

# 荒漠草原不同土地利用类型土壤水分对降水的响应

陈 林<sup>1,2,3</sup>, 宋乃平<sup>1,2,3</sup>, 杨新国<sup>1,2,3</sup>, 李学斌<sup>1,2</sup>

(1.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;  
2.宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,银川 750021;3.宁夏大学生态环境学院,银川 750021)

**摘要:** 降水是荒漠草原生态系统重要的水分来源,也是不同时空尺度上各种生物过程的重要驱动因子。为了解荒漠草原土壤水分对降水的响应,以 3 种典型土地利用方式(天然草地、灌木地和沙地)为研究对象,研究荒漠草原降水事件对不同土地利用类型土壤水分的影响。结果表明:研究期内降水量以<5 mm 的小降水事件为主,发生次数占总事件的 72%;从降水强度来看,<10 mm/h 的降水事件居多,达到 86%。0~250 cm 的平均土壤含水量以沙地最高,灌木林和天然草地的平均土壤含水量几乎相等,但天然草地平均土壤含水量的波动较大。3 种土地利用类型下,表层(<10 cm)土壤含水量波动较大,深层(>80 cm)土壤含水量则相对稳定。与草地和灌木地相比,沙地湿润锋响应最快,入渗深度最大。在 102.6 mm 的降水量条件下,天然草地累计入渗量最大(7.36 mm),其次为沙地(3.47 mm),灌木林地入渗量最低(2.64 mm)。因此,从最大蓄存和有效利用降水资源的角度来看,荒漠草原生态恢复过程中构建草地是该区域可以选择的土地利用方式。

**关键词:** 土地利用类型; 土壤水分; 降水事件; 荒漠草原

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2022)02-0153-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.020

## Responses of Soil Moisture to Precipitation Under Three Typical Land-Use Patterns in Desert Steppe

CHEN Lin<sup>1,2,3</sup>, SONG Naiping<sup>1,2,3</sup>, YANG Xingguo<sup>1,2,3</sup>, LI Xuebin<sup>1,2</sup>

(1.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.College of Ecology and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021)

**Abstract:** Precipitation is an important source of water in desert steppe ecosystem, and is also an important driving factor of various biological processes on different spatial and temporal scales. In order to understand the response of desert steppe soil moisture to precipitation, this study took three typical land use patterns (natural grassland, shrub land and sandy land) in desert steppe as research objects to study the effect of precipitation events on soil moisture under different land use types. The results showed that precipitation in the study period was mainly small precipitation events less than 5 mm, accounting for 72% of the total. Judging from the precipitation rate, precipitation events less than 10 mm/h were the majority, reaching 86%. The average soil water content of 0~250 cm was highest in sandy land. The average soil water contents of shrub forest and natural grassland were almost equal, but the average soil water content of natural grassland fluctuated greatly. Under the three types of land use, the soil water content fluctuated greatly in the surface layer (<10 cm), while it was relatively stable in the deep (>80 cm). Compared with grassland and shrub land, the wet front of sand had the fastest response and the largest infiltration depth. Under the rainfall of 102.6 mm, the cumulative infiltration amount of natural grassland was the largest (7.36 mm), followed by sand (3.47 mm), and shrub land (2.64 mm). Therefore, from the point of view of maximum storage and effective utilization of precipitation resources, natural grassland should be a land use type worthy

of selection during the ecological restoration and reconstruction of desert steppe.

**Keywords:** land use types; soil moisture; precipitation events; desert steppe

土壤水分作为水循环的一个重要参数,是生态系统功能的关键因素<sup>[1]</sup>,作为纽带连接着降水、地表水和地下水,对植被组成和物种丰富度有着重要贡献,也极大影响着生态系统的生产力。在干旱和半干旱地区,土壤水分具有较高的时空变异性,是植被恢复和生态系统可持续发展的主要限制因素。因此,土壤水分与不同土地利用类型之间的关系引起极大的关注<sup>[2]</sup>。有研究<sup>[3]</sup>表明,在正常气候条件下,土地利用差异是决定土壤水分变化的主导因素,且对 0—500 cm 土层的土壤含水量有显著影响<sup>[4]</sup>。由降水引起的土壤水分是荒漠草原植物的主要甚至是唯一水源,因此,研究土壤水分对降水的响应有助于深入理解和解释未来降水格局变化对于旱半干旱生态系统关键过程的影响。

在干旱少雨的荒漠草原,有限的降水资源往往并未得到有效的利用<sup>[5]</sup>,因此,由降水引发的土壤水分变化对该区域生物过程中的作用显得更为重要<sup>[6]</sup>。许多物种分布在荒漠草原的斑块中,对土壤于多年生草本植物同样有着较大的影响。反过来,不同土地利用类型条件下的植被能够改变降水的再分布而水分特别敏感,有研究<sup>[7]</sup>发现,低灌木地区的土壤含水量比其他植被类型具有更高的时间稳定性,而有不同的土壤水分输入过程<sup>[2]</sup>。目前,关于不同土地利用类型降水入渗过程和累积入渗的资料仍然较少。

