

# 毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对 不同降雨格局的响应

洪光宇<sup>1,2</sup>, 王晓江<sup>2</sup>, 刘果厚<sup>1</sup>, 高孝威<sup>2</sup>,  
张雷<sup>2</sup>, 李卓凡<sup>2</sup>, 李梓豪<sup>2</sup>, 海龙<sup>2</sup>, 郝雯<sup>2</sup>

(1.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2.内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** [目的] 研究不同降雨格局下, 土壤水分的动态变化特征, 对判断群落结构的稳定性和为群落结构进行优化调控提供理论依据。[方法] 选择毛乌素沙地典型飞播杨柴灌木林地不同深度土壤为研究对象, 使用 Watchdog 自动水分监测系统连续监测不同深度土壤水分含量动态变化, 研究不同降雨事件下 10, 30, 50, 70, 90 和 110 cm 土层水分的时空变化, 分析土壤水分入渗、再分配及水分补给特征。[结果] ①杨柴群落 0—110 cm 深度土壤水分含量变化受降雨的影响具有明显的垂直特征, 10 cm 深度土层为变化剧烈层, 30 cm 深度土层为弱变化层, 50 cm 以下深度土层为稳定层。②10 cm 深度土壤水分对降雨和温度的响应明显, 降雨强度和土壤初始含水量对浅层土壤的补给影响较大同时对入渗的深度有一定影响。30 cm 以下土层随着深度的增加对降雨的响应滞后, 30—50 cm 土层主要受初始含水量和降雨量影响较大, 50 cm 以下深度水分变化主要受降雨量的影响。③>8.8 mm 的降雨对 10 cm 及以下土层具有补给作用, >40 mm 的降雨量可通过降水再分配至少达到 110 cm 深度土层。[结论] 杨柴群落根系主要分布在 0—40 cm 深度处, >8.8 mm 降雨可供杨柴群落有效利用, >40 mm 的降雨量可有效对地下水进行补给, 有利于群落结构的稳定性和应对下一年度植被生长初期需水时降雨量较小的干旱月份。

**关键词:** 毛乌素沙地; 土壤水分; 降雨入渗; 杨柴

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0076-08

**中图分类号:** S152.7, X171.1

**文献参数:** 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 等. 毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 76-83. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210413.001; Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Guohou, et al. Response of soil moisture to different rainfall patterns in *Hedysarum leave* in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 76-83.

## Response of Soil Moisture to Different Rainfall Patterns in *Hedysarum Leave* in Mu Us Sandy Land

Hong Guangyu<sup>1,2</sup>, Wang Xiaojiang<sup>2</sup>, Liu Guohou<sup>1</sup>,

Gao Xiaowei<sup>2</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>, Li Zhuofan<sup>2</sup>, Li Zihao<sup>2</sup>, Hai Long<sup>2</sup>, Xi Wen<sup>2</sup>

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. Inner Mongolia Forestry Research Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic change characteristics of soil water under different rainfall patterns were studied, in order to provide theoretical basis for judging the stability of community structure and optimizing the community structure. [Methods] Taking the soil of different depths in typical aerial seeding *Hedysarum leave* shrub land in Mu Us sandy land as the research object, The watchdog automatic water monitoring system was used to monitor the dynamic change of soil moisture content in different depths continuously. The temporal and spatial changes of soil moisture in 10, 30, 50, 70, 90 and 110 cm soil layers under different rainfall events were studied, and the characteristics of soil moisture infiltration, redistribution and water supply were

收稿日期: 2020-09-22

修回日期: 2020-12-01

资助项目: 内蒙古重大专项“沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范”(2019ZD007); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03036; 2018MS03036); 国家自然科学基金项目(31960284; 41867043)

第一作者: 洪光宇(1985—), 女(锡伯族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事沙地水资源管理与应用方面的工作。Email: nmghgy@163.com。

通讯作者: 刘果厚(1956—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 教授, 主要从事植物分类学及生物多样性保护与利用方面的研究。Email: guohouliu@163.com。

analyzed. [Results] ① The change of soil moisture content in 0—110 cm depth of *Hedysarum leave* community was affected by rainfall, and had obvious vertical characteristics. The soil water content in 10 cm depth was changed greatly, that in 30 cm depth was changed weakly, and that in 50 cm depth was stable. ② The soil moisture at the depth of 10 cm showed an obvious response to rainfall and temperature. The rainfall intensity and initial water content showed a greater impact on the recharge of shallow soil and a certain impact on the infiltration depth. The response of the soil layer below 30 cm to rainfall lagged behind with the increase of depth. The soil layer between 30 to 50 cm was mainly affected by initial water content and rainfall, while the change of water content below 50 cm was mainly affected by rainfall. ③ The rainfall of  $> 8.8$  mm had replenishment effect on the soil layer of 10 cm and below, and the rainfall  $> 40$  mm could reach at least 110 cm soil depth through precipitation redistribution. [Conclusion] The root system of *Hedysarum leave* community is mainly distributed at 0—40 cm soil layer. The rainfall of  $> 8.8$  mm can be effectively used by poplar and firewood community. The rainfall of  $> 40$  mm can recharge groundwater effectively, which is conducive to the stability of community structure and coping with the dry months with less rainfall in the early stage of vegetation growth in the next year.

