

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

王新平¹, 李新荣¹, 康尔泗¹, 张景光¹, 周海燕¹, 杨诗秀², 雷志栋²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 兰州 730000; 2. 清华大学水利系, 北京 100086)

摘要: 试验于 2001 年 8 月 17 日至 9 月 30 日在中国科学院沙坡头沙漠试验研究站进行, 主要利用时域反射仪(TDR)连续测量土壤剖面水分含量的方法, 观测受植物根系吸水、蒸散作用影响下的人工植被荒漠灌木柠条(*Caragana korshinskii*)群落区固定沙丘降水入渗与再分配过程。土壤体积含水率由水平埋设在植物根系剖面内 12 个深度层次(5~200cm)的时域反射仪探头每小时自动测定 1 次。天然降水条件下的土壤入渗速率由入渗深度与相应的入渗时间之比值计算得到。结果表明, 在 7 次不连续降水过程中, 土壤入渗速率与降水强度呈简单线性相关关系, 土壤入渗速率约为降水强度的 10 倍强。然而当次降水过程中降水强度小于 0.46mm/h 时, 土壤入渗速率约为 0cm/h, 此时的降水对人工植被固定沙丘区的土壤基本上没有水分补给作用。受荒漠灌木柠条根系吸水作用的影响, 其根系密集剖面深度 40~140cm 内降水水分入渗积累不明显。降水入渗速率及入渗深度受土壤剖面初始含水率多寡而变化, 干燥土壤剖面有助于提高入渗速率及入渗深度。降水以后随着时间的推移, 区域环境内空气温度、湿度等气象条件适宜, 柠条生长进入相对旺盛阶段, 其根系密集层 140cm 深度处土壤含水率在总体上下降的过程中, 表现出昼消夜长的趋势, 翌日 8:00 土壤含水率值略高于前一日 20:00 水分值 0.1%~0.3vol. %。

关键词: 荒漠生态系统; 土壤水分; 入渗; 水分平衡; 人工植被; 固定沙丘; 柠条

The infiltration and redistribution of precipitation in revegetated sand dunes in the Tengger Desert, Shapotou, China

WANG Xin-Ping¹, LI Xin-Rong¹, KANG Er-Si¹, ZHANG Jing-Guang¹, ZHOU Hai-Yan¹, YANG Shi-Xiu², LEI Zhi-Dong² (1. Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100086, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (6): 1234~1241.

Abstract: Forty years of revegetation using mainly *Caragana korshinskii* at Shapotou Desert Experimental Research Station near Lanzhou has established a dwarf-shrub and herbaceous cover on sand dunes. Situated in southeast Tengger Desert at 1330 m elevation, it has an average annual rainfall of 191 mm with 83% received in May-September. Precipitation, as the sole source of water replenishment in the semi-arid

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-10-03-01); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程资助项目(CACX210031); 国家重大基础研究资助项目(G2000048704)

收稿日期: 2002-01-27; **修订日期:** 2003-01-20

作者简介: 王新平(1969~), 甘肃通渭人, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区生态水文过程研究。E-mail: w-xinping@yahoo.com

Foundation item: Innovation Research Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-10-03), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences (No. CACX210031), and the National Key Project for Basic Research (No. G2000048704)

Received date: 2002-01-27; **Accepted date:** 2003-01-20

Biography: WANG Xin-Ping, Ph. D., Associate professor, main research field: eco-hydrological processes in the arid areas. E-mail: w-xinping@yahoo.com

