

巩炜,胡广录,付鹏程,等.干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J].中国沙漠,2020,40(5):200-208.

干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的 土壤水分入渗特征

巩 炜,胡广录,付鹏程,李浩然,周 川,邓丽媛

(兰州交通大学 环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:为了探明干旱区不同固沙植物的土壤水分入渗特性,在黑河中游的甘肃省临泽县北部的沙漠-绿洲过渡带内选取3种固沙植物为研究对象,采用双环刀常水头试验法测定土壤水分入渗过程,并进行不同模型的模拟与分析。结果表明:(1)土壤水分入渗率与土壤初始含水率负相关,且在入渗初期相关性显著。(2)3种固沙植物的初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率均表现为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)>沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)>泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*),且差异性显著($P<0.05$)。(3)不同固沙植物的土壤水分入渗过程模拟显示,Philip模型最优,Horton模型次之,Kostiakov模型最差,Philip模型更适合研究该区域不同固沙植物的土壤水分入渗过程。研究可为干旱区土壤水分的合理利用及退化生态系统的植被恢复与重建提供科学依据。

关键词:固沙植物;土壤水分;入渗过程;入渗特征;沙漠-绿洲过渡带

文章编号: 1000-694X(2020)05-200-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00098

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

0 引言

在干旱区,土壤水分是植被恢复重建的主要制约因子,是影响荒漠植物生长发育及其生态效益正常发挥的关键因素^[1-5]。河西走廊沙漠-绿洲过渡带是该地区荒漠化与绿洲化进程对立的敏感地带^[6]。土壤水分的匮乏导致了生长发育在过渡带上的植物种类少、群落结构简单、覆盖度不高,过渡带整体生态环境脆弱^[7-8]。

土壤水分入渗是在降雨或灌溉条件下,水分通过土壤表面垂直或水平进入土壤的过程^[9]。大气降水是干旱区土壤水分的重要来源^[10],有限的大气降水入渗对植被生长、沙丘固定等起着重要作用,土壤水分入渗速率决定着降雨对地下水的入渗补给量和土壤侵蚀程度。汤英等^[11]发现,沙漠固沙植物的根系形态结构影响着入渗,植物根系与土壤之间容易形成缝隙,使植物根分布区的土壤入渗能力增强。张志山等^[12]发现,沙坡头固沙植被建植后对土壤水分的消耗会极大地影响植被生物量的累积、

种群结构和分布格局。王新平等^[13]发现沙坡头固定沙丘区降水强度与土壤入渗速率之间存在线性相关关系。周宏飞等^[14]发现古尔班通古特沙漠季节性冻结土壤的入渗能力随土壤含水率的增大而减小。但是在沙漠-绿洲过渡带鲜见相关研究的文献资料。

近年来,随着人口的增加,黑河中游地区土地资源开发利用的规模不断扩大,导致了水资源供需矛盾突出,也引发了一系列的生态环境问题,尤其沙漠-绿洲过渡带的固沙植物出现了不同程度的衰退迹象,影响其生态防护功能的正常发挥,对绿洲农业生产活动造成了严重威胁。维持固沙植被的生态稳定性已成为政府部门和学界高度关注的区域环境问题。沙漠-绿洲过渡带土壤中的水分入渗特征和禀赋条件对固沙植物的水分利用及其生存繁育乃至生态稳定至关重要。本文以黑河中游沙漠-绿洲过渡带3种固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)为研究对象,研究3种

收稿日期:2020-07-23; 改回日期:2020-09-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41561102,41867074)

作者简介:巩炜(1995—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为干旱区生态修复。E-mail: 542456570@qq.com

通信作者:胡广录(E-mail: hgl0814@163.com)

固沙植物的土壤水分入渗过程,分析其入渗特征的差异,并运用不同模型对入渗过程进行模拟,旨在探明沙漠-绿洲过渡带不同固沙植物的土壤水分入渗规律,以期固沙植物如何合理高效地利用有限的水资源和干旱区退化生态系统的植被恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于黑河中游的甘肃省临泽县北部的沙漠-绿洲过渡带(图1),地处荒漠、巴丹吉林沙漠和张掖-临泽绿洲交汇处($39^{\circ}21'53''$ — $39^{\circ}22'01''$ N, $100^{\circ}09'12''$ — $100^{\circ}09'14''$ E),属典型温带大陆性干旱荒漠气候。研究区海拔1 370 m左右,多年平均降水量117 mm,且多在6—9月,约占全年降雨量的70%,年蒸发量2 390 mm,空气相对湿度45%~49%;年平均气温7.6℃,最高气温39.1℃,最低-27.3℃,≥10℃的年积温3 088℃,年日照时间3 045 h,无霜期165 d^[15-17]。由于长期受风沙活动的影响,研究区域内土壤多发育为风沙土,且以半固定沙丘为主,植被稀少,以灌木、半灌木群落为主,几乎全为超旱生植物,具有典型荒漠植被的特征,代表性荒漠植物有泡泡刺、沙拐枣、梭梭等。