**Keywords:** Mu Us sandy land; soil moisture; rainfall infiltration; *Hedysarum leave*

水分是干旱、半干旱区植被建设中重要的生态限制因素,在我国该区水分资源匮乏,并且土壤的保水性较差、损失较大、有效利用性较低<sup>[1]</sup>。降水是干旱、半干旱区生态系统主要的水分来源。在干旱半干旱区水分主要以土壤水的形式存在供植物利用,土壤水是地表水—地下水—大气水三者间相互转化的桥梁。土壤水作为水循环中的重要部分,不仅影响着地上植物的生长,而且与其种类和分布有着密切的关系,它是导致多数生态环境问题的主因<sup>[2-5]</sup>降雨格局的变化直接影响土壤水分含量的变化,进而影响生态系统稳定性与生产力状况<sup>[6]</sup>。降雨量、降雨强度和降雨频度对土壤水分入渗的深度和土壤水分的增加具有决定的意义<sup>[7]</sup>。在干旱、半干旱区降雨少,并且主要以小降雨事件为主,然而小降雨只能对土壤浅层水分进行补给,由于空气温度高和相对湿度小的环境原因,表层土壤水分蒸发流失严重,因此可供植物直接利用的水分较少。大降雨事件在干旱、半干旱区出现的频率较低,但大降雨事件能够使水分入渗到较深层次的土壤并且显著增加土壤中水分的含量供植物直接利用,甚至对于地下水进行补给<sup>[8]</sup>。土壤水分的变化决定着植物的生长,群落结构的稳定性和可持续性<sup>[9-10]</sup>。因此研究干旱区人工林土壤水分对不同降雨格局的响应,有助于解决在不同气候变化中植被结构的优化调控。

毛乌素沙地作为我国四大沙地之一,生态环境较为脆弱,是荒漠化等生态灾害较容易产生的地区之一。在该地区,杨柴(*Hedysarum leave*)以其耗水量小、耐干旱、更新和自然修复能力强的特点成为该区重要的造林树种被广泛应用。近年来,围绕杨柴与土

壤水分的关系进行了较多的研究,学者从杨柴根系分布特征与土壤水分的变化<sup>[11-12]</sup>、土壤水分对杨柴光合作用的影响<sup>[13]</sup>、杨柴灌丛群落土壤蒸发与气象因子的关系<sup>[14]</sup>、杨柴茎流速率动态研究等<sup>[12]</sup>方面阐明了杨柴灌丛的需水与耗水特征。论证了不同环境下,杨柴群落自身生理生化变化对环境变化的响应规律及应对极端天气的生长策略。然而,在干旱半干旱区,作为植被生长主要限制因子的降雨格局的变化对杨柴群落的影响研究较少。不同降雨量、降雨强度和降雨间隔对不同深度土壤水分的影响不同,找到不同降雨格局对杨柴群落的水分补给规律可以更好地预测群落土壤水分的承载力。为此,本研究选取飞播杨柴群落土壤水分作为研究对象,通过连续观测 2 a 不同降雨格局土壤水分的变化情况,探究土壤水分的时空变化特征对不同降雨格局的响应,有助于解析气候变化对干旱半干旱区杨柴群落的影响和对杨柴群落结构进行优化调控提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验区自然概况

毛乌素沙地位于北纬  $37^{\circ}27.5'$ — $39^{\circ}22.5'$ ,东经  $107^{\circ}20'$ — $111^{\circ}30'$ ,海拔 1 200~1 600 m,包括内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部、陕西省榆林市的北部风沙区以及宁夏回族自治区盐池县东北部,本研究主要在毛乌素沙地腹地鄂尔多斯市乌审旗乌兰陶勒盖治沙站内进行设样。该地区属于温带半干旱大陆性季风气候,年均温  $6.0\sim 8.5$  °C,年均降水量 270~350 mm,年均蒸发量 1 800~2 500 mm。土壤类型为典型风沙土,易受风沙的强烈侵蚀而形成粗结构。地貌类型包括固定、半固定、半流动、流动沙丘以及丘间地。该

地区植被覆盖度低,种类较少,主要以旱柳(*Salix matsudana*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、北沙柳(*Salix psammophila*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等沙旱生植物为主<sup>[15]</sup>。

### 1.2 样地选择与仪器安装

对乌兰陶勒盖治沙站内不同飞播年限杨柴灌木林进行植被调查(表 1)。由表 1 可以看出,2002 年飞播杨柴灌木林分结构均一,物种多样性高,因此选取 2002 年飞播杨柴灌木林作为典型样地,在迎风坡坡上位置安装一台美国 Spectrum 公司生产的 WatchDog 2800 型土壤水分自动监测系统,每套系统有 6 个土壤水分传感器,传感器监测的数值为放置传感器位置上下 5 mm 处土壤含水量的平均值,传感器分别放置

在 10,30,50,70,90 和 110 cm 处土层。仪器在 2017 年开始安放,土壤水分监测的时间间隔为 1 h,在安装水分测定仪时考虑土壤结构的原始与稳定性,采取侧挖土壤剖面安装后进行埋设。为了减少安放仪器时土壤扰动对测量准确度的影响,选取 2018 年杨柴生长旺季 7—10 月的监测数据进行分析。同时在试验区内安装口径为 10 cm 观测井一眼,采用自计式地下水水位计,观测该时间段内地下水位随着降雨出现剧烈变化,地下水位变化范围在 120.00~250.00 cm。在样地内同步布置 Hobo U30 小型气象站,对其空气温度、风速、风向、降雨量、光合有效辐射、大气湿度、光合有效辐射、地表温度、地下 20 cm 土壤温度、地下 40 cm 土壤温度、地表湿度进行收集,每 1 h 记录 1 次数据,并进行存储。

