot，Inner Mongolia* 010020，*China*）

Abstract：[Objective] The response of soil water content to the change of the flow rate and fine roots of *Hippophae rhamnoides* in the feldspathic sandstone area was studied in order to provide reference for the rational cultivation and management of *H. rhamnoides* in the arid and water-deficient area. [Methods] The stem sap flow of *H. rhamnoides* plantations in Wenshui Township，Zhungeer Banner，Ordos City was monitored by using Granier stem sap flow measurement system for a long time，and the fine roots of plants and the soil moisture around the fine roots were measured at the same time，and the response of stem fluid flow and fine root changes to soil moisture in the growing season (September and October) of the *H. rhamnoides* plantation were analyzed using correlation analysis. [Results] ① The soil water content and the flow rate of

收稿日期：2021-05-19 **修回日期**：2021-07-10

资助项目：国家自然科学基金项目“内蒙古砒砂岩区沙棘平茬后林木根系与根际微环境的调节机制”(31960329)；内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0085，2019GG004)

第一作者：李洪杰(1995—)，女(汉族)，内蒙古自治区兴安盟人，硕士研究生，研究方向为水土保持荒漠化防治研究。Email：1736686771@qq.com。

通讯作者：郭月峰(1982—)，女(汉族)，内蒙古自治区乌海市人，博士，副教授，硕士生导师，主要从侵蚀劣地水土流失与环境治理领域的相关工作。Email：guoyuefeng0525@126.com。

H. rhamnoides were lower in the early period (June to July), increased in the middle and late period (July to September), and decreased rapidly in the late period (September and October). The growth rate of fine roots of seabuckthorn was higher in the middle and late period, and lower in the early and late period. ② The variation trend of soil water content and sea-buckthorn fluid flow rate in each month during the growing season was consistent, and the descending order was as follows: August > July > September > June > October. ③ There was a significant positive correlation between the change of soil water content and the flow rate of sea-buckthorn ($p<0.01$). With the increase of soil water content, the flow rate of sea-buckthorn gradually increased. The growth rate of fine roots of sea-buckthorn was positively correlated with the flow rate of sea-buckthorn ($p<0.05$). The faster the growth rate of fine roots of sea-buckthorn was, the higher the flow rate of sea-buckthorn was. On the contrary, the slower the growth rate of fine roots of sea-buckthorn was, the lower the flow rate of sea-buckthorn was. There was a significant positive correlation between soil water content and fine root growth rate ($p<0.01$). With the increase of soil water content, the fine root growth rate of seabuckthorn gradually increased. [Conclusion] The change of *H. rhamnoides* sap flow is the main factor affecting the change of soil moisture in feldspathic sandstone area, and the change of fine root of *H. rhamnoides* also affects the change of soil moisture. Relatively speaking, the change of sap flow of *H. rhamnoides* is greater than that of fine root of *H. rhamnoides*. Transpiration is the main factor affecting soil moisture in feldspathic sandstone area.

Keywords: *Hippophae rhamnoides*; feldspathic sandstone area; flow rate; fine root; correlation analysis

砒砂岩区是黄土高原乃至世界水土流失最为严重的地区之一[1]。砒砂岩是分布在黄土高原晋陕蒙交界的一种松散岩层,成盐度低[2],具有“遇水成泥,遇风成沙”的特点,加之这一地区受到水、风、温度等的复合作用,侵蚀动力类型及季节周期性特征突出。同时该区自然条件恶劣,降雨量较少,水分严重匮乏,这使植物的扎根严重困难,致使部分树木生长不良,甚至枯死,降低了植物的成活率,进而影响林分的可持续发展[3]。砒砂岩区水土流失极其严重,给黄河下游造成严重的泥沙灾害,该地区的水土侵蚀与水土流失问题亟待解决[4]。在该地区生长的树木种群非常少,因此研究砒砂岩区适生植被的生长特性对于改善当地生态环境具有重要意义,是砒砂岩区植被恢复和预防水土流失的前提条件。