area, plays a pertinent role in sustaining the desert ecosystem. The redistribution of infiltrated moisture through percolation, root extraction and evapotranspiration pathways was investigated. Experiments were conducted in the growing season for 45 days (17 August to 30 September 2001) on revegetated sand dunes. TDR probes were inserted horizontally at the depths of 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, and 200 cm layer below the ground surface in the dwarf-shrub of *Caragana korshinskii* community to record volumetric soil moisture at hourly intervals. Other essential meteorological and soil parameters were evaluated. Seven rainfall events each of 1.5 ~ 40.7 mm intake occurred during the experimental period. Rainfalls were sporadic with widely different intensities. For the 40.7 mm rainfall episode with 3.4 mm/h maximum intensity and 5.4% antecedent volumetric soil moisture, maximum infiltration rate attained 0.42 mm/min. Infiltration rates varied greatly with individual rainfall quantity and antecedent soil moisture, with drier soil profile facilitating infiltration. Relationship between infiltration rate and rainfall intensity is linear, with infiltration rate at 10 times the magnitude of rainfall intensity. At rainfall intensity < 0.46 mm/h, no soil moisture is gained. Root withdrawal of soil water and evapotranspiration (reaching 69% ~ 90% of precipitation) restricted the wetting front penetration. A 40 mm rainfall at 1.50 mm/h intensity permitted wetting to 60 cm depth; a similar 40.7 mm rainfall at a lower 0.49 mm/h intensity limited wetting to < 40 cm. The concentration of roots at about 140 cm depth imposed a diurnal moisture cycle there, with moisture depletion in daytime and replenishment at night by internal transfer from adjacent layers.

Key words: desert ecosystem; soil moisture; infiltration; water balance; revegetation; stabilized sand dune; *Caragana korshinskii*

文章编号:1000-0933(2003)06-1234-08 中图分类号:S152.7+2,S154.1 文献标识码:A

土壤、植被冠层与大气界面间(SVAT)物质传输过程日益成为水文学研究最感兴趣的领域,降水量的迁移与转换是非灌溉区 SVAT 主要的物质传输过程。干旱半干旱区稀疏植被群落蒸散量占降水量的 90% 以上,对降水入参与水分在土壤内植被根际区再分配的研究显得十分重要。长期以来人们普遍认为掌握土壤水分的运移和分配,是有效提高植物生产力的关键^[1]。沙坡头处在阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带,位于腾格里沙漠东南缘,属草原化荒漠。40 多年来成功采用生物措施的防风固沙植被建设,需要对植被区降水入渗过程进行研究。

通过对中国科学院沙坡头沙漠试验研究站长期(1955~2000年)气象观测资料记录分析,认为降水是该地区水文循环中唯一的补给源,其中补给于表层下 3.4m 深度内流动沙丘沙层稳定贮水量占年平均降水量的 10.5%^[2],补给于稳定湿沙层或渗入深处的水量占年平均降水量的 16.6%^[3]。虽然在干旱沙漠地区存在一定数量的凝结水^[4],但是作为水分供应保证因子,其对沙生灌木、半灌木及草本植物没有利用价值,仅对隐花植物、土著植物和土壤微生物有一定的浸润补给作用^[5],天然降水是沙区水资源的主要来源。杨诗秀等利用中子扩散法和张力计对裸沙地降雨入渗水分动态进行研究分析,指出降水以后在表土一定深度($> 20 \sim 40$ cm)以下整个土壤剖面为入渗剖面^[6]。然而,应用测压仪和张力计去精确地监测土壤湿润锋前移需要很长的响应时间^[7]。更多的研究者发现时域反射仪(TDR)能够在很短的时间内测量出土壤累积入渗量及湿润锋位置^[8~12]。Timlin 等的研究还指出,在降水或灌溉过程中,对土壤垂直剖面内不同位置的入渗情形(湿润锋)进行同步试验观测是非常必要的。应用时域反射仪(TDR)的室内观测结果表明,浸水条件下土壤入渗湿润锋是时间的函数^[13]。最近的研究还表明,由于受降水的随机性和不连续性影响,某点的土壤水分稳态概率密度函数依赖土壤水分入渗和蒸发损失表现出非线性特征^[14]。在地中海气候条件下的野外试验表明,时域反射仪(TDR)能够直接测定土壤水分随时间的分布情况且具有很好的分辨率和精度^[15]。但是,对荒漠植被区降水条件下沙丘土壤水分受重力作用下的入渗与再分配过程研究尚未见报道。