表 1 样地基本信息

飞播年限	群落灌木种及其重要值		草本主要物种及其生物多样性				
	杨柴	油蒿	主要物种	盖度/ %	高度/ cm	Simpson 指数 <i>D</i>	Shannon 指数 <i>H</i>
2002 年	0.997	0.003	雾冰藜( <i>Bassia dasyphylla</i> )、 虫实( <i>Corispermum hyssopifolium</i> )、 地稍瓜( <i>Cynanchum thesiodes</i> )	50	18	0.49	0.77

### 1.3 计算方法

1.3.1 土壤水分变化 土壤含水量在降雨过程中和降雨结束后每 1 h 含量的变化,来分析土壤水分对降雨格局的响应,土壤水分的变化( $\Delta\theta$ )计算方法为:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{后}} - \theta_{\text{前}} \quad (1)$$

式中: $\theta_{\text{后}}$ 为降雨过程中某一层土壤水分含量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )出现变化后的值; $\theta_{\text{前}}$ 为降雨过程中某一层土壤水分含量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )出现变化前的值。

1.3.2 土壤水分空间变异性 使用均值、标准差和变异系数来分析土壤含水量在降雨开始到降雨结束后和降雨结束后到土壤水分含量趋于稳定时间段内不同土层水分含量的变异性<sup>[16]</sup>:

$$C_{vi} = \sigma_i / \alpha_i \times 100\% \quad (2)$$

式中: $C_{vi}$ 为第  $i$  层的变异系数; $\sigma_i$ 为第  $i$  层的标准差; $\alpha_i$ 为第  $i$  层的均值。当  $C_{vi} \leq 10$  时,为稳定层;当  $10 < C_{vi} \leq 30$  时,为弱变化层;当  $C_{vi} \geq 30$  时,为变化剧烈层。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2006 对降雨过程中土壤水分含量变化及雨后土壤水分再分配过程进行描绘。采用 SPSS 16.0 软件进行变异系数分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区降水特征

乌审旗属于毛乌素沙地中部,根据研究者对毛乌

素沙地乌审旗区域降水特征和未来的可能的变化趋势分析<sup>[17-18]</sup>,该地区年平均降水量在 340 mm 左右,最大年降水量和最小年降水量分别为 706.1 和 173.03 mm。2018 年毛乌素沙地降雨量为 549.6 mm,可看出 2018 年属于典型的丰水年。2018 年 7 月 1 日至 2018 年 10 月 30 日间,降水量和降水强度分布状况如图 1 所示。以无雨期间隔 3 h 为 1 次降水事件<sup>[19]</sup>整个观测期内共发生 46 次降水事件,降雨量为 396.19 mm,占全年总降雨量的 72.09%。

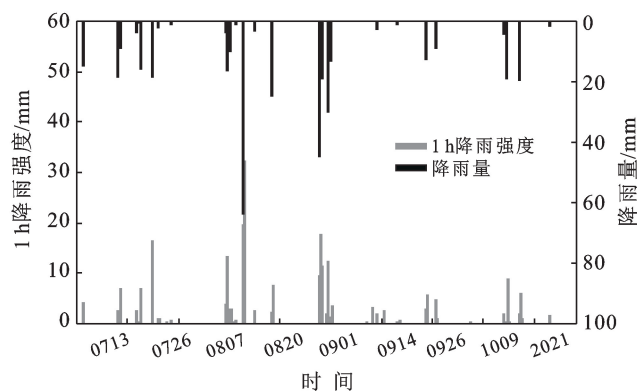


图 1 研究区 2018 年降水强度和降水量分布

观测期内  $>8.8$  mm 降雨事件共发生了 17 次,剩下的 29 次降水事件降雨量在 0.20~8.8 mm 之间。根据我国气象部门采用的降雨强度标准对毛乌素沙

地降雨强度等级划分,统计表明,调查期内经历了 20 次小雨(0.20~8.84 mm),12 次中雨(11.38~24.79 mm),2 次大雨(31.75 mm,44.60 mm),1 次暴雨(63.60 mm)。暴雨和大雨出现在 8 月,除了单次降雨/h 量较大外,还出现持续降雨情况。对降雨强度分析得出,<2 mm/h 占观测期内降雨事件的 63.0%,2~4 mm/h 占 21.4%,4~10 mm/h 占 10.4%,>10 mm/h 占 5.2%。说明研究区主要以<8 mm 降雨事件为主,降雨强度主要在 4 mm/h 以下。

本文选取发生在 7—10 月间的 4 次不同降雨事件,分析不同降雨量和不同降雨强度下杨柴灌丛土壤

水分对降雨事件的响应。所研究的 4 次降雨统计事件特征详见表 2。

## 2.2 土壤水分补给变化特征

图 2 为 4 次降水事件中不同层次土壤入渗湿润锋随时间的变化过程。判断湿润锋到达的时刻标准为下一时刻体积含水量比上一时刻高  $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  以上。为比较 4 次降水事件中水分的变化过程,4 次降水事件中测定土壤水分变化的时间设置是一致的。由于水分探头每 1 h 采集 1 次数据,因此无法准确确定各层次土壤水分瞬时增加的时间,仅能确定土壤水分变化的大致时间(误差小于 1 h)。

表 2 不同降雨事件特征

日期	总降水量/ mm	持续时间/ h	24 h 降 强度划分	降雨强度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )			降雨强度比例/%		
				最大	最小	平均	<2 mm	2~4 mm	>4 mm
0710	18.39	8.0	中雨	2.59	0.41	1.53	69.2	30.8	—
0810	63.60	4.5	暴雨	29.82	0.20	7.95	62.5	—	37.5
0829	44.60	3.0	大雨	20.19	0.61	9.91	20.0	—	80.0
0927	8.83	3.5	小雨	5.01	0.20	1.77	60.0	20.0	20.0