茎流是指通过蒸腾作用在植物体内引起的上升液流,因此研究植物茎流变化规律可以间接反映植物蒸腾速率的变化,茎流在很大程度上反映了植物的蒸腾耗水能力[5-6]。目前,热扩散探针技术(thermal dissipation probe,TDP 法,或称 Granier 探针技术)是测量茎干液流精确度较高,使用起来较为方便的方法[7]。王媛等[8]对大兴安岭白桦树干液流和土壤水分的响应进行了探讨,同时监测白桦树干液流特征和土壤水分动态变化规律,发现不同土壤含水量下气孔蒸腾作用对土壤含水量变化具有较高的敏感性。杨明杰等[9]对干旱区梭梭茎干液流特性和土壤水分的响应进行研究,研究结果表明,在一定的土壤含水率范围内,梭梭液流密度与土壤含水率呈负相关,存在某一临界值,使得超过此临界值,梭梭液流密度与土壤含水率呈正相关。吕金林等[10]运用 Granier 热扩散探针法对半干旱黄土丘陵区不同胸径辽东栎进行树干液流测定,并对土壤水分进行同步观测,采用饱和指数曲线函数对液流通量和土壤水分进行拟合,结果表明,在土壤水分较高时段,液流通量可快速上升至饱和值,在土壤水分较低时段,液流通量上升缓慢。

沙棘(*Hippophaer rhamnoides*)是胡颓子科(Elaeagnaceae)沙棘属(*Hippophae*)植物,落叶型灌木,其特性是耐旱、抗风沙,可以在盐碱地上生存,并且在区域防沙固沙、水分循环、有机物积累和预防水土流失等方面起到积极的作用[11]。由于(直径≤2 mm)细根是植物摄取土壤水分养分的重要途径[12],因此本试验主要针对细根展开讨论。沙棘根系发达,分蘖萌生能力强,对不同气候条件和不同土壤具有极强的适应性,因此成为防治水土流失、改善生态环境的先锋物种[13]。刘晓宇等[14]探讨了砒砂岩区沙棘不同平茬高度对细根的影响机制,留茬高度处理后沙棘表现出很强的生长能力,根系分形特征均显著优于未平茬处理沙棘。王卓等[15]对生长季沙棘液流速率对环境因子的响应进行了阐述,研究表明沙棘液流速率与光合有效辐射、空气温度、水汽压等呈正相关,与空气湿度呈负相关。胡建中[16]对沙棘群落根系层的垂直分布进行了深入的探讨,沙棘群落根系主要分布在 0—50 cm 的表土层中,砒砂岩区沙棘根系的根质量、根长、根数等参数,在从土表向下面深层延伸的过程中,一般先是由少到多,急剧增加,然后再由多到少,

慢慢递减，因此，本试验选取 50 cm 深的表层土作为分析沙棘根系的主要区域。

本文以砒砂岩区荒漠植被沙棘为研究对象，采用热扩散法研究沙棘茎干液流特性，采用HOBO测定土壤含水率和微根管方法测定根系，并分析沙棘液流与土壤水分和根系的响应关系，定量得到沙棘根系和土壤水分变化对植物蒸腾的影响，对于沙棘在砒砂岩等干旱缺水地区的合理栽培和和经营具有重要的应用参考价值。

1 研究区概况和试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于晋陕蒙交界处，行政区划分为内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡，地理坐标为东经 110°25′—110°46′，北纬 39°44′—39°56′，海拔高度 1 067.2～1 437.6 m。该研究区水土流失比较严重，并有大面积中生代沉积碎屑基岩出漏，属于典型的砒砂岩区。类型为温带干旱半干旱季风气候，在 2001—2021 年这 20 a 间，年均降雨量为 251.3～522.2 mm，80%集中在 6—9 月，年均蒸发量为 2 100～3 700 mm，年平均气温为 7.3 ℃，相对湿度为 52%，平均风速 2.4～3.0 m/s。区内主要种植沙棘，零星分布有针茅（*Stipa capillata*）、碱蒿（*Suaeda salsa*）、百里香（*Thymus mongolicus*）、狼毒（*Stellera chamaejasme*），天然植被覆盖度低于 5%，砒砂岩层由灰白、灰红、灰黑、紫红、灰褐色等不同颜色的砂砾构成，层状结构，组织松散，厚度在 100～300 m。

1.2 材料和方法

于 2020 年 6 月在鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡选择林龄为 13 a 生的沙棘人工林作为试验样地。在试验样地内选取 3 块面积为（30 m×30 m）的样方，分别为样方 1，2，3，分别于每块样方内进行每木检尺，从而确定标准木，在每块样方内选取 3 株标准株进行取样测定，总共 9 株，样树指标详见表 1。