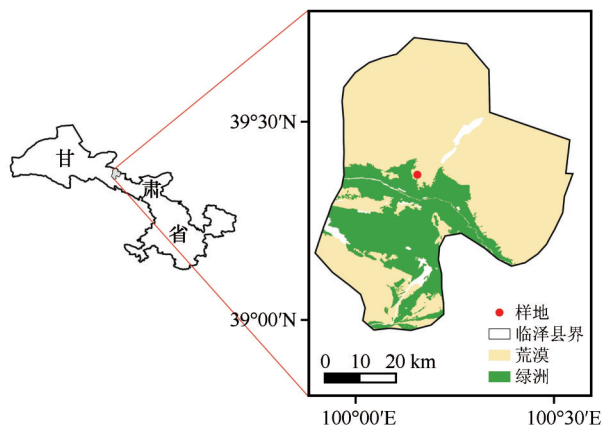


图1 研究样地地理位置

Fig.1 Geographical location map of the research plot

2 研究方法

2.1 采样及试验

2019年6—10月在选定的研究区内进行野外采样,每个月在实验样地分别挑选生境相近的梭梭、沙拐枣和泡泡刺3种固沙植物各1株,选取的3种植物均不与同种或其他植物存在土壤水分的竞争和

相互影响,即选取的植物周围5 m内没有同种或其他植物,这样试验结果可以比较真实地反映固沙植物个体的土壤水分入渗特征。在野外采用环刀法采集植物根区1 m范围内的土壤样品,样品采集的土层深度分别为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 cm,同一种植物的同一土层采取3个平行样品。在室内采用烘干法测定土壤初始含水率,采用双环刀常水头试验法测定土壤水分入渗率。入渗试验时间设定为120 min,前10 min每1 min记录1次,之后每5 min记录1次。梭梭水平根系集中分布在距土表50~100 cm处,沙拐枣的水平根系可达20~50 cm土层,而泡泡刺根系基本分布在10~60 cm土层^[18-20]。3种固沙植物根系分布层虽有差异,但主要根系集中分布在40~60 cm土层。限于文章的篇幅,本文从全部入渗试验结果中选择40~60 cm土层的试验结果作为代表性土层进行入渗过程和入渗特征分析。

2.2 入渗速率的计算

入渗速率计算公式为:

$$f = \frac{1000V}{a} \quad (1)$$

式中: f 为入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; V 为单位时间入渗量, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; a 为环刀内环面积。本次实验中, a 为1 998.78 mm^2 。

用量筒测量每个观测时段环刀内土壤样品渗出的水量(体积)。

2.3 土壤入渗过程模拟

本文选用Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型对土壤入渗过程进行模拟分析^[21-23],并评价模型模拟土壤入渗过程中的精确度及适用性。

Kostiakov模型^[24]是最为常用的经验模型。

$$i(t) = kt^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为入渗时间,min; k 为入渗系数; α 为入渗指数。 k 和 α 由试验资料回归分析得出。由于模型参数 k 和 α 能够随着初始和边界条件的变化而变化,模型参数具有很强的弹性。

Horton入渗模型^[25]是表征降雨入渗过程的经验模型。

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f)e^{-bt} \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为入渗时间,min; i_0 为初始入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; i_f 为稳定入渗速率,

$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; b 为土壤入渗递减指数。

Philp^[26]认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈幂级数关系。

$$i(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (4)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; t 为入渗时间, min ; S 为土壤吸湿率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$; A 为稳渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.4 数据处理

对获取的数据使用 R 语言 3.6.3 进行方差分析, 方差分析前, shapiro.test 函数检验正态性, levene-Test 方差检测齐性, 满足正态性和方差齐性, 使用 TukeyHSD 函数进行配对检验; 使用 SPSS17.0 进行

相关性分析; 使用 Origin 2018 进行模型模拟和制图。

3 结果与分析

3.1 不同初始含水率条件下的土壤水分入渗率

不同土壤初始含水率条件下, 不同固沙植物 40~60 cm 土层深度的入渗率月际间变化情况见表 1。表 1 中土壤初始含水率为同层 3 个平行样品的平均值, 不同时段入渗率亦取同层 3 个平行样品入渗试验结果的平均值。不同固沙植物在整个入渗过程不同时间点的入渗率和土壤初始含水率的关系见图 2。图 2 中的入渗率和土壤初始含水率均为 3 个平行样品的实测值。

表 1 不同初始含水率条件下的 40~60 cm 土层土壤水分入渗率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

Table 1 Soil moisture infiltration rate under different initial moisture contents ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) at 40-60 cm soil layer

固沙植物	月份	土壤初始 含水率/%	时间/min							
			1	5	10	20	30	60	90	120
梭梭	6	5.2	5.804	4.453	4.203	4.195	3.912	3.722	3.812	3.622
	7	6.1	5.603	4.603	4.203	3.852	3.812	3.352	3.412	3.372
	8	13.5	4.203	3.452	2.852	3.202	2.982	3.026	3.022	3.018
	9	4.3	6.254	3.752	4.203	3.772	3.482	3.422	3.442	3.418
	10	3.8	6.254	5.303	4.052	3.952	3.742	3.242	3.172	3.142
沙拐枣	6	4.4	4.453	3.352	3.302	3.572	3.442	3.222	3.282	3.172
	7	4.2	4.603	3.752	3.202	2.942	2.782	2.742	2.712	2.662
	8	8.9	3.052	2.452	2.101	2.532	2.351	2.171	2.281	2.161
	9	4.6	4.803	3.152	2.652	2.492	2.241	2.091	2.061	2.031
	10	4.1	4.052	3.252	3.201	3.172	3.022	2.381	2.411	2.401
泡泡刺	6	2.6	4.153	2.602	2.101	2.091	2.051	1.931	1.811	1.831
	7	2.9	4.603	2.251	2.381	2.301	2.271	1.951	1.951	1.941
	8	13.2	1.001	0.925	0.901	0.851	0.710	0.720	0.710	0.750
	9	9.6	2.351	1.751	1.351	1.361	1.251	1.281	1.191	1.191
	10	5.8	3.052	2.551	2.462	2.351	2.211	1.851	1.841	1.831