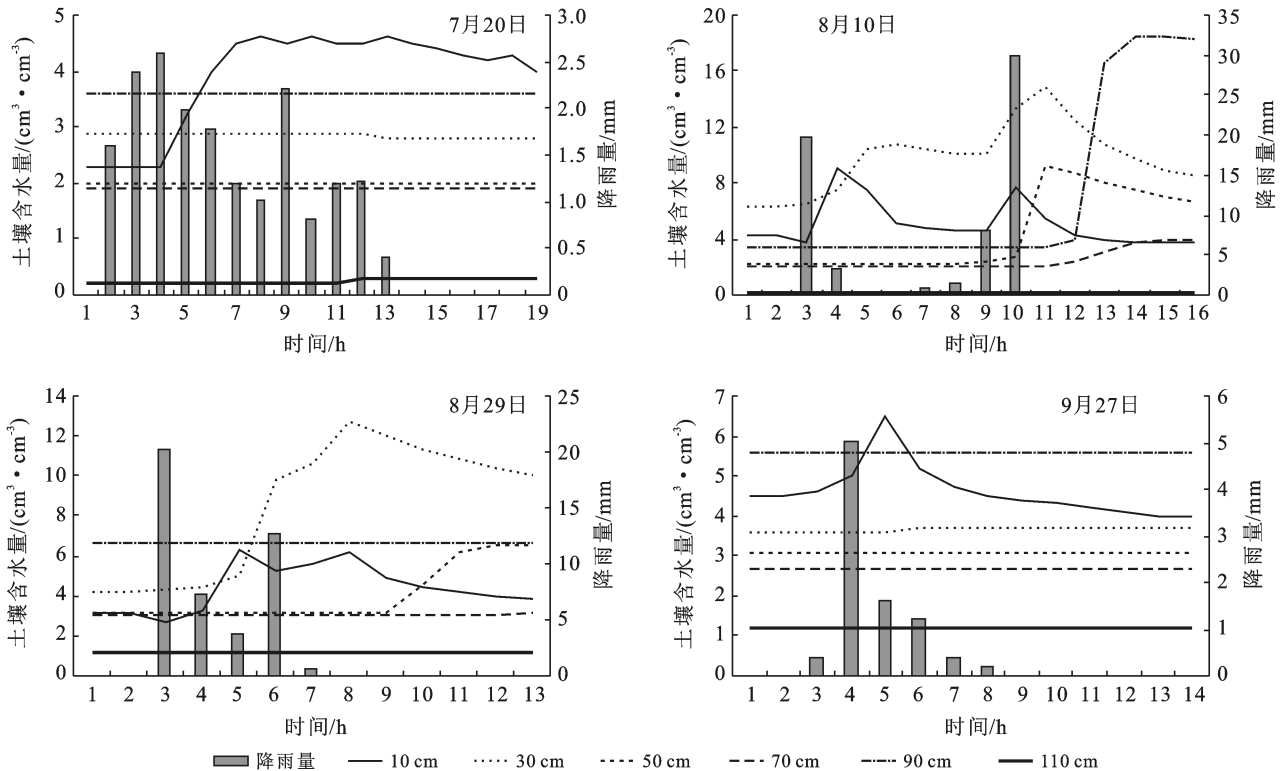


图 2 不同降水事件中土壤湿润锋运移过程

由图 2 可以看出,当在 7 月 10 日降雨累计量达到 8.56 mm 时,降雨时长 5 h 时,平均雨强为 2.1 mm/h 时,10 cm 层土壤含水量从  $2.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  增加到  $3.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,随着降雨的增加,土壤含水量逐渐增

大,当瞬时雨强大于  $5.0 \text{ mm/h}$  时,土壤水分含量出现短暂的增加,随着降雨强度的减小,水分含量逐渐降低,降雨过程中湿润锋没有运移到 30 cm 以下土层;8 月 10 日降雨量达到为 19.8 mm,降雨时长 1 h



时,雨强为 19.8 mm/h 时,10 cm 和 30 cm 土层水分从 3.8,4.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 迅速增加到 9.1,7.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,在饱和入渗大于降雨强度时,10 cm 层水分含量逐渐下降到 4.7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 时保持不变。30 cm 土层水分含量随着降雨进行持续增大,降雨结束后水分含量为 13.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,该土层水分含量也受降雨强度的影响,降雨强度越大增量越大,但滞后降雨强度 1 h 左右。50 cm 土层水分含量在降雨第 6 小时,降雨量为 25.76 mm 时土壤水分含量开始缓慢增加,结束时水分含量从 2.2 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 增加到 2.7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。湿润锋没有运移到 70 cm 以下土层;8 月 29 日降雨累计 27.4 mm 时,降雨时长 2 h,平均降雨强度 13.7 mm/h 时,10 cm 土层水分含量到达了第一个湿润锋,水分含量从 2.7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 增加到 3.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,因为 10 cm 土层水分初始含量较低,因此降雨量累计 31.19 mm 时,湿润锋运移到 30 cm 土层,水分含量从 4.2 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 增加到 5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,当降雨累计 44 mm,降雨强度 11 mm/h 时,30 cm 土层水分增量达 4.8 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。随着降雨进行 10 cm 和 30 cm 土层水分含量随着降雨量增加持续大。降水结束时,湿润锋未运移到 50 cm 以下土层;在 9 月 27 日降雨开始后 10 cm 土层