2003 年宁夏全区实施退耕还林(草)工程后,荒漠草原植被覆盖度提高,主要是大面积建植的人工林,如中间锦鸡儿。然而,不适宜的植被建设可能导致土壤干层的发生<sup>[8]</sup>,而根区缺水可能会持续限制植被的生长<sup>[2]</sup>。通过开展不同土地利用类型对土壤水分影响的研究,将有助于了解造成缺水的机制和解决长期植被恢复不良的问题<sup>[4]</sup>,这对可持续利用降水资源、合理管理各种土地利用类型都至关重要<sup>[9]</sup>。因此,需要更好地了解荒漠草原不同土地利用类型土壤水分和降水之间的关系,以避免上述问题的发生。因此,什么样的土地利用方式可以更好的利用有限的降水资源,是值得探讨的问题。

本文选取荒漠草原 3 种典型土地利用方式(沙地、天然草地和灌木林地),基于降水和土壤水分的时间高分辨率连续动态监测,分析土壤水分时间动态和空间分布、湿润锋推进以及降水入渗量等特征,探讨荒漠草原降水对不同土地利用类型下土壤水分的补给特征,以期为利用降水资源和维持生态恢复的最优土地利用方式提供科学参考。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙漠西南缘的宁夏回族自治区盐池县皖记沟行政村,该区域海拔 1 230 m。1954—2016 年的年降水量为 145~587 mm,多年平均降水量为 290 mm,大约 70% 的降水发生在 6—9 月,而蒸发量则是降水量的 6~7 倍。土壤类型以风沙土和灰钙土为主,松散的基岩风化沉积土呈斑块状裸露分布。主要植被类型为灌木和天然草地,大多数植物的生长期从 5 月开始,至 10 月结束。

## 1.2 试验设计与数据采集

选取研究区内相对平坦的天然草地(冰草)、灌木林地(中间锦鸡儿)和沙地(对照)3 种典型土地利用类型作为研究对象。每个研究地点的代表性土壤剖面、粒径、容重、植被覆盖和高度信息见表 1 和表 2。灌木地为中间锦鸡儿成行种植,行距约为 6 m,株距为 1.0~1.5 m。通过土钻采样或 TDR 传感器等不同的测量技术,可以获得一定区域和特定时刻的原位土壤水分数据<sup>[1]</sup>,而土壤水分监测系统(HOBO, H21, USA)可以长时间、连续自动记录并存储土壤水分含量值,减少数据采集所需的时间和人力。考虑到试验精度的问题,不同土地利用类型的土壤水分监测应具有相同的精度和频率。本研究中的土壤水分监测探头(HOBO, S-SMC-M005, USA)测量范围为 0~0.55 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,在 0~50 ℃ 范围内精度为±0.031 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。灌木地中土壤水分传感器安置于中间锦鸡儿冠层边缘到茎部的中间位置<sup>[10]</sup>,其他土地利用类型均位于各试验样地的中间位置。将该探头分别安装在地表以下 5,10,20,40,60,80,100,150,200,250 cm 处。探头安装时,在土壤中钻 1 个足够大的坑,探头放置在 10 cm 以下(不包括 10 cm),插入土壤中垂直放置,在 5,10 cm 深度时将探头水平放置。安装完成后,对土坑进行仔细回填和覆压,以保证与原土坑最大可能的一致性<sup>[11]</sup>。2013 年 5 月 26 日,每个土地利用类型样地中都安装了土壤水分监测系统,并在 2 个月后将开始测量,让土壤自然沉降后再读取数据。由 3 个数据采集器(HOBO, H21, USA)进行存储,记录间隔为每 30 min 收集 1 次,具有较高的时间分辨率,并定期手动下载。降水量数据来源于安装在研究区内的自动气象站(Weather Station Vantage Pro2™ Plus),采样时间间隔为 30 min,使用 Weather Link 6.0 软件下载记录的数据。

| 表 1 研究地概况 |                                 |             |      |      |
|-----------|---------------------------------|-------------|------|------|
| 土地利用类型    | 主要植被                            | 经纬度         | 盖度/% | 高度/m |
| 天然草地      | 冰草                              | 37°48'38"N  | 35   | 0.35 |
|           | ( <i>Agropyron cristatum</i> )  | 107°26'29"E |      |      |
| 灌木林地      | 中间锦鸡儿                           | 37°48'36"N  | 65   | 2.20 |
|           | ( <i>Caragana liouana</i> )     | 107°26'32"E |      |      |
| 沙地        | 白草                              | 37°48'41"N  | <5   | 0.03 |
|           | ( <i>Pennisetum flaccidum</i> ) | 107°26'30"E |      |      |