同一土壤初始含水率条件下, 土壤水分入渗率随入渗时间的延长逐渐减小, 最终趋于稳定。土壤初始含水率对入渗的影响随入渗时间的延长逐渐减弱。

在入渗 30 min 后, 土壤初始含水率对土壤平均入渗率的影响随着入渗时间的延长逐渐减弱; 60 min 后, 不管土壤初始含水率的大小, 入渗都基本达到稳定状态, 此时的土壤入渗能力的强弱可由土

壤稳定入渗率 i_s 表示。稳定入渗率也有随土壤初始含水率增高而减小的趋势。

同一种固沙植物, 土壤水分入渗率随着土壤初始含水率的增大而减小。

3.2 土壤水分入渗特征

3.2.1 土壤水分入渗曲线

绘制 3 种固沙植物在不同月份 40~60 cm 土层

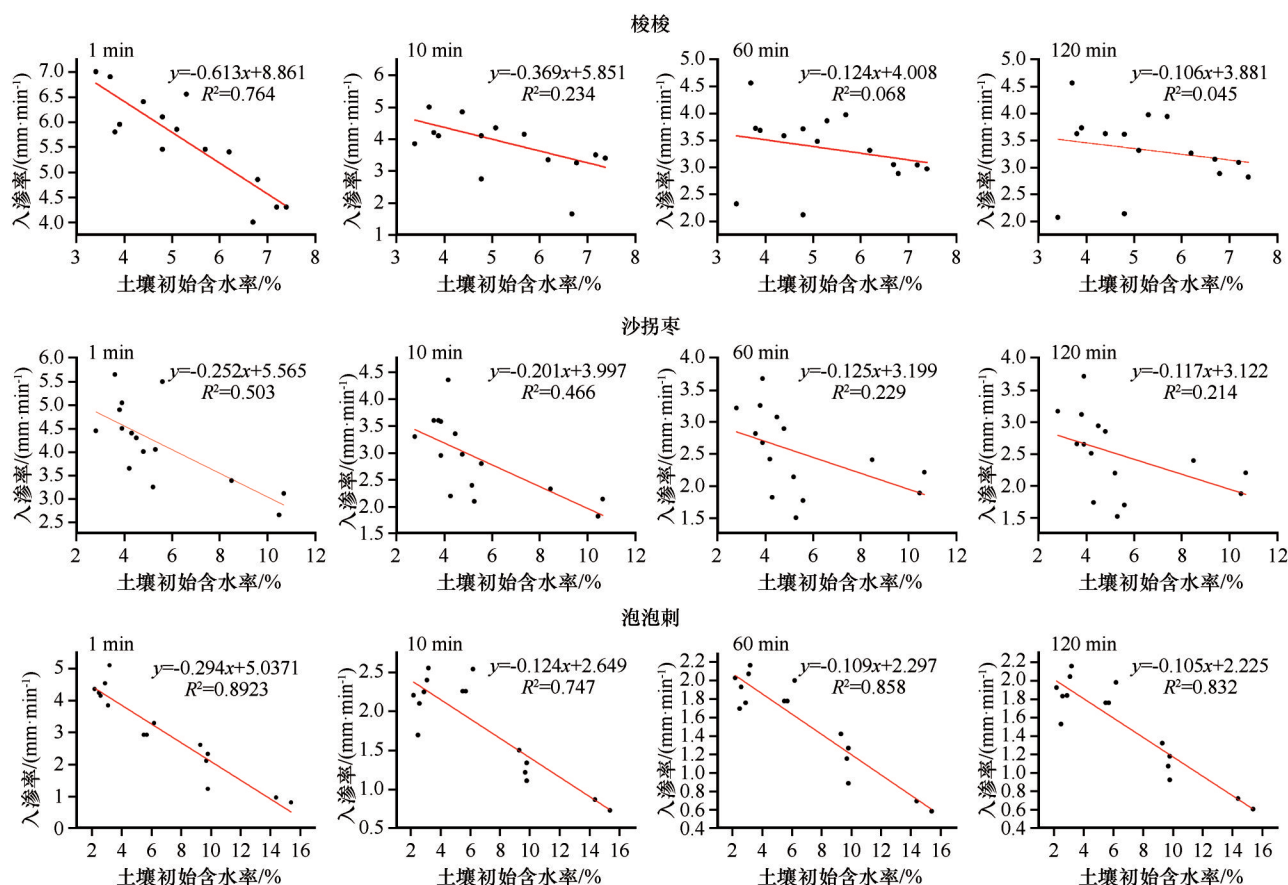


图2 3种固沙植物入渗率和土壤初始含水率的关系

Fig.2 Relationship between the infiltration rate of three sand-fixing plants and the initial moisture content of soil