水分含量逐渐增加,3 h 时湿润锋运移到 10 cm 土层,水分含量从 4.6 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> 增加到 6.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,之后随着降雨增加,降 10 cm 土层水分含量呈减小趋势,这与该时间段内降雨强度小于入渗强度有关。30 cm 土层水分在降雨结束时有少量增加。降雨强度和初始含水量共同对 10 cm 土层水分含量变化影响较大,30 cm 土层次之,在降雨强度为 19.8 mm/h 和 20.2 mm/h 时,10 cm 土层水分含量呈跳跃式增加,土壤水分含量分别从 3.8,2.7% 增加到 9.1,6.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,增长率分别为 139.5,133.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。随着深度的增加土壤水分含量变化主要是降雨量起主要作用。

由表 3 可以看出,不同降雨格局过程中土壤体积含水量变异程度不同。除了 8.83 mm 的降雨格局下 10 cm 深度土壤水分变化为弱变化层外,其他降雨过程中 10 cm 深度土壤水分为变化剧烈层,对降雨响应敏感。除了 44.6 mm 降雨过程中 30 cm 深度土壤水分变异性大于 10 cm 深度土壤水分,其他降雨过程中随着土层深度的增加,变异系数逐渐减小。在小于 18.39 mm 的降雨事件下 30 cm 深度土壤水分变化为稳定层。小于 63.6 mm 的降雨下 50 cm 深度土壤水分变化为稳定层。

表 3 不同降雨事件各土层土壤水分变异情况

降雨量/ mm	平均降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	土层 深度/cm	平均增量/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	最小增量/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	最大增量/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	平均值/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	标准差	变异系数/ %
18.4	1.5	10	2.03	0.9	2.3	3.7	1.43	39
		30	0.10	0.1	0.1	2.9	0.03	1
		10	2.40	0.9	5.3	5.9	1.89	32
63.6	7.9	30	3.89	1.0	6.8	9.9	2.08	21
		50	0.27	0.1	0.5	2.3	0.18	7
		10	2.62	0.6	3.6	4.6	1.54	33
44.6	9.0	30	4.20	0.1	8.4	6.8	3.11	45
		10	0.62	0.1	1.9	5.1	0.74	15
8.8	1.3	30	0.10	0.1	0.1	3.6	0.10	1

### 2.3 降水结束后再分配特征

当降雨结束后,水分在土壤中继续进行运动,进行着复杂的降水再分配过程。土壤水分含量受到蒸散发的影响逐渐减小,同时土层间水势差异水分继续向深层次运移<sup>[20]</sup>。由表 4 可以看出,降雨量为 18.4 和 8.8 mm 的雨后再分配入渗深度分别达到 10 和 50 和 18 mm 降雨后土壤水分再分配后没有入渗到更深层次的土壤是由于土壤初始含水量太低,降雨主要对 10 cm 深度土层进行了有效补给,已有研究得出,杨

柴的根系主要分布在 40 cm 以上<sup>[21]</sup>,因此当降雨量在 8~20 mm,降雨强度大于 1.3 mm/h 时,降雨再分配入渗的深度可以被杨柴群落利用,属于有效降雨。降雨量为 63.6 和 44.6 mm 的雨后再分配入渗深度都至少达到 110 cm 深度,说明大于 40 mm 的降雨在水分再分配后可以对地下水有一定的补给作用。降雨量影响降雨再分配的时间,降雨量越大降雨再分配过程中到达相同土层所需时间越短,降雨再分配过程结束时所需时间越长(图 3)。

表 4 降雨入渗特征

降雨量/ mm	降雨入渗 深度/cm	降雨再分配 入渗深度/cm	降雨再分配 结束时长/h	降雨再分配到达不同深度时间/h				
				30 cm	50 cm	70 cm	90 cm	110 cm
63.6	50	110	64	—	—	2	2	15
44.6	30	110	43	—	3	6	8	23
18.4	10	10	—	—	—	—	—	—
8.8	30	50	29	—	12	—	—	—