表 1 沙棘各样方标准株参数

样方	土壤类型	林龄/a	平均树高/m	平均冠幅(EW)/cm	平均冠幅(SN)/cm
1	栗钙土、黄绵土	13	1.33	104	89
2	栗钙土、黄绵土	13	1.38	112	95
3	栗钙土、黄绵土	13	1.44	126	105

1.3 根系因子测定

采用微根管法对沙棘根系进行连续监测。微根管法，即在土壤中放入特制的透明玻璃管或塑料管，采用便携式小型、微型摄影仪在管内对根的生长变化进行原位非破坏性观察。采用微根管法进行试验的好处有对细根生长变化不产生干扰的情况下，能够对不同土层的所有细根在出生到死亡的整个变化过程中进行连续监测[17]。为了避免根管布设对试验产生干扰，根管布设时间为 2018 年 6 月，而试验正式开始监测到结束的时间为 2020 年 6—10 月。在所选位置上，安装由 PVC（聚录乙烯）材料制成的透明圆柱形管（内径为 7.1 cm，长度为 150 cm）。在安装时，在选定的 9 株标准株半径 100 cm 区域内挖一个深度为 50 cm，横向 100 cm，宽 20 cm 的剖面。安装前，检查微根管底部的密封情况，防止水分的进入。然后将微根管轻轻放入挖好的剖面中，微根管露出地面约 10 cm，露出地面的部分先用保鲜膜覆盖，然后盖上红色的盖子，用黑色胶带加封。最后进行回填，使得微根管与土壤的缝隙填满，充实。每次采集的图像，以采样时间、细根编号和观测窗位置等为索引建立根系数据库，结合计算得到相关的根系特征参数。具体测定参数主要有细根根长、表面积、直径、体积以及计算得到的根长密度（root length density，RLD）、生长速率（RLD_{gr}）。具体指标计算公式[18]如下。

$$RLD=RL/(A\times DOF) \tag{1}$$

式中：RLD 为根长密度（mm/cm^3）；RL 为观测窗观察到的细根根长（mm）；A 为观测窗面积（cm^2）；DOF 为观测深度（cm）。

$$RID_{gr}=\Delta RLD_{增}/T \tag{2}$$

式中：RID_{gr}为生长速率；ΔRLD 增为相邻两次观测时沙棘细根生长量；T 为相邻两次观测的时间。

1.4 土壤含水量测定

在沙棘根系监测的同时，采用土壤水分记录仪（又叫 HOBO）测定根系周围的土壤含水量，好处是在不对沙棘根系产生干扰的情况下，可以原位自动连续监测土壤含水量动态变化。同样在选定的 9 株标准株所挖剖面位置上，将剖面一侧从上到下分为 5 层，每 10 cm 为一层，将 HOBO 的水分探头从上向下依次插入，且每层插入一个水分传感器探头，探头安装完毕后，在沿着剖面并远离沙棘根系的方向上继续挖下去，将 HOBO 用防水塑料盒装好并密封之后放入其中，最后用土水混合成泥浆进行回填。土壤水分单位为体积含水量（g/m^3）。每次记录土壤含水量将仪器取出，记录完放回。试验开始和结束测定时间与根系测定同步进行。

1.5 沙棘液流测定

Granier 茎干液流测定原理是使一个加热套裹在茎干和枝条的外面，连续加热树皮、木材和树液，茎表面的温度通过安装在周围的温度传感器来感应，通过

测定两根探针在茎干的温度差值计算液流速率[19]。同样在 9 株标准株上安装传感器,安装传感器前,应选择合适的树干并清除其表面粗糙的树皮露出内层树皮后,用直径为 2 mm 的电钻钻头钻两个长20 mm 并尽量平行的孔,将探针插入钻孔并尽量避免内部损伤。探头安装后,为防止风雨对试验数据的影响,用锡箔将探头包裹,并用黄色防水胶布将锡箔密封,再连接电源(12 V,40 A 铅酸电池)和数据采集器,每 30 min测 1 次数据,每天 24 h 连续监测。开始和结束测定时间与沙棘根系测定时间同步进行。