深度的土壤水分入渗曲线(图3)。不同的固沙植物虽然在入渗过程中存在一定的差异,但是入渗率在开始阶段都是陡降的,随着入渗时间的延续,入渗率下降的幅度逐渐减小,最后趋于稳定。在入渗开始的10 min内,入渗率会发生较大幅度的波动减小;在入渗时间延长至80~120 min时,入渗率基本保持稳定。

对6—10月3种固沙植物40~60 cm土层所有土壤样品的入渗试验结果求取初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率平均值(表2)。不同固沙植物的土壤水分入渗速率具有相同的变化趋势,即初始入渗率最大,平均入渗率次之,稳定入渗率最小。3种固沙植物的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均表现为梭梭最大,沙拐枣次之,泡泡刺最小,且都存在着极显著的差异性($P < 0.05$)。

3.2.2 累积入渗量

累积入渗量可以总体上反映土壤入渗能力的大小^[21]。累积入渗量均在入渗初期增长较快,随着入渗历时的增加,累积入渗量的增长趋势逐渐变缓

(图4)。在入渗历时为120 min时,梭梭、沙拐枣、泡泡刺的累积入渗量分别为1 743.4、961.6、508.9 mL。可见不同固沙植物对土壤水分入渗量的影响不同。

在入渗过程中,随着入渗时间的增加,渗入土壤的水量逐渐减小,但是在同一入渗时间,不同固沙植物的累积入渗量是不同的。可以用幂函数对累积入渗量进行拟合:

$$I = at^b \quad (5)$$

式中: I 为累积入渗量,cm; t 为时间,min; a 和 b 分别为拟合参数,累积入渗量的拟合参数见表3。

由表3可以看出,不同固沙植物拟合方程的 R^2 均在0.999以上,累积入渗量随入渗历时的变化符合幂函数($I=at^b$)的分布,因此固沙植物的相关研究中可以用幂函数对其土壤水分累积入渗量随时间的变化规律进行模型模拟。