1.3 数据分析

有研究<sup>[12]</sup>认为,湿润锋的位置可以通过测量基  
质电位或土壤剖面含水量的变化来检测。本试验中,

表 2 研究地土壤特征

| 土层<br>深度/cm | 天然草地                         |          |          |          | 灌木林地                         |          |          |          | 沙地                           |          |          |          |
|-------------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|
|             | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 黏粒/<br>% | 粉粒/<br>% | 砂粒/<br>% | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 黏粒/<br>% | 粉粒/<br>% | 砂粒/<br>% | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 黏粒/<br>% | 粉粒/<br>% | 砂粒/<br>% |
| 0—5         | 1.35                         | 2.97     | 97.03    | 0.00     | 1.46                         | 23.68    | 73.69    | 2.63     | 1.50                         | 10.83    | 85.71    | 3.47     |
| 5—10        | 1.47                         | 11.53    | 88.21    | 0.26     | 1.50                         | 17.02    | 79.84    | 3.14     | 1.55                         | 11.09    | 85.36    | 3.55     |
| 10—20       | 1.41                         | 13.56    | 86.18    | 0.27     | 1.59                         | 12.37    | 86.37    | 1.26     | 1.56                         | 13.33    | 86.37    | 0.29     |
| 20—40       | 1.49                         | 17.48    | 81.79    | 0.73     | 1.62                         | 11.82    | 87.88    | 0.30     | 1.54                         | 12.87    | 87.12    | 0.01     |
| 40—60       | 1.45                         | 20.23    | 78.81    | 0.97     | 1.57                         | 12.86    | 87.02    | 0.12     | 1.57                         | 12.47    | 86.01    | 1.51     |
| 60—80       | 1.46                         | 21.18    | 78.68    | 0.13     | 1.63                         | 12.03    | 87.86    | 0.12     | 1.61                         | 14.78    | 85.19    | 0.03     |
| 80—100      | 1.32                         | 43.78    | 56.21    | 0.01     | 1.25                         | 12.26    | 87.23    | 0.51     | 1.60                         | 11.7     | 88.01    | 0.28     |
| 100—150     | 1.41                         | 44.72    | 55.28    | 0.00     | 1.31                         | 18.08    | 80.51    | 1.41     | 1.36                         | 15.8     | 83.88    | 0.32     |
| 150—200     | 1.40                         | 23.27    | 76.73    | 0.00     | 1.57                         | 24.51    | 75.42    | 0.07     | 1.36                         | 30.11    | 69.11    | 0.78     |
| 200—250     | —                            | 7.87     | 91.75    | 0.38     | —                            | 19.75    | 80.25    | 0.00     | —                            | 11.3     | 85.88    | 2.82     |

2 结果与分析

2.1 研究期降水特征分析

降水趋势的年际分析表明,年降水量呈下降趋  
势,年平均降水量从 1954—1963 年的 308 mm 下降  
到 2007—2016 年的 289 mm(图 1),选取的监测年降  
水量为平水年。

按照单次降水是被至少 6 h 的连续干旱期分隔

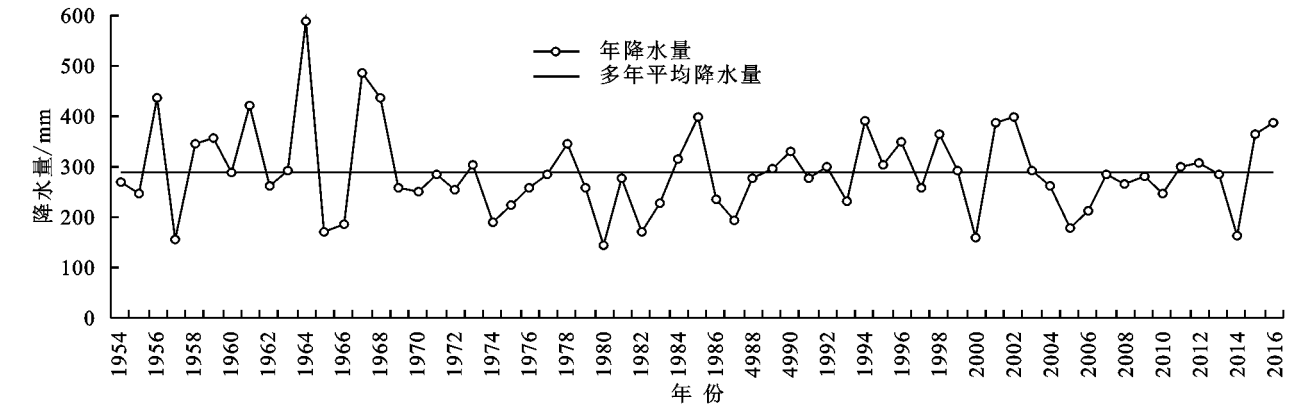


图 1 1954—2016 年降水量及其趋势

降水量、最大降水强度、最小降水强度和平均降  
水强度见表 4。降水量最大为 12.48 mm,平均降水  
强度为 7.37 mm/h;10 月 2 日发生的降水量为 2.248

水分入渗过程是由土壤剖面深度 5,10,20,40,60,  
80,100,150,200,250 cm 处含水量的变化所测量的,  
假设当含水量在一定深度保持在一个稳定值连续超  
过 2 h,降水入渗停止<sup>[10]</sup>。

降水事件的累积入渗量可表示为<sup>[13]</sup>:

$$I=(S_{\max}-S_i)D/10 \tag{1}$$

式中: $S_{\max}$ 为 1 次降水事件后所能达到的最大土壤  
含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $S_i$ 为降水事件发生前的初始土  
壤含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $D$ 为入渗深度(40 cm); $I$ 为累  
积入渗量(mm)。一般情况下,在降水事件发生后的  
1 h 达到  $S_{\max}$ 。