本文研究人工固沙植被区降水在土壤中的入渗/再分配过程与表土蒸发/蒸散规律,研究其水分转化

关系,以了解草原化荒漠地区的基本水文生态环境特征,阐明人工固沙植被建立以后,干旱区植被系统-人工生态防护体系对区域水分平衡的影响;确定沙地水分的合理承载能力及沙区土壤水分资源量与次降水过程的相互关系,为草原/荒漠过渡区生态环境保障体系的建设服务,从而为综合治理与开发沙漠提供科学依据。

1 材料与方法

试验在中国科学院沙坡头沙漠试验站人工固定沙丘上进行(37°27'N, 104°57' E),海拔高度约为1330m。格状沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布。沙丘主梁呈新月型沙丘链形态,走向为西北~东南方向,相对高差15~20m。主风方向为西北风和西北西风,年均风速2.8m/s。沙坡头地区土壤类型有风沙土、灰钙土、灰棕荒漠土、草甸土、沼泽土、耕作土等,以风沙土及灰棕荒漠土分布范围最广。风沙土容重1.53~1.60g/cm³,田间持水量6.70vol. %。

移动沙丘经由草方格(1m×1m)固定后,于1991年春季沿东北~西南方向栽植柠条(*Caragana korshinskii*)灌木幼苗,防护林呈条带状,植株行距×株距为2.5m×1m,栽植密度4000株/hm²。

试验期间(2001-08-17~09-30)由CI-110植物冠层数字影象仪(CID Co. UK)测得柠条灌丛平均叶面积指数(LAI)为0.796±0.166。试验区植株平均高度123±0.129cm。试验前一个多月(6月26日)在柠条植株旁开挖2m深剖面,将时域反射仪(TDR)(Model 6050X1, Trase System I, USA)探头按深度5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200cm水平插入,然后回填。同时测得灌木柠条新生活活动根系层在40~160cm之间。

试验采用时域反射仪(TDR),对次降水过程(某次连续降水过程)中以及降水结束以后固定沙丘植被区土壤水分入渗与再分配过程进行实地观测。时域反射仪(TDR)的观测精度≤±2.0%(vol.),测量范围0~100%,分辨率≤0.1%。研究认为^[12],湿润锋位置可以通过测定土壤剖面基质势或水分含量的变化来确定。因此通过逐小时连续测定土壤剖面(表层以下5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200cm)含水率的变化(含水率值连续2h以上达到稳定增量)情况,来判定土壤入渗湿润锋迁移速度。人工植被区沙丘介电常数(K_a)与土壤体积含水率(θ_v)之间的关系见图1。

降水强度 R_i (mm/h)与次降水量 P (mm)由MAOS-I小气候自动观测系统(长春气象研究所研制)测定,每小时记录一次,观测准确度≤±0.4mm($P < 10$ mm),≤±4%($P \geq 10$ mm)。同时测定植被冠层地表以上2m处气温(T_a)、相对湿度(RH)与风速(V)等参数逐时值。

2 结果与讨论

2.1 次降水特性

研究降水入渗试验中,次降水特性(降水强度、降水历时)与土壤水分初始状况决定植被区沙丘土壤入渗过程。本试验观测时间从2001-08-17~09-30,持续45d,经历3次较大降水($P = 17.4 \sim 40.7$ mm),4次较小降水($P = 1.5 \sim 9.8$ mm)。最大次降水量为40.7mm(9月15~19日),其中最大降水强度为3.4mm/h,平均降水强度为0.49mm/h。最小次降水量为1.5mm(9月23日),其中最大降水强度为0.5mm/h,平均降水强度为0.38mm/h(图2)。由图2可以看出,沙坡头雨季次降水过程具有明显的间歇性,降水强度变异显著,3次较大降水中极大相对变差高达4.8~5.3mm/h,与本地区多年降水过程中阵性降水特点相一致^[16]。间歇性降水与瞬时土壤表面高蒸发相互影响,导致雨季(生长季)沙丘土壤浅层处于频繁的干湿交替状态,由于局部土壤水分势能梯度差改变,使得降水条件下人工植被区的沙地水分入渗过程相对复杂。