3.3 土壤水分入渗的模型模拟

针对不同的固沙植物,对每一土层不同月份的

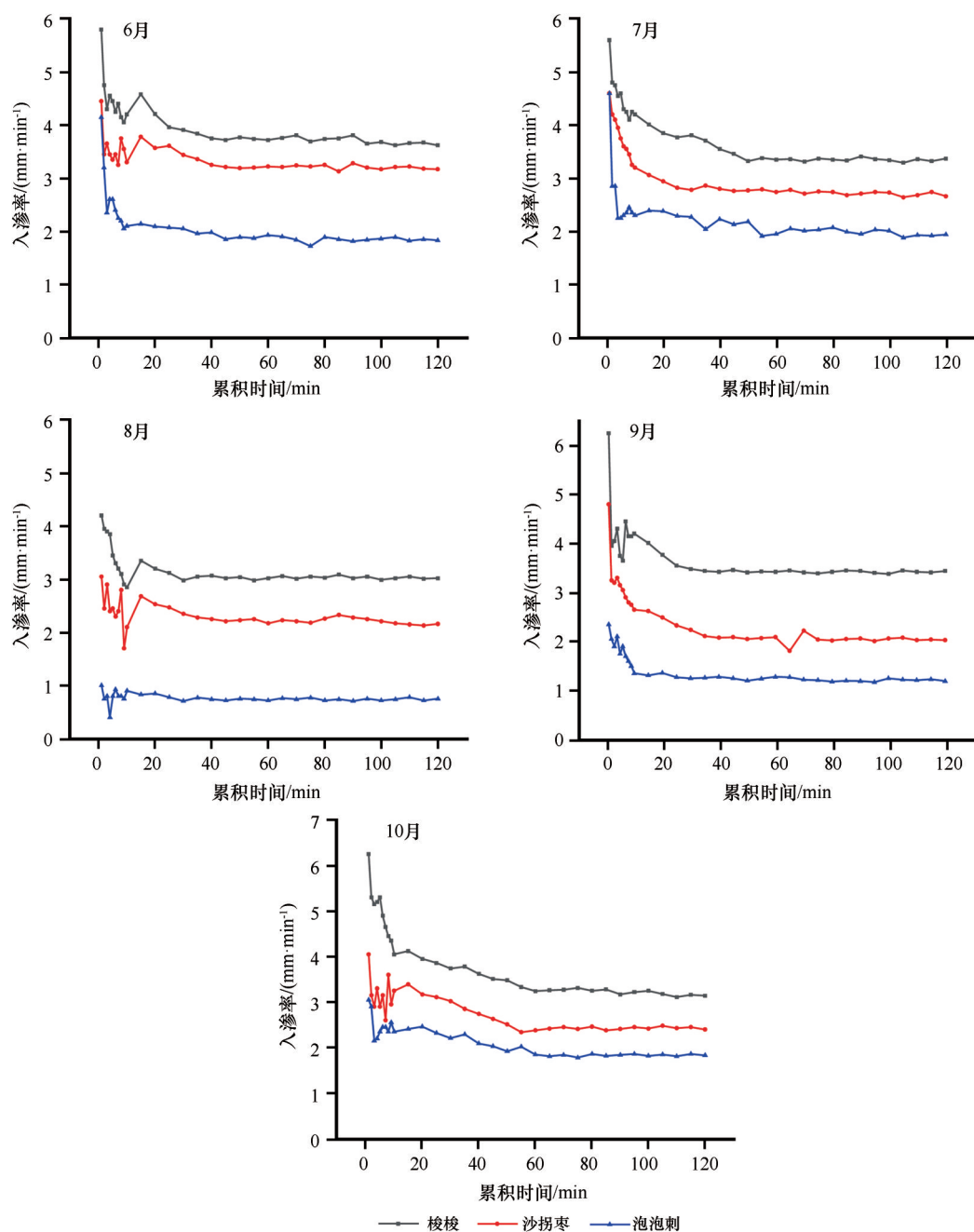


图3 3种固沙植物的40~60 cm土层土壤水分入渗过程

Fig.3 Soil moisture infiltration process of three sand-fixing plants at 40-60 cm soil layer

表2 不同固沙植物40~60 cm土层土壤水分入渗特征指标

Table 2 Soil moisture infiltration characteristics index of different sand-fixing plants at 40-60 cm soil layer

固沙植物	初始入渗率 /(mm·min ⁻¹)	平均入渗率 /(mm·min ⁻¹)	稳定入渗率 /(mm·min ⁻¹)
梭梭	5.624±0.242 ^a	3.730±0.147 ^a	3.347±0.167 ^a
沙拐枣	4.193±0.251 ^b	2.806±0.147 ^b	2.252±0.161 ^b
泡泡刺	3.032±0.351 ^c	1.740±0.160 ^c	1.525±0.133 ^c

土壤水分入渗试验数据分别求取平均值,采用Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型进行模拟分析,不同模型的模拟结果如表4所示。

从表4来看,Kostiakov模型模拟精度除沙拐枣(R^2 均大于0.900)外,其他两种植物相对较差;泡泡刺的整体模拟效果偏差(R^2 均小于0.847);梭梭的20~40 cm和40~60 cm土层深度的模拟效果极差(R^2 均小于0.520)。Horton模型对泡泡刺不同土层的模拟效果较为一般(R^2 均小于0.906);梭梭除了100~

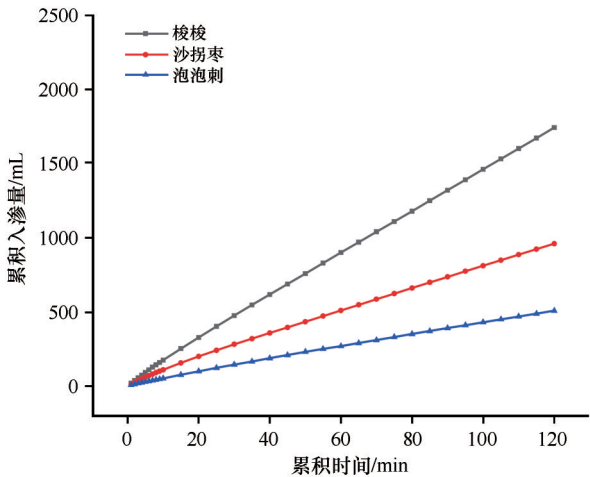


图 4 不同固沙植物 40~60 cm 土层累积入渗量
Fig.4 Cumulative infiltration capacity of different sand-fixing plants at 40-60 cm soil layer

表 3 不同固沙植物 40~60 cm 土层累积入渗量拟合参数
Table 3 Fitting parameters of cumulative infiltration capacity of different sand-fixing plants at 40-60 cm soil layer

固沙植物	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
梭梭	19.574	0.937	0.99992
沙拐枣	13.782	0.885	0.99980
泡泡刺	6.759	0.902	0.99996

120 cm 土层深度模拟的 *R*² 为 0.777 外,其余土层深度模拟的 *R*² 均大于 0.929;但对沙拐枣的模拟效果最好(*R*² 均大于 0.964)。而 Philip 模型对 3 种固沙植物的模拟效果 *R*² 均在 0.818 以上,尤其对沙拐枣和泡泡刺不同土层的模拟效果均很好, *R*² 均在 0.911 以上。