开的事件所定义<sup>[14-16]</sup>。在研究期间,降水被划分为 6  
个等级(表 3)。本研究选取 2013 年 8 月 1 日至 10 月  
31 日,共确定 36 个降水事件超过 0.254 mm,均无降  
雪和冰雹等事件。降水量<5 mm 的事件共有 26  
次,约占总降水事件的 72%。降水>5 mm 且<10  
mm 共 9 次,降水>10 mm 仅 1 次,说明该等级的降  
水量事件很少发生。研究期内降水量合计为 102.6  
mm,占全年降水量(284.6 mm)的 36.05%。

mm,平均降水强度高达 135.382 mm/h,这意味着某  
些降水事件虽然降水量小,但降水强度却较高。

在 3 个月的研究中,平均降水强度>50 mm/h,约

占总降水事件的 3%; $>25\text{ mm/h}$  且 $<50\text{ mm/h}$  的降水事件占 3%; $>10\text{ mm/h}$  且 $<25\text{ mm/h}$  的降水事件则占 8%; $<10\text{ mm/h}$  的降水事件居多,达到 86%。

表 3 降水强度分级标准及相应的降水记录

| 序号 | 降水等级/mm | 降水事件次数 | 累积降水量/mm |
|----|---------|--------|----------|
| 1  | $<1$    | 16     | 5.33     |
| 2  | 1~2     | 3      | 4.79     |
| 3  | 2~3     | 5      | 12.80    |
| 4  | 3~4     | 2      | 6.77     |
| 5  | 5~10    | 9      | 60.43    |
| 6  | $>10$   | 1      | 12.48    |
| 汇总 |         | 36     | 102.60   |

表 4 研究期(8—10 月)降水特征分析

| 序号 | 降水量/<br>mm | 降水强度/(mm·h <sup>-1</sup> ) |       |        |
|----|------------|----------------------------|-------|--------|
|    |            | 最大值                        | 最小值   | 平均值    |
| 1  | 8.052      | 66.548                     | 3.556 | 38.100 |
| 2  | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 3  | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 4  | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 5  | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 6  | 1.524      | 2.032                      | 2.032 | 2.032  |
| 7  | 12.480     | 20.828                     | 1.270 | 7.366  |
| 8  | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 9  | 9.212      | 18.034                     | 3.302 | 7.569  |
| 10 | 3.574      | 41.656                     | 1.778 | 21.717 |
| 11 | 5.660      | 29.972                     | 1.016 | 15.685 |
| 12 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 13 | 5.478      | 1.270                      | 1.016 | 1.101  |
| 14 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 15 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 16 | 2.574      | 19.812                     | 3.048 | 11.430 |
| 17 | 2.684      | 5.842                      | 4.572 | 5.207  |
| 18 | 5.622      | 6.096                      | 1.016 | 2.752  |

| 序号 | 降水量/<br>mm | 降水强度/(mm·h <sup>-1</sup> ) |       |        |
|----|------------|----------------------------|-------|--------|
|    |            | 最大值                        | 最小值   | 平均值    |
| 19 | 1.524      | 0                          | 0     | 0      |
| 20 | 8.052      | 18.034                     | 2.794 | 8.788  |
| 21 | 1.740      | 3.048                      | 1.270 | 1.863  |
| 22 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 23 | 0.762      | 0                          | 0     | 0      |
| 24 | 0.508      | 0                          | 0     | 0      |
| 25 | 5.660      | 2.032                      | 1.016 | 1.524  |
| 26 | 6.456      | 12.192                     | 2.286 | 8.128  |
| 27 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 28 | 2.248      | 135.382                    | 2.286 | 68.834 |
| 29 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 30 | 6.240      | 3.810                      | 2.286 | 3.099  |
| 31 | 3.192      | 3.556                      | 1.270 | 2.413  |
| 32 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 33 | 2.756      | 1.778                      | 1.270 | 1.439  |
| 34 | 0.254      | 0                          | 0     | 0      |
| 35 | 2.540      | 0                          | 0     | 0      |
| 36 | 0.762      | 0                          | 0     | 0      |

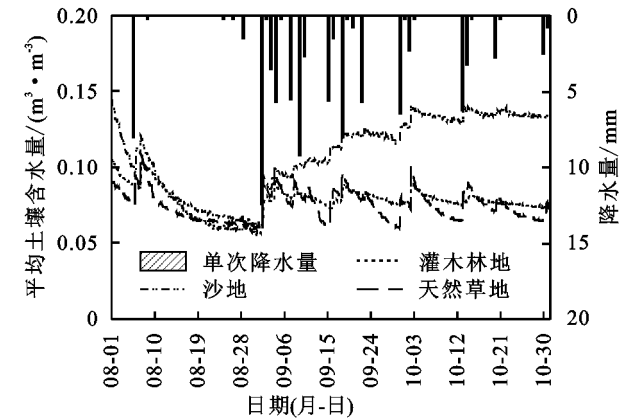


图 2 2013 年 8—10 月平均土壤水分和降水动态

2.3 土壤水分的空间差异

从图 3 可以看出,表层(5,10 cm 处)土壤含水量

2.2 土壤水分的时间动态

研究期内天然草地、灌木林地和沙地 0—250 cm 的平均土壤含水量时间动态见图 2。3 种土地利用类型平均土壤含水量明显不同,表现为沙地 $>$ 灌木林地 $>$ 天然草地。沙地土壤含水量为  $0.06\sim0.15\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,平均为  $0.11\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。天然草地平均含水量最低( $0.07\text{ m}^3/\text{m}^3$ ),波动范围为  $0.06\sim0.11\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。灌木林与天然草地的结果相似,但平均含水量略高于天然草地,数值范围为  $0.06\sim0.10\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,平均  $0.08\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。整体看来,灌木林地土壤含水量在监测期内波动不大,与沙地和天然草地相比,对降雨事件的响应较为平稳。