1.6　数据处理

采用 Excel 和 SPSS(26.0)统计分析软件对试验数据进行统计分析,用 Person 系数进行相关分析。

2　结果与分析

2.1　生长季各月份土壤含水量变化特征

通过对沙棘人工林土壤含水量的长期动态监测,采用水量平衡法推断不同空间位置上的根系吸水率,结合根系形态的空间分布特征,通过计算特定空间内土壤水分变化间接反映对土壤水分的利用效率。图 1 为监测沙棘人工林在生长季(6—10 月)土壤平均含水量的动态变化,在生长季 6 月土壤含水量较低,平均土壤含水量约为 0.112 g/m^3,7 月由于降雨补充了土壤水后平均含水量有所升高,约为0.124 g/m^3,8 月平均土壤含水量达到生长季平均土壤含水量的最大值,约为 0.165 g/m^3,随后到了 9 月土壤含水量总体开始下降,10 月土壤含水率降至最低,其平均土壤含水量降到 0.101 g/m^3 左右。比较生长季各月平均土壤含水量可知,平均土壤含水量表现为:8 月>7 月>9 月>6 月>10 月。

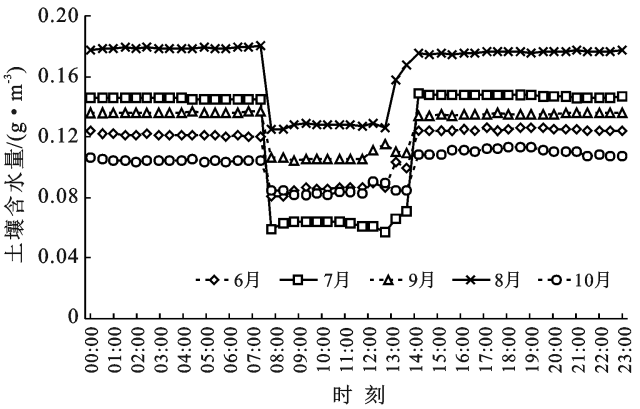


图 1　沙棘生长季各月份土壤含水量变化

2.2　沙棘在生长季细根动态变化规律

表 2 显示了沙棘在生长季(6—10 月)根长密度和细根生长速率的变化。在 6 月根系受降雨等条件的影响,此时细根的的根长密度较大,7—8 月沙棘细根根长密度不断增大,与 9—10 月的细根根长密度相比,具有显著差异性($p<0.05$),8—9 月的细根根长密度还在增加,9—10 月细根根长密度增加到最大,而此时根系根长密度与 8—9 月的细根根长密度相比无显著变化。沙棘的细根生长速率在 6—8 月生长速度开始加快,降雨促进了根系生长,8—9 月根长密度生长速度最快,届时受物候等环境条件影响,9—10 月细根生长速率最低,且此时沙棘细根生长速率与 6—7,7—8,8—9 月的生长速率相比,具有显著差异性($p<0.05$),说明此时沙棘细根的生长速率明显小于 6—9 月根系的生长速率。比较生长季不同月份细根的生长速率,从大到小为:8—9 月>7—8 月>6—7 月>9—10 月。

表 2　沙棘在生长季(6—10 月)细根生长速率与根长密度变化

项　目	6—7 月	7—8 月	8—9 月	9—10 月
根长密度 RLD	0.031 ± 0.018^{d}	0.033 ± 0.020^{cd}	0.036 ± 0.022^{bc}	0.038 ± 0.023^{ab}
生长速率 RID_{gr}	0.297 ± 0.073^{a}	0.301 ± 0.044^{a}	0.334 ± 0.033^{a}	0.279 ± 0.017^{b}

注:同行数据后的字母表示沙棘根长密度和细根生长速率在 $p<0.05$ 水平下差异性比较。

2.3　生长季各月份沙棘液流日变化及月变化规律

为了解沙棘液流日变化规律,监测沙棘在生长季(6—10 月)平均液流速率变化。图 2 显示了晴天时沙棘液流速率月变化趋势。从图 2 中可以看出,沙棘液流速率变化趋势呈典型的"双峰型"曲线,在生长季期间,沙棘液流速率在 8 月达到最高,10 月沙棘的液流速率最低。