表 4 入渗模型的模拟结果
Table 4 Simulation results of infiltration model

固沙植物	深度/cm	Kostiakov 模型	<i>R</i> ²	Horton 模型	<i>R</i> ²	Philip 模型	<i>R</i> ²
梭梭	0~20	$i(t)=9.419t^{-0.068}$	0.825	$i(t)=7.060+3.197e^{-0.119t}$	0.955	$i(t)=1/2*8.275t^{-0.5}+6.610$	0.934
	20~40	$i(t)=5.894t^{-0.059}$	0.523	$i(t)=4.631+4.326e^{-0.336t}$	0.974	$i(t)=1/2*6.633t^{-0.5}+4.126$	0.912
	40~60	$i(t)=5.134t^{-0.038}$	0.480	$i(t)=4.395+2.988e^{-0.375t}$	0.929	$i(t)=1/2*4.156t^{-0.5}+4.074$	0.819
	60~80	$i(t)=5.963t^{-0.139}$	0.922	$i(t)=3.293+2.642e^{-0.083t}$	0.946	$i(t)=1/2*7.667t^{-0.5}+2.941$	0.926
	80~100	$i(t)=5.146t^{-0.098}$	0.910	$i(t)=3.386+1.839e^{-0.084t}$	0.937	$i(t)=1/2*5.414t^{-0.5}+3.129$	0.948
	100~120	$i(t)=4.087t^{-0.077}$	0.967	$i(t)=2.829+0.929e^{-0.033t}$	0.777	$i(t)=1/2*3.137t^{-0.5}+2.787$	0.818
沙拐枣	0~20	$i(t)=8.365t^{-0.076}$	0.942	$i(t)=5.914+1.853e^{-0.041t}$	0.971	$i(t)=1/2*6.605t^{-0.5}+5.736$	0.938
	20~40	$i(t)=6.771t^{-0.137}$	0.964	$i(t)=3.634+2.328e^{-0.046t}$	0.966	$i(t)=1/2*8.140t^{-0.5}+3.377$	0.926
	40~60	$i(t)=5.020t^{-0.131}$	0.963	$i(t)=2.771+1.672e^{-0.046t}$	0.967	$i(t)=1/2*5.824t^{-0.5}+2.593$	0.911
	60~80	$i(t)=4.809t^{-0.108}$	0.929	$i(t)=2.939+1.401e^{-0.044t}$	0.968	$i(t)=1/2*5.089t^{-0.5}+2.776$	0.982
	80~100	$i(t)=4.198t^{-0.121}$	0.917	$i(t)=2.429+1.319e^{-0.045t}$	0.967	$i(t)=1/2*4.704t^{-0.5}+2.281$	0.928
	100~120	$i(t)=3.615t^{-0.152}$	0.941	$i(t)=1.819+1.327e^{-0.047t}$	0.964	$i(t)=1/2*4.709t^{-0.5}+1.657$	0.948
泡泡刺	0~20	$i(t)=6.184t^{-0.062}$	0.677	$i(t)=4.437+1.351e^{-0.022t}$	0.689	$i(t)=1/2*4.768t^{-0.5}+4.498$	0.912
	20~40	$i(t)=4.043t^{-0.075}$	0.847	$i(t)=2.829+0.929e^{-0.034t}$	0.777	$i(t)=1/2*3.654t^{-0.5}+2.738$	0.917
	40~60	$i(t)=3.355t^{-0.126}$	0.645	$i(t)=2.125+5.684e^{-0.859t}$	0.868	$i(t)=1/2*4.426t^{-0.5}+1.714$	0.934
	60~80	$i(t)=2.908t^{-0.097}$	0.786	$i(t)=1.739+0.880e^{-0.024t}$	0.773	$i(t)=1/2*3.189t^{-0.5}+1.751$	0.924
	80~100	$i(t)=1.686t^{-0.199}$	0.724	$i(t)=0.815+2.363e^{-0.541t}$	0.906	$i(t)=1/2*2.872t^{-0.5}+0.561$	0.956
	100~120	$i(t)=1.633t^{-0.289}$	0.729	$i(t)=0.605+3.698e^{-0.815t}$	0.887	$i(t)=1/2*3.184t^{-0.5}+0.294$	0.978

对 3 种固沙植物 6 个土层而言, Kostiakov 模型、Horton 模型和 Philip 模型的 *R*² 均值分别为 0.816、0.901 和 0.923, 说明 3 种入渗模型能够很好地描述整个土层土壤水分入渗变化过程。从模拟精度上来比较, Philip 模型>Horton 模型>Kostiakov 模型。

4 讨论

土壤水分入渗是水分循环的重要环节, 对区域内的植物有效利用土壤水分至关重要。基于河西走廊临泽县北部的沙漠-绿洲过渡带斑块状植被的具体情况, 沙区土壤水分的时空动态决定着生态系

表5 不同入渗时间 40~60 cm 土层土壤水分入渗率与土壤初始含水率的相关性

Table 5 Correlation between soil moisture infiltration rate and initial soil moisture content at different infiltration times at 40-60 cm soil layer

固沙植物	入渗时间			
	1 min	10 min	60 min	120 min
梭梭	-0.874**	-0.484	-0.260	-0.212
沙拐枣	-0.709**	-0.682**	-0.479	-0.462
泡泡刺	-0.945**	-0.926**	-0.912**	-0.864**

**：在 0.01 级别（双尾），相关性显著；*：在 0.05 级别（双尾），相关性显著。

统格局和演变，而生态系统演变又不断改变着沙地的人文过程^[27-28]。土壤水分与固沙植物之间存在着复杂的关系，一方面植物的生长发育需要消耗土壤水分，另一方面植物通过冠层遮荫减少表土蒸发来防止土壤水分的流失，所以不同固沙植物下的土壤初始含水率不同。因此，土壤初始含水率是影响土壤水分入渗过程和入渗量大小的重要因子。张建丰^[29]研究黄土区入渗特征时发现土壤初始含水率的增加可以减少入渗达到稳定的时间，但本研究对沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗试验并没有印证这一结论。这可能与研究区土壤初始含水率相对较低有关，还可能与研究区的土壤质地、土壤理化性质、土壤生物结皮、土壤生物群落、植物根系的分布等诸多因素的影响有关。在其他条件相同情况下，土壤初始含水率对入渗起控制作用，土壤初始含水率的增加显著影响初始入渗率，因为土壤初始含水率的增加一方面降低了土壤的吸水能力，另一方面土壤颗粒吸水膨胀，降低了土壤孔隙度；入渗初期初始含水率越低，土壤水分入渗能力越强，随着入渗时间的延长，含水率对入渗的影响逐渐变弱^[30-31]。由表5可以看出，本研究中3种固沙植物的土壤水分入渗率与土壤初始含水率都存在着负相关关系，而且这种关系在入渗初期的相关性比较显著。