波动幅度均较大,主要是因为受降水、气温的影响较大且响应迅速。从不同土地利用类型来看,沙地表层平均土壤含水量较高,其次为灌木林地,天然草地表层平均土壤含水量最低。次表层(20,40 cm 处)土壤含水量的波动较表层小,且平均含水量低于表层;沙地的平均土壤含水量显著高于其他 2 个土地利用类型。次深层(60 cm 处),沙地土壤含水量分布在  $0.08\sim0.14\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,且相对稳定,而灌木林地和天然草地的土壤含水量波动较大,且含水量较次表层有所增多;依然以沙地的土壤含水量高。深层( $>80\text{ cm}$ )土壤含水量相对稳定,变异程度较小,降水后水分受重力影响而下渗,在本研究期内,3 个土地利用类型深层土壤含水量几乎不受降水入渗的影响。但

在 250 cm 处,沙地的土壤含水量波动显著增大,这可能是与不同土层间土壤性质(颗粒组成、有机质等)不一致所导致的深层渗漏<sup>[17]</sup>有关,也可能与该地

区沙地的地下水位埋藏较浅<sup>[18]</sup>而周围人类的生活和生产活动<sup>[19]</sup>(如打井取水和农田灌溉等)的影响有较大关系。

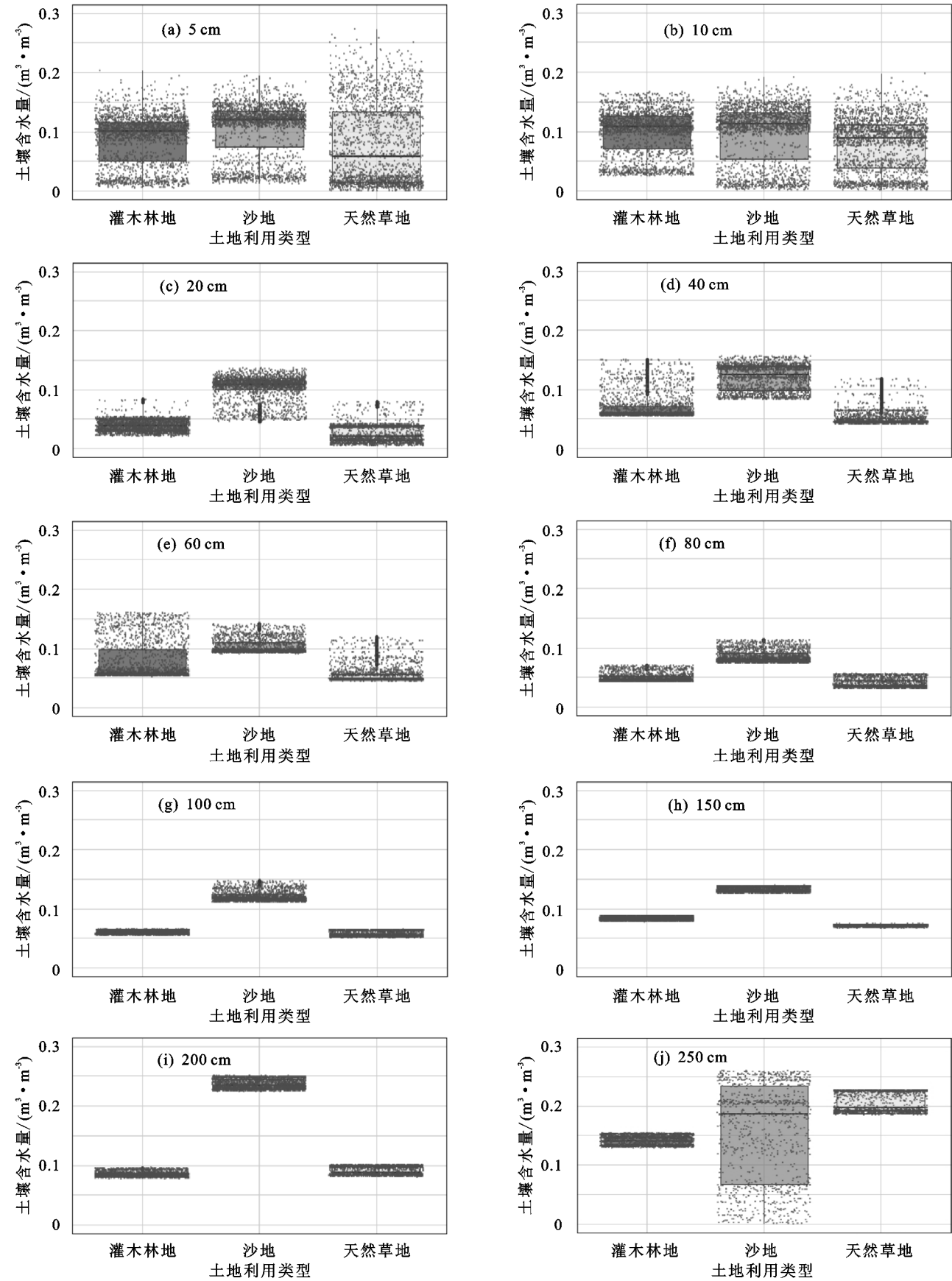


图3 3种土地利用类型土壤水分的空间差异

2.4 土壤湿润锋分析