沙棘液流在早上 7∶30 启动,在 11∶30,14∶30 左右达到了峰值,在 11∶30 时,沙棘开始消耗体内在夜间储存的水分并蒸发到大气中,使得此时的液流速率达到第一个峰值;在 14∶30 时,太阳辐射强度较高,沙棘蒸腾作用增强沙棘自身水分不够消耗,从而不断地吸收土壤中的水分,因此在该时刻又一次达到峰值,沙棘液流速率在傍晚 9 点以后趋于平稳。在夜间液流速率差异不明显,而白天差异很大,夜间的液流速率很小但不为 0。比较生长季各月份沙棘液流速率得出,沙棘的液流速率在典型晴天里的规律表现为:8 月>7 月>9 月>6 月>10 月。

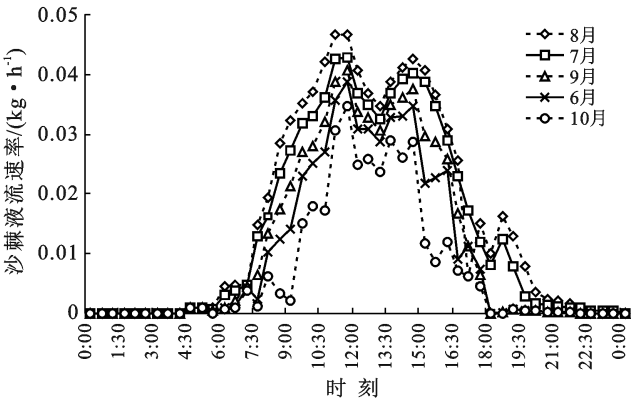


图 2 沙棘生长季(6—10 月)晴天沙棘液流速率日变化

2.4 土壤含水率与沙棘液流速率及细根变化的相关性分析

利用相关性分析得出,土壤含水量及沙棘液流速率和细根根长密度的相关系数见表 3。土壤含水量与沙棘细根生长速率和沙棘液流速率均呈显著正相关关系。土壤含水量与沙棘液流速率呈极显著相关关系($p<0.01$),皮尔逊相关系数(R 值)为 0.987,说明土壤含水量对沙棘液流速率有显著影响,土壤水分是沙棘液流速率的限制因子,土壤含水量越高,沙棘液流速率越快,反之,土壤含水量越低,沙棘液流速率越慢;沙棘液流速率与细根生长速率、根长密度极显著相关($p<0.01$),R 值分别为 0.981,0.982,说明细根的生长速率和根长密度对沙棘液流速率有显著影响,沙棘液流速率越高,根系的生长速率、根长密度越大,沙棘液流速率越低,根系生长速率和根长密度越小;植物尤其是根系生长必然通过表型可塑性对土壤含水率做出响应[20]。同理可知,土壤含水量与细根生长速率呈极显著正相关关系($p<0.01$),与根长密度显著正相关($p<0.05$),R 分别为 0.975,0.919,说明土壤含水量显著影响细根生长速率和根长密度,土壤含水量越大,根系的生长速率越快,反之,土壤含水量越小,细根的生长速率就越慢。

表 3 土壤含水率与沙棘液流速率及细根变化的相关系数

项 目	沙棘液流速率	土壤含水率	生长速率	根长密度
沙棘液流速率	1			
土壤含水量	0.987**	1		
生长速率	0.981**	0.975**	1	
根长密度	0.982**	0.919*	0.999**	1

注:* 表示皮尔逊系数(R 值)在 $p<0.05$ 水平上显著相关,** 表示该值在 $p<0.01$ 水平极显著相关。

3 讨 论

随着土壤含水量的不断增加,沙棘液流速率也会加速增长,但可以推断,当土壤含水量达到土壤有效含水量的临界值以上,沙棘液流速率的增加将会变缓慢直到不会继续增加为止。生长季沙棘液流日变化呈双峰曲线,即两次基本达到同一峰值,然后开始下降,夜间基本没有液流活动,但不为 0。沙棘液流每日 8:00—8:30 启动,9:30,14:30 达到峰值,21 点以后迅速降到最低值。近年来有研究结果表明,沙棘液流呈现“单峰”和“多峰”曲线,沈振西[21]对宁夏南部柠条、沙棘和华北落叶松的液流与蒸腾耗水特性进行研究,研究表明液流通量和蒸腾速率的日变化曲线在晴天表现出明显的“单峰”型,在夜间仍有液流运动。刘龙等[22]研究了土壤水分与沙棘液流的指数关系,其研究还表明液流速率的日变化曲线在晴天表现出明显的“双峰”型,与本试验结果相类似,本试验采用指数饱和曲线函数对沙棘土壤含水量及沙棘液流速率进行拟合,发现沙棘的土壤含水量与沙棘液流速率呈指数关系,关系式为:$y=0.006\ 3\ e^{0.1319x}$,$R^2=0.982\ 1$。