闫冰等^[23]和王健等^[32]研究表明土壤入渗过程可以按照土壤水分受力情况及运行特征大致分为3个阶段。①渗润阶段（0~10 min）：这个阶段土壤含水量较低，入渗量较大，入渗速率陡降；②渗漏阶段（10~60 min）：下渗水分在重力和毛细管引力的作用下逐渐填充土壤孔隙，此阶段入渗量明显减小，入渗速率降低；③渗透阶段（60~120 min）：土壤孔隙达

到饱和后，水分在重力的作用下渗透，入渗速率相对稳定。本文的试验研究结果也表明固沙植物土壤水分入渗情况基本与此3个阶段一致（图3）。

土壤水分入渗特征常用初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和累积入渗量等指标反映。土壤水分入渗速率的大小决定着降雨对地下水的入渗补给量和土壤抗侵蚀能力的强弱^[30]。干旱区不同固沙植物下土壤水分入渗特征差异性较大。梭梭的初始入渗率（5.624 mm·min⁻¹）明显高于沙拐枣（4.193 mm·min⁻¹）和泡泡刺（3.032 mm·min⁻¹），这与梭梭的土壤初始含水率（5.28%）低有关。稳定入渗率是评价土壤水文特性的一个重要指标，本试验研究中不同固沙植物的稳定入渗率表现为梭梭（3.347 mm·min⁻¹）>沙拐枣（2.252 mm·min⁻¹）>泡泡刺（1.525 mm·min⁻¹），这可能与荒漠固沙植物地上部分的分枝结构及其对地表的覆盖有关。尹立河等^[33]研究发现植被的覆盖对土壤稳定入渗率影响较为明显，植被覆盖度越高，由于植被蒸腾耗水和冠层截留，降低了土壤含水率，进而增大了土壤入渗率。项目组研究人员前期在这一区域的调查和观测研究表明，试验样地内梭梭的地表覆盖度（19.39%）明显高于沙拐枣（2.56%）和泡泡刺（4.64%），沙拐枣的覆盖度比泡泡刺低，但其稳定入渗率大于泡泡刺，这是因为稳定入渗率不仅仅受植被覆盖度的影响，可能还与植物的生长发育阶段、林龄、地下根系分布特征、根区生物群落等有关，具体的影响因素及其影响程度尚需要进一步的实验探究。

土壤水分入渗是一个十分复杂的水文过程，渗透试验结果仅能对特定土壤样品（采样获得）的入渗过程进行分析说明，但对于其所代表的区域土壤水分入渗过程、特征及规律很难明确辨析，因为采样点位不同，土层的土壤质地、土壤温度、土壤初始含水率、有机质组成和含量、根系分布特征及其水力提升功能等均有差异。因此，通过不同模型模拟是研究土壤水分入渗过程和规律的另一重要途径。Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型是目前相关研究人员使用较多的土壤水分入渗模拟模型^[11,34]。本研究基于大量土壤样品的渗透试验数据，选用这3种模拟模型对研究区内不同固沙植物、不同土层的土壤水分入渗过程模拟发现，Philip模型的模拟效果最好，Kostiakov模型模拟精度最差。在Kostiakov模型的机制中，当 $t \rightarrow +\infty$ 时， $i(t) \rightarrow 0$ ，这

与实际情况不符,仅从这点来说,Kostiakov模型在物理概念上尚不够严谨。但根据不同研究人员在不同地区的研究结果来看,3种模型各有特点,结果极具差异性。陈家林等^[34]对太行山低山丘陵区土壤水分入渗过程进行研究发现,Philip模型模拟效果最好,而张志华等^[35]对相同区域研究发现,Kostiakov模型模拟效果最好,Horton模型次之,Philip模型最差;武晓莉等^[36]对晋西黄土区的植被研究发现,Philip模型对当地土壤入渗的模拟结果较差;闫冰等^[23]对塔里木沙漠公路防护林带的研究结果表明Kostiakov模型优于Horton模型。这说明研究区域的不同和研究对象的不同都有可能造成不同模型模拟结果的差异,这种模拟结果的差异性还需要大量的试验研究来进一步的验证,同时也说明土壤水分入渗模型在实际应用中还是存在一定的局限性和经验性,需慎重比较后选用。

5 结论

土壤初始含水率影响土壤入渗过程。入渗率随着土壤初始含水率的增大而减小,初始含水率对入渗能力的影响随着入渗时间的延长而逐渐减弱。

不同固沙植物影响土壤水分入渗过程。3种固沙植物的初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率均表现为梭梭>沙拐枣>泡泡刺,且差异性显著。本文综合分析认为,梭梭能够在退化生态系统的植被恢复与重建中发挥重要作用,是干旱区理想的固沙植物之一。

干旱区固沙植物的土壤水分入渗过程可用Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型进行模拟分析,3种模型模拟结果的相关系数 R^2 的均值在0.800以上。从模拟结果的优劣程度来说,Philip模型>Horton模型>Kostiakov模型。因此,研究干旱区固沙植物土壤水分入渗特征及入渗过程,可首选Philip模型。