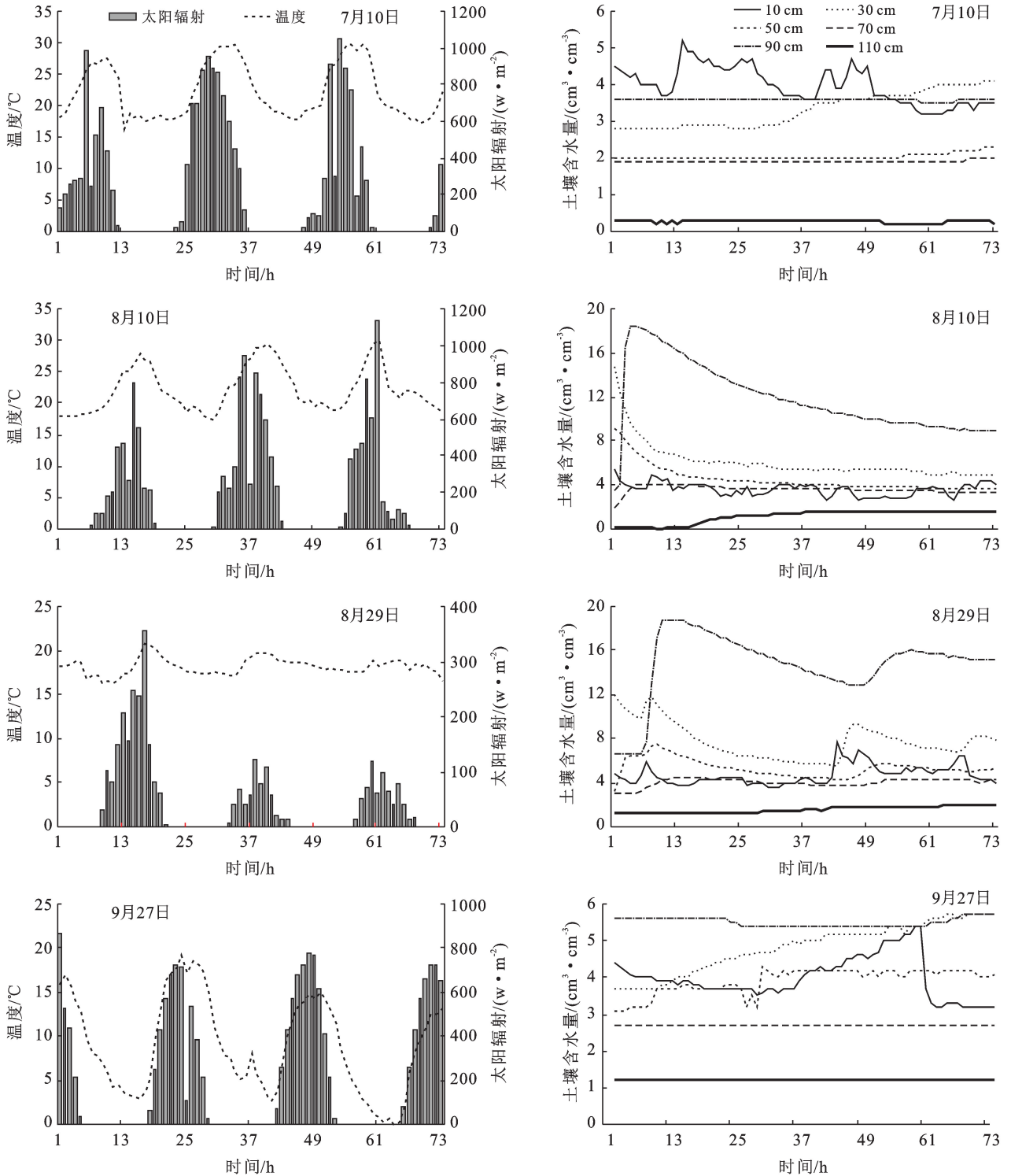


图 3 降雨结束后土壤湿润锋运移过程

从图 3 可以看出,不同降雨后各层次土壤水分含量的变化过程,当降雨结束后,10 cm 土层水分含量下降趋势明显,主要是用于土壤的蒸发。在温度较高,辐射较强的白天,降低的幅度大于夜晚,出现明显的日变化。随着降雨量增加,30,50 和 70 cm 土层水分增量变大,峰值也逐渐变大,随后水分含量逐渐降低,最后减小趋势变得平缓,说明 30—70 cm 土层水分含量受外界温度的影响较小。90 cm 深度土壤水分含量受到侧渗的影响水分含量增加剧烈,降雨量越大增量越大,达到最大值后水分含量逐渐下降。110 cm 土层水分含量逐渐增加,达到最大值后变化较小,该土层水分含量的增加与降雨量相关,降雨量越大增量越大,该层以下的水分主要是植物根系的提升,不会受到蒸发的损失。

### 3 讨论

降水是毛乌素沙地土壤水分补给的唯一来源<sup>[22]</sup>。不同降雨量、降雨强度以及土壤初始水分含量对土壤水分入渗、入渗后水分再分配过程以及水分运移规律具有显著的影响<sup>[23-30]</sup>。在本研究中,根据土层水分含量变化来判断降雨入渗深度进程的变化。杨柴群落 0—110 cm 深度土壤水分受降雨影响变化具有明显的垂直特征,因为沙地不同的植被土壤表层含水量随着时间和空间的变化具有差异性,数值呈正态分布<sup>[31]</sup>。在降雨后水分入渗的过程中,主要受重力等动力影响,由浅层次到深层次土壤的含水量以及土壤吸水能力变化差值是呈减小趋势<sup>[24,32-33]</sup>。10 cm 土层水分含量在整个监测期内波动最为频繁,受降水影响剧烈,同时也是受蒸发影响最明显的一层,每次波动达到峰值时的时间都与降雨时间相对应。这与对沙区水分变化研究中界定 0—20 cm 处是土壤水分变化最活跃的土层,被称为干沙层相对应。30—50 cm 土层水分含量变化活跃度小于 10 cm 土层,随着降雨量的增加,土壤水分含量呈现出先增大再减小,并向深层下渗,70 cm 土层水分含量变化趋于一个平稳入渗的过程,90 cm 土层水分含量在大于 44.6 mm 降雨事件下水分含量呈跳跃式增大,增量达到了  $10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  以上,这是由于在较大降雨情况下该土层更容易受到了径向流的补给。降雨再分配结束后 110 cm 土层土壤水分含量较低,尽管在单次降雨较大和持续降雨补给的情况下,土层水分含量总保持在一个较低的数值,这与有关研究结果一致<sup>[34]</sup>,因为雨后被植被覆盖的沙丘土壤含水量随着深度增加变化逐渐平缓,因为随着植被固沙后年限的增加,土壤浅层对降雨截留量加大,降水对地下水的补给作用并不大<sup>[35]</sup>。

降雨前,不同土层的土壤水分初始含量影响水分入渗时间与深度,在 18.38 mm 降水前有一段较长时间的无效降雨,缺乏水分的补给,土壤初始含水量较低,导致水分入渗相同深度所花时间较长并且入渗的深度小于 8.83 mm 降雨,但不同层次的增量大于 8.8 mm 降水后的土壤增量。因为土壤含水量在达到饱和状态时水分才开始向下入渗,只有降雨强度较大的降雨才能产生饱和入渗,所以降雨强度小于饱和入渗率时,降雨水分入渗过程属于非饱和入渗,降水先补给更浅层土壤水分,在逐渐向下入渗,下层的入渗就属于非饱和排水入渗,因此初始含水量使水分入渗深度受限。王博等的研究中比较了土壤初始含水量与降雨入渗的关系,发现初始含水量较低时湿润锋出现的时间和所需要的降雨量比初始含水量高时大<sup>[36]</sup>,因为上层的土壤湿润度越高,水分入渗的锋面与下层土层平均势的差值越大,从而产生大量的入渗量,使水分入渗能力加大<sup>[37]</sup>。