2.2 土壤剖面水分入渗过程

在初始降水之前,利用TDR测定土壤剖面含水率(图3,图4)。图3~图4表示在8月17日与9月15

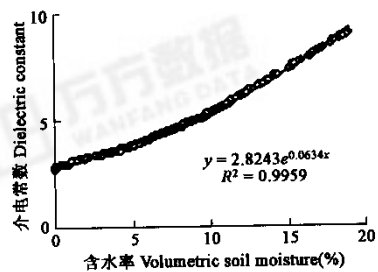


图1 试验区沙丘介电常数与体积含水率关系
Fig. 1 Relationship of dielectric constant, K_a to volumetric soil moisture of dune sand

日两次降水情况下土壤含水率随时间推移的变化过程。沙坡头地区蒸发强度大,受自然降水间歇性规律与植被区根系吸水作用的共同影响,降水在向土壤深层入渗的同时,大部分水分短期内通过蒸散发损失掉^[17]。剖面上湿润锋传递具有明显的非同步性,入渗湿润锋到达 40cm 深度以下的入渗过程滞后于湿润至 20cm 深度长达 23h。当平均降水强度为 1.5mm/h,连续降水 26h,累积降水量为 38.9mm 时(图 3),降水末水分渗透至 60cm。当平均降水强度为 0.49mm/h,连续降水 83h,累积降水量为 40.7mm 时(图 4),降水末水分入渗深度 <40cm。由土壤水分逐时变化过程(图 5,图 6)可以看出,降水强度较大时,土壤水分补给类似于点源入渗,有利于水分向深层渗透,有效补充土壤水分。

浅层土壤剖面初始含水率较低时,降水入渗深度大于初始含水率高的情况(表 2)。另一方面,当降水来临时,局地空气温度、湿度等气象条件适宜,土壤剖面水分状况良好,初始含水率较高时,柠条生长旺盛^[18],根系吸水作用强烈,致使根系密集层内降水入渗累积量甚微,TDR 连续实测深层土壤含水率波动反映了荒漠植被日蒸散耗水节律。

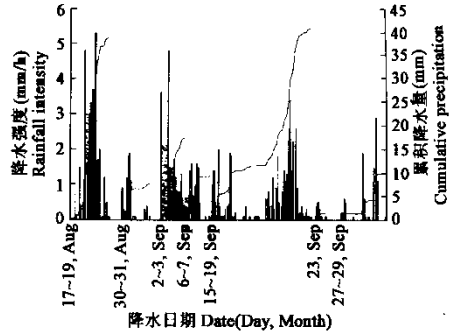


图 2 试验期间 7 次降水过程中降水强度与累积降水量
Fig. 2 The rainfall intensity and cumulative precipitation of the individual rainfall events (17 Aug. ~ 29 Sep., 2001)

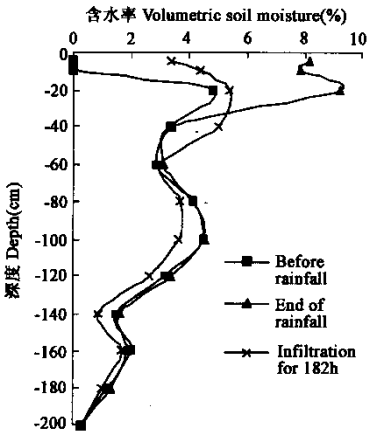


图 3 降水强度为 1.50mm/h ($P=38.9\text{mm}$)时土壤剖面湿润锋迁移过程
Fig. 3 The wetting front advances under rainfall intensity of 1.50mm/h ($P=38.9\text{mm}$)