参考文献:

- [1] 李军,王新军,贾宏涛,等. 古尔班通古特沙漠南缘干季土壤水分含量空间异质性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1628-1636.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘殿君,吴波,李永华,等. 极端干旱区增雨对泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)群落土壤呼吸的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 788-796.
- [5] 朱雅娟,贾志清,刘丽颖,等. 民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 442-446.
- [6] 张勇勇,富利,赵文智,等. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1189-1195.
- [7] 丁建丽,塔西甫拉提·特依拜,熊黑钢,等. 塔里木盆地南缘绿洲荒漠化动态变化遥感研究:以策勒县为例[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 56-62.
- [8] 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等. 再议绿洲-沙漠过渡带:以策勒绿洲-沙漠过渡带为例[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 195-202.
- [9] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [10] 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.
- [11] 汤英,周宏飞,徐利岗. 荒漠植被影响下的沙地稳定入渗率变化特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 235-239.
- [12] 张志山,李新荣,赵洋,等. 沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1119-1135.
- [13] 王新平,李新荣,康尔泗,等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究[J]. 生态学报, 2003(6): 1234-1241.
- [14] 周宏飞,周宝佳,汤英,等. 古尔班通古特沙漠季节性冻土入渗特性试验研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 532-536.
- [15] 陈宏祥,胡广录,赵晨宇,等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植被土壤水分的分布特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 67-73.
- [16] 樊立娟. 荒漠绿洲过渡带斑块植被区土壤水分时空异质性研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.
- [17] 孟阳阳,刘冰,刘婵. 荒漠绿洲湿地土壤水热盐动态过程及其影响机制[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 149-160.
- [18] 盛晋华,乔永祥,刘宏义,等. 梭梭根系的研究[J]. 草地学报, 2004(2): 91-94.
- [19] 马婷慧,王锐,孙权. 两种固沙灌木根系分布与土壤水分差异研究[J]. 林业实用技术, 2012(10): 6-8.
- [20] 丘明新,刘家琼. 我国砾质荒漠中典型的荒漠植物群落:泡泡刺群落的研究[J]. 西北植物研究, 1983(2): 142-149, 171.
- [21] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2281-2288.
- [22] 赵景波,马延东,邢闪,等. 腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 12-16.
- [23] 闫冰,周智彬,雷加强,等. 塔里木沙漠公路防护林带土壤入渗研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 98-103.
- [24] Silva L L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil [J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/3): 83-92.
- [25] Horton R E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity[J]. Eos, 1939, 20(4): 693-711.
- [26] Philip J R. The theory of infiltration about sorptivity and alebraic infiltration equations [J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345-358.

- [27] Li X R, Tian F, Jia R L, et al. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy desert region of Northern China? [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(25): 3621–3630.
- [28] Assouline S. A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 265–271.
- [29] 张建丰. 黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [30] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. *中国农学通报*, 2008(7): 494–499.
- [31] 赵西宁, 吴发启, 王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2004(4): 109–112.
- [32] 王健, 吴发启, 孟秦倩, 等. 不同利用类型土壤水分下渗特征试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006(6): 159–162.
- [33] 尹立河, 王晓勇, 黄金廷, 等. 干旱区植被盖度增加对降水入渗补给地下水的影响: 试验研究与数值模拟[J]. *地质通报*, 2015, 34(11): 2066–2073.
- [34] 陈家林, 郭二辉, 杨果果, 等. 太行山低山丘陵区不同水土保持林地土壤渗透性能及其影响因素研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(10): 34–40.
- [35] 张志华, 桑玉强, 孔玉华, 等. 太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(9): 43–47.
- [36] 武晓莉, 吕相海, 李国会, 等. 晋西黄土区典型植被类型的土壤水分特征[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(4): 487–492.

Soil moisture infiltration characteristics of different sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone in arid region of China

Gong Wei, Hu Guanglu, Fu Pengcheng, Li Haoran, Zhou Chuan, Deng Liyuan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the soil moisture infiltration characteristics of different sand-fixing plants in arid areas, three sand-fixing plants were selected in the desert-oasis transition zone in the middle reaches of the Heihe River in the north of Linze County, Gansu Province. The soil moisture infiltration was measured by the double-ring knife constant head test method, and carry out simulation and analysis of different models. The results show that: (1) The soil moisture infiltration rate has a negative correlation with the initial soil moisture content, and the correlation is significant at the initial stage of infiltration. (2) The initial infiltration rate, stable infiltration rate, and average infiltration rate of the three sand-fixing plants showed the order of *Haloxylon ammodendron* > *Calligonum mongolicum* > *Nitraria sphaerocarpa*, with significant differences ($P < 0.05$). (3) The simulation of the soil moisture infiltration process of different sand-fixing plants shows that the Philip model is the best, the Horton model is second, and the Kostikov model is the worst. The Philip model is more suitable for studying the soil moisture infiltration process of different sand-fixing plants in this area. Research can provide a scientific basis for the rational use of soil moisture in arid areas and the restoration and reconstruction of degraded ecosystems.

Key words: sand-fixing plants; soil moisture; infiltration process; infiltration characteristics; desert-oasis transition zone