降雨强度同样影响着水分的入渗深度,18.39 mm 降雨过程中,10 cm 土层水分含量在累计降雨量 12.5 mm 时水分含量就达到了最大值  $4.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,虽然降雨持续进行但水分含量没有增加反而呈减小趋势。这是因为降雨强度小的时候,随着降水持续进行,土壤水分含量渐渐趋近饱和,当土壤含水量达到饱和后土壤水势梯度降低,可接纳水分的孔隙度减少,所以水分变化率降低。63 mm 降雨过程中出现了 19.8 mm/h 的高强度降雨,10 和 30 mm 土层水分含量在该强度降雨的作用下延后 1~2 h 出现跳跃式增加,随后降雨强度减小该土层水分含量逐渐降低,这是由于降雨强度较大并且高于饱和入渗率时,能瞬时达到饱和含水量,并且达到一个最大值,但在持续降雨中降雨强度减小并低于饱和入渗率时,含水量开始减小到饱和含水量大小。有研究<sup>[38]</sup>也表明,小于 20 cm 的土层含水量对降雨脉动响应强烈,雨强越大,降水可以在短时间内使土壤水分达到饱和状态,更有利于水分向深层次运移。

其他研究者发现降雨量、降雨次数、降雨强度影响土壤水分时间和空间的变化<sup>[39-40]</sup>。不同降雨事件下土壤水分含量变化存在明显的差异。降雨量的大小是直接影响水分的入渗深度的主要因素,随着降雨量持续增加,水分向深层下渗 44.6,63.6 mm 的降雨量结束后,土层初始含量对土层水分的增量以及入渗速率影响较小,主要还是由独立降雨量的大小决定,降雨量越大,对土层水分的补给越大,入渗的速度越快。在 63.6,44.6 mm 降雨事件中,降雨入渗相同土层深度所经历的时间不同。入渗相同深度 63.6 mm

降雨情况下所用的时间最短。说明独立降雨事件水分含量越大,入渗的速率快,水分补给的量越大。

## 4 结论

(1) 大于 8.8 mm 的降雨事件水分可以到达杨柴根系主要分布的土层,属于有效降雨。44.60 mm 以上降雨水分至少可以入渗到 110 cm 土层,可以对地下水进行有效补给。

(2) 土壤水分初始含水量影响降雨水分入渗的深度,土壤初始含水量高的降雨结束后,水分更容易向深层次入渗。

(3) 降雨强度决定了不同土层水分含量变化的时间及增量,降雨强度越大,水分入渗到相同土层所花的时间更短,不同土层水分含量变化的幅度越大,更有利于水分向深层土入渗。当降雨强度  $> 7$  mm/h 时,10 和 30 cm 土层水分变化滞后于该降雨强度 1~3 h,出现明显的跳跃式增加。70 cm 及以下土层对降雨强度的响应逐渐减小。

(4) 降雨对土壤水分的补给量主要由单次降雨量决定,单次降雨量越大水分入渗的深度越深,对土壤水分补给的量越大。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 李品芳,李保国.毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究[J].水利学报,2000,31(3):24-28.

[2] 李博.生态学[M].北京:高等教育出版社,2003:33-34.

[3] 蒋超,钱亦兵,杨海峰,等.古尔班通古特沙漠南缘浅层风沙土含水量空间变异[J].干旱区研究,2009,26(4):519-525.

[4] 李文华.中国当代生态学研究:生态系统恢复卷[M].北京:科学出版社,2013:80.

[5] 张瑞强,高天明,王健,等.希拉穆仁草原根层土壤水分变化特征[J].草业科学,2016,33(5):878-885.

[6] Muldavin E H, Moore D I, Collins S L, et al. Aboveground net primary production dynamics in a Northern Chihuahuan Desert ecosystem [J]. *Oecologia*, 2008,155(1):123-132.

[7] Lee K S, Kim J M, Lee D R, et al. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2007,345(3/4):199-211.

[8] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004,141(2):211-220.

[9] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J].生态学报,2008,28(12):6334-6343.

[10] 潘艳霞,王新平.荒漠人工植固沙植被区土壤水分的时空变异性[J].生态学报,2009,29(2):993-1000.

[11] 赵岩,周文渊,孙保平,等.毛乌素沙地 3 种荒漠灌木根系分布特征与土壤水分研究[J].水土保持研究,2010,17(4):129-133.

[12] 洪光宇,王晓江,张雷,等.毛乌素沙地不同林龄杨柴灌木林土壤剖面水分变化特征[J].内蒙古林业科技,2016,42(4):6-9.

[13] 韩钢,赵忠.不同土壤水分下 4 种沙生灌木的光合响应特性[J].生态学报,2010,30(15):4019-4026.

[14] 穆家伟,查天山,贾昕郭,等.毛乌素沙地典型沙生灌木对土壤蒸发的影响[J].北京林业大学学报,2016,38(12):39-45.

[15] 洪光宇,王晓江,张雷,等.毛乌素沙地杨柴茎流速率动态研究[J].内蒙古林业科技,2018,44(4):35-38.