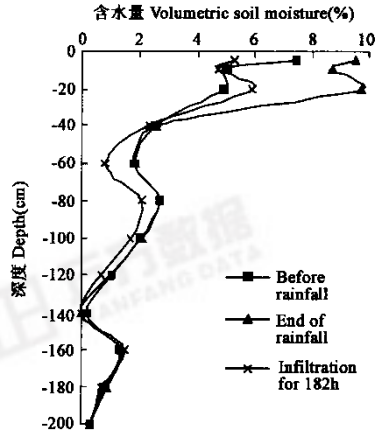


图 4 降水强度为 0.49mm/h ($P=40.7\text{mm}$)时土壤剖面湿润锋迁移过程
Fig. 4 The wetting front advances under rainfall intensity of 0.49mm/h ($P=40.7\text{mm}$)

2.3 植被区沙丘入渗率与降水强度的关系

自然降水条件下的土壤水分入渗过程受降水强度与土壤剖面初始水分状况控制。在本试验观测的 7 次降水过程(图 2)中,选择降水量分别为 $P=38.9\text{mm}$ 与 $P=40.7\text{mm}$ 的两次降水过程来分析在各自所对应的不同土壤初始含水率情况下的入渗过程。

沙坡头降雨数据 降水强度与土壤入渗速率之间存在线性相关关系(图 7),用公式表示为:

$$I_i = 1.1006(R_i - 0.4562)$$

式中, R_i 为降水强度(mm/h), I_i 为沙土入渗速率(cm/h), 相关系数 r 为 0.9789。方差分析结果 ($F=160.34 \gg F_{0.01}(1, 7) = 12.2$) 表明, 该线性方程回归是显著的。由(1)式可知, 当次降水过程中降水强度小于 0.46mm/h 时, 人工防风固沙植被区的土壤入渗速率约为 0 cm/h, 认为此时的降水对土壤基本上没有有效水分补给作用。因此, 本地区有效降水的概念不仅以次降水总量来定义, 还应考虑降水强度。根据已有研究结果, 对于沙丘土壤水分补给而言, 本区次降水量 $>8\text{mm}^{[2]}$, 降水强度 $>0.46\text{mm/h}$ 的降水属于有效降水。

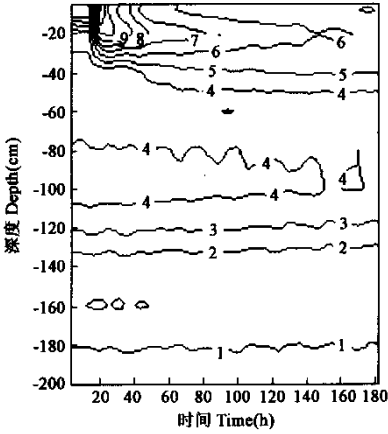


图 5 降水强度为 1.50mm/h ($P=38.9\text{mm}$) 时入渗 182h 的土壤湿度等值线

Fig. 5 Soil moisture contour under rainfall intensity of 1.50mm/h ($P=38.9\text{mm}$)

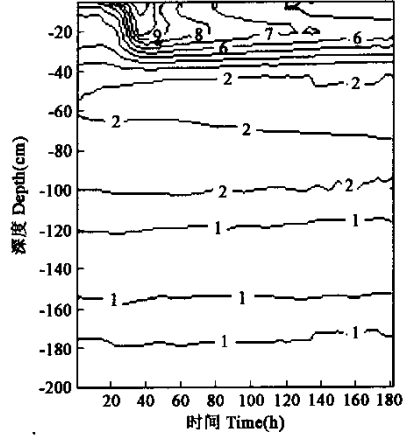


图 6 降水强度为 0.49mm/h ($P=40.7\text{mm}$) 时入渗 182h 的土壤湿度等值线

Fig. 6 Soil moisture contour under rainfall intensity of 0.49mm/h ($P=40.7\text{mm}$)

表 1 入渗速率 (I_i) 与降水强度 (R_i)、累积降水量 (P) 之间的关系

Table 1 The relationship between rainfall intensity (R_i), cumulative precipitation (P) and infiltration rate (I_i), cumulative magnitude of infiltration in an area of revegetated xerophytic shrub in Shapotou