在研究期内的 36 次降水事件中均没有出现地表径流。利用最大 1 次降水量(12.480 mm)分析湿润锋的推进过程(图 4)。灌木林地土壤初始平均含水量最低( $0.062\text{ m}^3/\text{m}^3$ ),5 cm 处土层最干,土壤含水量的增加相对缓慢,湿润锋从降水开始入渗到 5 cm 处,历时约 2 h,其后土壤含水量迅速增加,由  $0.01\text{ m}^3/\text{m}^3$  增长至  $0.12\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,10 cm 处土壤含水量随时间的进程而缓慢增加,而 $>10\text{ cm}$  土层土壤含水量无明显变化。

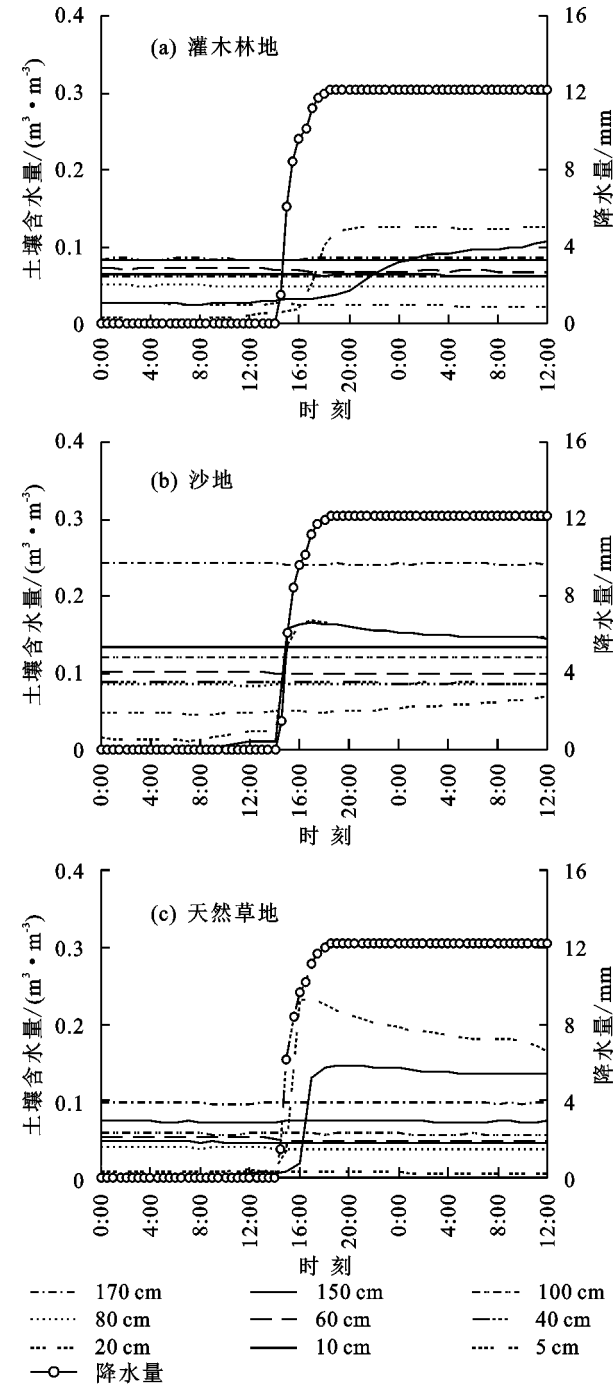


图 4 3 种土地利用类型的湿锋入渗过程

天然草地初始土壤含水量最低( $0.060\text{ m}^3/\text{m}^3$ ),0—10 cm 土层土壤含水量接近 0。湿润锋不到 1 h

便达到 5 cm 处,土壤水分含量在经过 2 h 的近似线性增长后,从  $0.01\text{ m}^3/\text{m}^3$  达到  $0.23\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,在维持 1 h(16:00—17:00)后,该层土壤水分含量出现下降。同时,湿润锋( $0.14\text{ m}^3/\text{m}^3$ )到达 10 cm 的深度,并且至少维持 18 个小时。然而,天然草地 20 cm 深度的土壤水分含量并没有改变,仍然维持在较低水平。