[16] Vachaud G A, Silans A P D, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function 1 [J]. *Soil Ence Society of America Journal*, 1985,49(4):822-828.

[17] 杨永梅,杨改河,冯永忠.近 45 年毛乌素沙地的气候变化及其与沙漠化的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(12):87-92.

[18] 张雪琴,刘树林,冯坤,等.毛乌素沙区 1961—2016 年降水特征[J].中国沙漠,2019,39(6):141-150.

[19] Wang Xinping, Zhang Yafeng, Hu Rui, et al. Revisit of event-based rainfall characteristics at Shapotou area in North China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016,8(6):477-484.

[20] 肖庆礼,黄明斌,邵明安,等.黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入参与再分布[J].农业工程学报,2014,30(2):124-131.

[21] 张雷,王晓江,洪光宇,等.毛乌素沙地不同飞播年限杨柴根系分布特征[J].生态学报,2017,36(1):29-34.

[22] 冯起,程国栋.我国沙地土壤水分分布状况及其意义[J].土壤学报,1999,36(2):225-236.

[23] 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.

[24] Sharma K D. Water resources: An overview of world deserts [J]. *Annual Arid Zone*, 1991,30(4):283-300.

[25] 刘元波,陈荷生,高前兆,等.沙地降雨入渗水分动态[J].中国沙漠,1995,15(2):143-150.

[26] 杨文斌,任建民,贾翠萍.柠条抗旱的生理生态与土壤水分关系的研究[J].生态学报,1997,17(3):239-244.

[27] 杨文斌.干旱、半干旱区沙地灌木水量动态关系研究[D].北京:北京林业大学,2003.

[28] 杨文斌,王晶莹.干旱、半干旱区人工林边行水分利用特征与优化配置结构研究[J].林业科学,2004,40(5):3-9.

[29] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J].水利学报,2006,37(2):166-171.

[30] 张军红,吴波.油蒿群落生物结皮对降水入渗过程的影响[J].中国科学院研究生院学报,2014,31(2):214-221.



- (5):61-66.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Eosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Soil and Water Conservation Planning [M]// Usda: Agricultral Handbook. 1978.
- [6] Renard K G, Foster, G R, Weesies G A, et al. Predicting Rainfall Eosion by Water: A Guide to Conservation PLanning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]// Usda: Agricultral Handbook. 1997.
- [7] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun, An Empirical Soil loss Equation, in Proc of 12th ISCO [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2002.
- [8] 程先富,余芬.安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J].地理研究,2010,29(8):1461-1470.
- [9] 赵明松,李德成,张甘霖,等.基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J].土壤学报,2016,53(1):28-38.
- [10] 张乃夫,刘霞,朱继鹏,等.安徽新安江流域土壤侵蚀敏感性评价及空间分异特征[J].中国水土保持科学,2014,12(6):8-15.
- [11] 王略,屈创,赵国栋.基于中国土壤流失方程模型的区域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持通报,2018,38(1):122-125.
- [12] 孙禹,哈斯额尔敦,杜会石.基于 GIS 的东北黑土区土壤侵蚀模数计算[J].中国水土保持科学,2015,13(1):1-7.
- [13] 王凯,夏燕秋,马金辉,等.基于 CSLE 和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持研究,2015,22(1):26-32.
- [14] 顾也萍,王长荣.新构造运动对安徽土壤分布的影响[J].长江流域资源与环境,1998(1):3-5.
- [15] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
- [16] Liu Baoyuan, Xie Yun, Li Zhiguang, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020,8(2):430-439.
- [17] 殷水清,章文波,谢云,等.基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J].中国水土保持,2013(10):45-51.
- [18] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [19] Sharpley A N, Williams J R. Epic-erosion/productivity Impact Calculator (1.1): Model Determination [M]. US: United States Department of Agriculture, 1989.
- [20] Mccool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the Asae, 1987,30(5):1387-1396.
- [21] Liu Baoyuan. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the Asae, 1994,37(6):1835-1840.
- [22] 张宏鸣,王猛,杨勤科,等.坡度截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(11):1753-1760.
- [23] 张宏鸣,杨勤科,王猛,等.沟道截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J].水利学报,2017,48(5):568-575.
- [24] 张宏鸣,杨勤科,刘晴蕊,等.基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J].计算机工程,2010,36(9):246-248.

(上接第 83 页)

- [31] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J].生态学报,2009,29(2):993-1000.
- [32] 刘元波,陈荷生,高前兆,等.沙地降雨入渗水分动态[J].中国沙漠,1995,15(2):143-150.
- [33] 何志斌,赵文智.半干旱区流动沙地土壤湿度变异及其对降雨的依赖[J].中国沙漠,2002,22(4):359-362.
- [34] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁璠.科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究[J].生态学杂志,2004,23(1):56-59.
- [35] 李东方,刘廷玺,王冠丽,等.科尔沁沙地沙丘、草甸区土壤水、地下水对降雨的响应[J].干旱区资源与环境,2013,27(4):123-128.
- [36] 王博,段玉玺,王伟峰,等.油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J].应用生态学报,2020,31(5):149-156.
- [37] 王新平,康尔泗,李新荣,等.荒漠地区土壤初始状况对水平入渗的影响[J].地球科学进展,2003,18(4):592-596.
- [38] 李新乐,吴波,张建平,等.白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J].生态学报,2019,39(15):5701-5708.
- [39] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe [J]. Ecology, 1992,73(4):1175-1181.
- [40] Wilson D J, Western A W, Grayson R B. Identifying and quantifying sources of variability in temporal and spatial soil moisture observations [J]. Water Resources Research, 2004,40(2):191-201.