根系是吸收水分的主要器官,其形态和结构直接反映植被对立地的利用情况,对植被生长具有决定作用,其中根系吸收的极小部分水分用于植物的自身生长,而绝大部分水分通过蒸腾作用散发到大气当中,沙棘液流速率是反映植物蒸腾作用的指标[23]。罗迪文等[24]研究了城市草地根系层土壤水分对降雨及蒸散作用的响应并给出结论,利用土壤水分观测结果,分析不同降雨过程对土壤水分的影响,蒸散发所消耗的水分主要由根系层提供。吴宏伟[25]研究了植物引起的土体吸力可以用叶片面积指数和根表面积系数等植物特征参数量化,并且鸭脚木树的叶片面积指数和根表面积系数存在着线性关系。丛振涛等[26]采用改进的 Feddes 根系吸水模型及负指数分布形式的根系密度模型,实现土壤与冠层的耦合,通过对冬小麦叶面积指数、株高、根系分布的模拟,实现冬小麦生长与 SPAC 水热运移的耦合。本研究结果表明沙棘细根根长密度与沙棘液流速率呈现指数关系并显著相关,关系式为:$y=0.002\ e^{0.209x}$,$R^2=0.955\ 2$,表明沙棘细根根长密度对沙棘液流速率有显著影响。

对于土壤水分与沙棘液流的关系的研究,龚道枝[27]分析了苹果树根茎瞬时液流量与树干日液流总量的变化特征,发现瞬时液流量与太阳净辐射的关系最密切,树干日液流总量与参考作物蒸发蒸腾量呈线性相关,主根与树干液流在土壤水分亏缺或大气干旱的条件下,存在明显的滞后效应。而对于土壤水分与沙棘根系关系的研究,国内学者做出了很多贡献,杨峰等[28]对于土壤水分和根系相关特性的研究,随着沙柳根系生物量总体上逐渐减小,说明土壤水分显著影响根系的生长,根系分布与土壤水分变化基本符合沙柳

吸水规律。本研究试验表明,土壤含水量与沙棘液流速率呈极显著正相关关系,即在土壤含水量上升时,沙棘液流速率也随之升高,当土壤含水量下降时,沙棘液流速率也降低,皮尔逊相关系数 $R=0.987$。而与沙棘细根生长速率和土壤含水量的变化相对之下,R 值要小于土壤水分与沙棘液流速率的 R 值,可能是由于沙棘根系的增长速率稍滞后于土壤水分的变化,但其相关性也为极显著正相关,干旱区刺槐、侧柏人工林沙棘液流日变化特征及液流动态与土壤水分相关性研究[29]也得出了类似的结果。目前国内外学者对于细根与土壤含水量变化的响应研究较少,本试验结果表明沙棘细根生长速率变化与土壤含水量变化也显著正相关($p<0.01$),土壤含水量与根长密度显著相关($p<0.05$)。

4　结 论

(1) 沙棘细根生长速率在 6—7 月最小,7—9 月沙棘细根生长生长速率逐渐升高,9—10 月生长速率开始降低。

(2) 土壤含水量与沙棘液流速率呈现出在前期(6—7 月)较低,中后期(7—9 月)逐渐升高,后期(9—10 月)迅速下降的变化趋势,沙棘细根生长速率的变化滞后于土壤含水量的变化。

(3) 土壤含水量变化与沙棘液流速率呈极显著正相关关系($p<0.01$),即随着含水量的升高,沙棘液流速率逐渐增加;沙棘细根生长速率与沙棘液流速率显著正相关($p<0.05$),土壤含水量变化与细跟生长速率呈极显著正相关关系($p<0.01$),随着土壤含水量升高,细根生长速率逐渐升高。

[参 考 文 献]

[1] 王立久,李长明,董晶亮.砒砂岩分布及岩性特征[J].人民黄河,2013,35(12):91-93,97.

[2] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J].水利学报,2019,50(11):1384-1391.