沙地的湿润锋深度比灌木林地提前约 2 h 达到 5 cm,并且土壤含水量提前约 3 h 达到  $0.17\text{ m}^3/\text{m}^3$  的峰值。随着快速和强烈的渗透,5,10 cm 处的土壤水分含量几乎同时增加,特别是 10 cm 处土壤含水量从降水前的接近 0,经过大约 3 h 的降水增加到  $0.17\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。20 cm 处的土壤含水量随降水事件开始缓慢增加,但在经过近 20 h 的观测结束时,仅从  $0.05\text{ m}^3/\text{m}^3$  增加到  $0.07\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

2.5 降水和累积入渗量间的关系

基于方程(1),得出累积入渗量和降水量间的关系(图 5),可表示为:

$$I_{\text{沙地}}=0.0365P-0.0074$$

$$I_{\text{灌木林地}}=0.0247P+0.0032$$

$$I_{\text{天然草地}}=0.0717P+0.0012$$

在 3 个月的研究期间内,降水量为 102.60 mm,由公式可计算得出,天然草地的入渗量最高(7.36 mm),沙地入渗量为 3.47 mm,灌木林地入渗量最低(2.64 mm)。可以看出,研究区降水对土壤水分的补给相对较低。

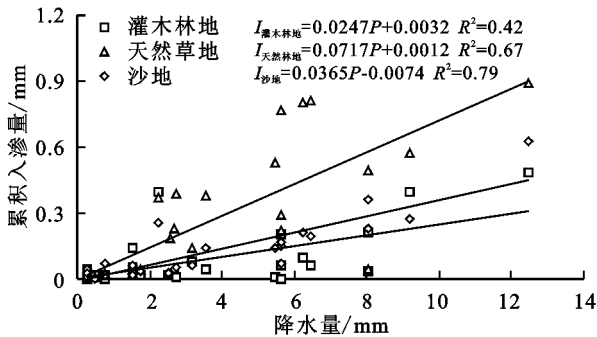


图 5 降水量与累积入渗量的关系

3 讨论

3.1 降水事件与土壤含水量的关系

降水通常以“事件”或“风暴”的形式进行研究,其开始和结束由指定持续时间的无降水间隔确定,即最小间隔时间。为了将降水与时间序列分开,采用 2 次降水之间持续 6 h 以上的连续干旱期的惯例,还有学者用 4 h 作为间隔时间,将个别降水与连续降水数据分开<sup>[20]</sup>,甚至还可以使用无降水的 1 h 周期来分离降水事件<sup>[21]</sup>。

而降水事件的划分直接影响研究结果,有学

者<sup>[21]</sup>对连续 1 h 或 6 h 无降水分降水事件进行了比较,发现存在差异。在处理分辨率为小时的降水量数据系列时,用于分离降水量的最小间隔时间一定程度上影响其属性,因此,最小间隔时间可以应用于不同的降水时间分辨率,但这取决于需要降水事件信息模型的目的。改变最小间隔时间(如 1, 2, 4, 6, 12, 18, 24 h)会改变降水事件的数量、平均降水频率和平均降水持续时间<sup>[22]</sup>。因此,对降水事件的统一定义非常重要。然而,这往往很少受到关注,限制已发表文献中结果的可比性。所以,在采用基于降水事件的数据比较分析研究中,需要更多地注意降水事件标准的选择。

大部分的降水对表层(0—10 cm)影响较大,但对深层(20 cm 以下)影响不大,这与杨磊等<sup>[5]</sup>在黄土丘陵地区的研究结果一致。由于荒漠草原年降水量相对较少,这一现象对植物特别是生长期内的浅根植物很重要。在生长期内 $<5$  mm 的降水事件最多(约 72%),而 $>10$  mm 的降水事件则很少发生,这与 Huxman 等<sup>[23]</sup>在美国北部研究发现小降水事件占主导但对降水总量贡献小、大降水事件虽然少但对生态系统影响大的研究结果相一致。Schwinning 等<sup>[24]</sup>认为,生态系统中降水影响的层次性为干旱半干旱地区的未来提供了新的视角。本文研究发现,不同土地利用类型土壤含水量的增加与阈值和降水量间的关系与其他多数研究结果相似,土壤含水量与降水量之间存在正相关关系,且不同植被类型间有着显著差异。当然,土壤含水量对降水的响应时间和降水入渗深度与降水格局密切相关,大的降水量( $>20$  mm)对提高土壤含水量和土壤贮水量起着关键作用。

而土壤含水量除受降水影响外,还受其他因素的影响,如相对湿度、气温、风速、土壤养分、土壤质地、植被类型和盖度、水气压、最低气温等,尽管不同条件下多种气候因素的影响是非常重要的,但这些因素的综合影响及其机制仍不清楚<sup>[3]</sup>,为了实现生态系统的可持续性,还需要多因素、长时间和多维度的过程监测与研究<sup>[2]</sup>。

### 3.2 不同土地利用类型土壤水分的入渗特征

降水入渗是重要的土壤水文循环过程<sup>[25]</sup>,决定着土壤水分的分布特征,进而影响植被的生长情况和稳定性,也是区域水资源评价和管理的重要一环<sup>[17]</sup>。有学者<sup>[5]</sup>研究发现,天然草地土壤水分容易得到有效补给,而且降水补给效率最高,主要是与植株形态密切相关,因植被冠层对降水的再分配作用,不同植被覆盖下降水到达地表的时间存在差异。本研究中,3