降水历时 Rainfall duration (h)	累积降水量 P Cumulative precipitation (mm)	降水强度 R_i Rainfall intensity (mm/h)	入渗深度 Infiltrate depth (cm)	入渗时间 Infiltrate time (h)	入渗速率 I_i Infiltration rate (cm/h)
12	10.6	0.88	5	12	0.42
14	14.7	1.05	10	14	0.71
17	25.0	1.47	20	17	1.18
26	38.9	1.50	40	38	1.05

2.4 人工植被区次降水过程中水量平衡计算

在水量平衡计算中, 根据 TDR 传感器位置, 假定对应于每一深度处 TDR 测试探头所测得土壤体积分水率值代表 5~20cm 垂直深度土壤水分平均值(表 2)。根据水量平衡原理, 累积入渗量 I 为:

$$I = (\theta_e - \theta_i)Z_f \tag{2}$$

其中, θ_e 为末期体积分水率 (cm^3/cm^3), θ_i 为初始体积分水率 (cm^3/cm^3), Z_f 为入渗深度(cm), I 为累积入渗量 (mm)。在不同降水时段内及经过不同入渗历时以后, 土壤表层至 40cm 范围内水分补给增量、蒸散量计算结果见表 2。

用于水量平衡计算的两次降水过程降水总量相当, 由于平均降水强度相差近 3 倍, 致使每次降水结束时的入渗补给量相差近一半, 而入渗补给一段时间(187h)后, 入渗补给量差值增至 3 倍多。比较而言, 高降

水强度有助于提高土壤水分入渗补给量。8月17~19日降水强度为1.50mm/h,入渗补给量占降水量的31.4%,且入渗深度较大(>60cm)。当平均降水强度仅为0.46mm/h时(9月15~19日),90.5%的降水将在短期内通过蒸散很快损失掉。因此,人工植被建立以后,降水入渗的浅层化不仅与稳定沙层地表结构有关^[19],还与降水强度、降水历时等因素密切相关。人工植被区荒漠灌木冠层对降水的截留量、冠层蒸发量与次降水过程的关系值得今后深入研究。

2.5 根系密集层土壤水分昼夜波动过程

图8表示在2001-08-14~09-09每天的8:00,20:00所测定根系密集层(140cm,160cm)土壤水分昼夜变化过程。

其根系密集层土壤含水率在总体上下降的过程中,表现出昼消夜长的趋势,翌日8:00土壤含水率值略高于前一日20:00水分值0.1%~0.3%(vol.)。由于植物根系分布引起土体内水分消耗的非均一性,远离根际区土壤水分在根系密集区土壤水势梯度^[20]的作用下,向根际区汇集,当夜间植物无蒸腾耗水时,出现短期土壤水分高值。但是,当较长时间内无降水补给时,植被区土壤水分逐渐减少。

表2 人工植被区次降水过程中土壤水量平衡计算

Table 2 Water balance calculation during different individual rainfall events in a revegetated sand dune

探头深度 ^① (cm)	计算深度(入 渗范围) ^② (cm)	时段 $T^{\text{③}}$ (h)	θ_i (cm^3/cm^3)	θ_e (cm^3/cm^3)	$P^{\text{③}}$ (mm)	I (mm)	ΔS (mm)	ET (mm)	ET/P (%)
5	5(0~5)	26	0	0.101	38.9	5.05	23.55	15.35	39.5
10	10(5~15)		0	0.098		9.80			
20	15(15~30)		0.047	0.105		8.70			
40	20(30~50)		0.034	0.034		0.00			
5	5(0~5)	187	0	0.051	38.9	2.55	12.2	26.7	68.6
10	10(5~15)		0	0.049		4.90			
20	15(15~30)		0.047	0.059		1.80			
40	15(30~45)		0.034	0.051		2.55			
60	20(45~65)		0.029	0.031		0.40			
5	5(0~5)	83	0.042	0.095	40.7	2.65	13.7	27.0	66.3
10	10(5~15)		0.041	0.087		4.60			
20	15(15~30)		0.051	0.097		6.90			
40	15(30~45)		0.029	0.026		-0.45			
5	5(0~5)	187	0.042	0.058	40.7	0.80	3.85	36.85	90.5
10	10(5~15)		0.041	0.055		1.40			
20	15(15~30)		0.051	0.068		2.55			
40	15(30~45)		0.029	0.023		-0.90			