[3] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.农牧交错带柠条锦鸡儿根系与土壤水分空间关系研究[J].中国农业科技导报,2017,19(7):101-107.

[4] 张永亮.沙棘根系生物力学特性研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[5] 武晶,王百田,郭红艳,等.浅析沙棘根系在砒砂岩地区坡面上的分布[J].水土保持研究,2007(6):358-360,364.

[6] 党晓宏.鄂尔多斯砒砂岩地区沙棘林生态效益分析研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[7] 杨洁,吕金林,何秋月,等.黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干液流时滞效应与蒸腾特征的关联性[J].应用生态学报,2019,30(8):2607-2613.

[8] 王媛,魏江生,周梅,等.大兴安岭南段白桦树干液流对土壤水分的响应[J].水土保持研究,2020,27(4):128-133.

[9] 杨明杰,杨广,何新林,等.干旱区梭梭茎干液流特性及对土壤水分的响应[J].人民长江,2018,49(6):33-38.

[10] 吕金林,何秋月,闫美杰,等.黄土丘陵区辽东栎树干液流特征对边材面积和土壤水分的响应[J].应用生态学报,2018,29(3):725-731.

[11] Zhang Chaobo, Liu Yating, Li Dongrong, et al. Influence of soil moisture content on pullout properties of *Hippophae rhamnoides* Linn. roots [J]. Journal of mountain science, 2020,17(11):2816-2826.

[12] 闫励,杨方社,李怀恩,等.砒砂岩区不同立地下沙棘根系分形特征[J].干旱区研究,2019,36(2):467-473.

[13] 苗恒录,张瑞强,王健,等.沙棘的水土保持作用机制与效益[J].中国水土保持,2020(6):34-36.

[14] 刘晓宇,郭月峰,姚云峰,等.砒砂岩区不同留茬高度及坡向下沙棘根系分形特征[J].生态环境学报,2021,30(1):100-107.

[15] 王卓,郭月峰,祁伟,等.不同灌水梯度下沙棘液流特征与环境因子的关系[J].干旱区研究,2020,37(4):1018-1025.

[16] 胡建忠,刘丽颖,殷丽强,等.砒砂岩区沙棘群落根系层的垂直分布规律[J].防护林科技,2011(1):15-19.

[17] 仲宸,郭月峰,祁伟,等.内蒙古半干旱地区不同平茬模式柠条锦鸡儿细根季节动态变化研究[C]//中国治沙暨沙业学会.中国治沙暨沙业学会 2018 年学术年会论文集,2018:12.

[18] 郭月峰,祁伟,姚云峰,等.内蒙古砒砂岩区沙棘细根生长特征对平茬的响应[J].中国农业科技导报,2020,22(12):155-162.

[19] 夏江宝,张淑勇,朱丽平,等.贝壳堤岛酸枣树干液流及光合参数对土壤水分的响应特征[J].林业科学,2014,50(10):24-32.

[20] 王浩.砒砂岩区不同生境条件下沙棘根系构型特征研究[D].陕西 西安:西北大学,2018.

[21] 沈振西.宁夏南部柠条、沙棘和华北落叶松的液流与蒸腾耗水特性[D].北京:中国林业科学研究院,2005.

[22] 刘龙,姚云峰,郭月峰,等.农牧交错带柠条锦鸡儿根系与土壤水分空间关系研究[J].中国农业科技导报,2017,19(7):101-107.

[23] 邸楠.毛白杨根系性状时空变异及土壤水分吸收利用特征与机制[D].北京:北京林业大学,2019.

[24] 罗迪文,黄金柏,黄涌增,等.城市草地植被根系层土壤水分对降雨的响应及蒸散发特性[J].扬州大学学报,2020,23(5):39-44.

[25] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.

[26] 丛振涛,雷志栋,胡和平,等.冬小麦生长与土壤—植物—大气连续体水热运移的耦合研究(Ⅰ):模型[J].水利学报,2005(5):575-580.

[27] 龚道枝.苹果园土壤—植物—大气系统水分传输动力学机制与模拟[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2005.

[28] 杨峰,王文科,刘立,等.毛乌素沙地沙柳根系与土壤水分特征的研究[J].安徽农业科学,2011,39(26):16050-16052.

[29] 吴芳.黄土丘陵半干旱区刺槐、侧柏人工林耗水规律及影响因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.