种土地利用类型下土壤湿润锋的推进程度存在差异。灌木林地的人渗速率相对较慢,主要是因为柠条冠层枝叶截留部分雨水而减少和延缓水分入渗,但相关研究<sup>[26]</sup>表明,冠层截留受到叶片粗糙度、植被结构、种植密度、植被覆盖度等因素的影响,土壤水分在降水量较大的情况下才能得到有效补充<sup>[5]</sup>。沙地具有快速、强烈的人渗作用,湿润锋能在较短的时间迅速到达深层土层,但干旱半干旱地区沙地降水的补给量又因强烈的蒸发作用而快速消失。降水对表层土壤水分的补给并不能全部被植物所利用,只有进入土壤一定深度的水分才能成为有效水分,天然草地由于表层的初始土壤含水量较低,平均土壤含水量有更大的增加速率,而且降水直接落在草地植株叶片上,当叶片被完全湿润且雨量聚集到一定量后即沿着叶片降落到地表,对土壤水分进行补给<sup>[5]</sup>。但在 20 cm 处土壤含水量仍在较低的水平,可能是因为浓密的草根一定程度上阻止了降水入渗,但这样具有较高的降水水分利用效率。当然,本研究仅从降水入渗的角度,讨论了不同土地利用类型土壤水分特征,由于监测手段和数据限制,未对不同降水过程下各土地利用类型的蒸腾蒸发特征做探讨,而综合分析土壤水分补给和消耗特征,这将是今后需要进一步研究的内容。

## 4 结 论

(1)在研究期间,降水量以 $<5$  mm 的小降水事件为主,且 $<10$  mm/h 的降水事件居多,说明该地区无效降水事件发生频次较高。而且由于降水事件所导致的林地、沙地和天然草地表层( $<10$  cm)土壤含水量波动较大,深层( $>80$  cm)土壤含水量则相对稳定。

(2)沙地湿润锋响应最快,入渗深度最大,因此平均土壤含水量最高,而天然草地平均土壤含水量的波动较大,但天然草地累积入渗量较大,灌木林地土壤含水量对降雨事件的响应较为平稳,入渗量最低。因此,从最大蓄存和有效利用降水资源的角度来看,草地是荒漠草原生态恢复与重建过程中可以选择的土地利用方式。

### 参考文献:

- [1] Rötzer K, Montzka C, Bogen H, et al. Catchment scale validation of SMOS and ASCAT soil moisture products using hydrological modeling and temporal stability analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 934-946.
- [2] Zhang X, Zhao W W, Liu Y X, et al. The relationships between grasslands and soil moisture on the Loess Plateau of China: A review[J]. *Catena*, 2016, 145: 56-67.
- [3] Feng H H, Liu Y B. Combined effects of precipitation

- and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531:1129-1140.
- [4] Zhang Y W, Shangguan Z P. The change of soil water storage in three land use types after 10 years on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2016, 147:87-95.
- [5] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶, 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4):457-466.
- [6] 张浩, 王新平, 张亚峰, 等. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(7):1847-1853.
- [7] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Temporal stability of surface soil moisture of different vegetation types in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2015, 128(4):1-15.
- [8] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析[J]. *生态学报*, 2000, 20(5):741-747.
- [9] Wang Y Q, Hu W, Zhu Y J, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:543-554.
- [10] Wang X P, Cui Y, Pan Y X, et al. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2):134-143.
- [11] Li Q, Zhu Q, Zheng J S, et al. Soil moisture response to rainfall in forestland and vegetable plot in Taihu Lake Basin, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(4):426-437.
- [12] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Measurements of cumulative infiltration and wetting front location by time domain reflectometry[J]. *Soil Science*, 1996, 161(8):480-483.
- [13] Wang X P, Wang Z N, Berndtsson R, et al. Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2):561-567.
- [14] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461/462(7):28-38.
- [15] Nawaz R, McDonald A, Postoyko S. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:66-80.
- [16] Zhang S, Guo Y. Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(1):19-28.
- [17] 李晋波, 姚楠, 赵英, 等. 不同放牧条件下锡林郭勒典型草原土壤水分分布特征及降水入渗估算[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(10):61-70.
- [18] 杨建振. 陕北毛乌素沙地生物结皮的土壤水分效应及其人工培育技术初探[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [19] 杨永梅. 毛乌素沙地沙漠化驱动因素的研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [20] Kim D G, Park S J. Distribution of average rainfall event-depth for overflow risk-based design of detention storage basin (in Korean with English abstract)[J]. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 2008, 22(1):15-22.
- [21] Dominguez-Romero L, Ayuso Munoz J L, Garcia Marin A P. Annual distribution of rainfall erosivity in western Andalusia, southern Spain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62(6):390-403.
- [22] Ahn J, Cho W, Kim T, et al. Flood frequency analysis for the annual peak flows simulated by an event-based rainfall-runoff model in an urban drainage basin[J]. *Water*, 2014, 6(12):3841-3863.
- [23] Huxman T, Snyder K, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2):254-268.
- [24] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2):211-220.
- [25] 吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 等. 海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):123-128.
- [26] Li Y, Cai T J, Man X L, et al. Canopy interception loss in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest of Northeast China[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6):831-840.