①TDR probe position; ②Calculation depth(infiltration range); ③ $P=38.9\text{mm}$ for a rainfall duration of 26h(Aug 17, 16:00~Aug. 18, 18:00); $P=40.7\text{mm}$ for a rainfall duration of 83h(Sep. 15, 19:00~Sep. 19, 6:00); ΔS 土壤水分增量 Soil moisture increase; θ_i 初始含水率 Initial volumetric soil moisture; θ_e 末期含水率 End volumetric soil moisture; I 累积入渗量 Cumulative infiltration; ET 植被区蒸散量 Evapotranspiration

3 结论

3.1 沙坡头雨季次降水过程中降水具有明显的间歇性,间歇性降水与瞬时土壤表面高蒸发相互影响,导致雨季(生长季)沙丘土壤浅层处于频繁的干湿交替状态,由于局部土壤水分势能梯度差改变,使得降水条件下的沙地水分数据过程相对复杂。

3.2 土壤剖面初始含水率对降水入渗深度及累积入渗量影响较大,累积入渗量与入渗深度均随土壤初始

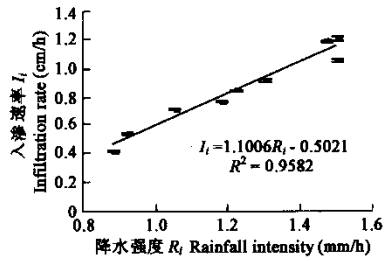


图7 人工植被固定沙丘区降水强度与土壤入渗速率关系

Fig. 7 The relationship between rainfall intensity and infiltration rate in a revegetated sand dune, Shapotou

含水率的增高而递减。

3.3 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,即每单位降水强度(mm/h)对应单位入渗速率(cm/h)。实测结果显示沙地水分入渗速率高于同期降水强度达一个数量级(10)。

3.4 植被区次降水过程中的水量平衡表明,蒸散量将占总降水量的 68.6%~90%左右。本次试验观测的降水入渗达到深度 60cm 时,土壤储存水量明显增多。然而,次降水后一周无雨期(约 187h)(图 5,图 6),土壤剖面植物根系密集层储存水分随降水特性产生较大变异,分别约占总降水量的 9.46%~31.4%。

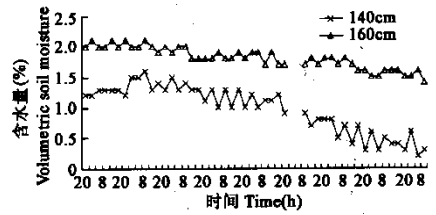


图 8 柠条根系密集层(140cm, 160cm)土壤水分昼夜波动(Aug. 14~Sep. 9, 2001)

Fig. 8 The soil moisture variation at the root zone (140cm, 160cm) of *Caragana korshinskii* at 8:00 and 20:00(Aug. 14~Sep. 9, 2001)

References:

- [1] Tate III R L. The challenge of modeling soil water. *Soil Sci.*, 1997, **162**(8):533.
- [2] Chen W R. Water balance in the revegetated area along the railway in Shapotou area. In: Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences. ed. *Study on shifting sand control in Shapotou region of the Tengger Desert* (2). Yinchuan: Ningxia People's Publ. House, 1991. 66~75.
- [3] Zhao X L. Problems of revegetation on sand dunes in Shapotou area. In: Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences, ed. *Study on shifting sand control in Shapotou region of the Tengger Desert* (2). Yinchuan: Ningxia People's Publ. House, 1991. 27~57.
- [4] Cheng J A. Studies on the characteristics of sweat in the sand-dunes of desert areas, central Kansu. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, **11**(1):84~91.
- [5] Chen H S, Kang Y H, Feng J C. Preliminary study on the plant growth and water balance in Shapotou area, Tengger Desert. *J. Desert Res.*, 1991, **11**(2):1~10.
- [6] Yang S X, Lei Z D, Liu Y B, et al. Analysis of moisture dynamic of precipitation infiltrated into bare sandy land. In: Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences. ed. *Study of Desert Ecosystem* (No. 1). Lanzhou: Gansu Publ. House of Science and Technology, 1995. 62~68.
- [7] Reeve R C. Water potential; Piezometer. In: Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis*, part 1. 2nd ed. *Agron. Monogr.* 9. Madison, WI: ASA and SSSA, 1986. 545~561.
- [8] Topp G C, Davis J L. Detecting infiltration of water through soil cracks by time-domain reflectometry. *Geoderma*, 1981, **26**:12~23.
- [9] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, **46**:672~678.
- [10] Topp G C, Davis J L, Chinnick J H. Using TDR water content measurements for infiltration studies. In: *Advances in infiltration*. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration. December 12~13, 1983, Chicago, IL. St. Joseph, MI: ASAE Publication 11~83. Am. Soc. Agric. Eng., 1983. 231~240.
- [11] Timlin D, Pachepsky Y. Infiltration measurement using a vertical time-domain reflectometry probe and a reflection simulation model. *Soil Sci.*, 2002, **167**:1~8.
- [12] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry. *Soil Sci.*, 1996, **161**(8):480~483.
- [13] Parkin G W, Kachanoski R G, Elsieck D E, et al. Unsaturated hydraulic conductivity measured by time domain reflectometry under a rainfall simulator. *Water Resour. Res.*, 1995, **31**:447~454.
- [14] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate and vegetation. *Proc.: Math., Phys. Eng. Sci. (The R. Soc.), London, Ser. A.*, 1999, **455**:3789~3805.

- [15] Mastrorilli M, Katerji N, Rana G, *et al.* Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **90**:81~89.
- [16] Wang X P, Zhang J G, Li X R, *et al.* Distribution, trends and variability in precipitation in Shapotou region. *J. Desert Res.*, 2001, **21**(3):260~264.
- [17] Gash J H C, Wallace J S, Lloyd C R, *et al.* Measurements of evaporation from fallow Sahelian savannah at the start of the dry season. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1991, **117**:749~760.
- [18] Zhang L P, Wang X P, Liu L C, *et al.* Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. koshinskii* in Shapotou region. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2):133~137.
- [19] Li X R, Wang X P, Li T, *et al.* Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, north China. *Biol. Fertil. Soils*, 2002, **35**(3):147~154.
- [20] Bresler E, Kemper W D, Hanks R J. Infiltration, redistribution and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 1969, **33**:832~840.

参考文献:

- [2] 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧 29 年人工植被区的水量平衡. 见:中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社, 1991. 66~75.
- [3] 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨. 见:中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社, 1991. 27~57.
- [4] 郑若藹. 沙地凝结水特征. *土壤学报*, 1963, **11**(1):84~91.
- [5] 陈荷生, 康跃虎, 冯今朝. 腾格里沙漠沙坡头地区植物生长与水分平衡的初步研究. *中国沙漠*, 1991, **11**(2):1~10.
- [6] 杨诗秀, 雷志栋, 刘元波, 等. 裸沙地降雨入渗水分动态分析. 见:中国科学院沙坡头沙漠试验研究站编. 沙漠生态系统研究(No. 1). 兰州:甘肃科学技术出版社, 1995. 62~68.
- [16] 王新平, 张景光, 李新荣, 等. 沙坡头地区多年降水分布特征、趋势及其变率. *中国沙漠*, 2001, **21**(3):260~264.
- [18] 张利平, 王新平, 刘立超, 等. 沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换. *生态学报*, 1998, **18**(2):133~137.