

# 内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应

樊婷<sup>1</sup>, 张存厚<sup>1,2</sup>, 张德广<sup>3</sup>, 苏玥<sup>1</sup>

(1. 内蒙古自治区气象局 气象灾害监测预警与人工影响天气中心,

内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区气象局 生态与农业气象中心,

内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区气象科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** [目的] 研究不同降水模式土壤水分响应机制, 为防治荒漠草原植被退化及土地荒漠化提供理论基础。[方法] 以内蒙古自治区达茂旗为例, 基于自动土壤水分观测站 2016—2018 年逐时土壤水分、降水量资料, 利用统计学等方法, 研究荒漠草原降水对土壤水分的影响。[结果] 对于 5.1~10.0, 10.1~25.0 mm 和大于 25 mm 降水事件, 土壤水分响应深度分别为 10, 20 cm 和 50 cm, 响应天数分别为 6, 7~9 d 和 10 d。5.1~15.0 mm 和 20.1~25.0 mm 的降水, 降水强度越大, 土壤水分入渗深度越大; 15.1~20.0 mm 的降水, 降水强度越大, 土壤水分入渗深度越小。5.1~15.0, 15.1~20.0, 20.1~25.0 mm 降水事件, 0—10 cm 土壤水分在降水强度较小时, 土壤水分均在 1 h 后显著响应; 在降水强度较大时, 土壤水分分别在 5, 8 h 及 8 h 后显著响应。[结论] 土壤水分对降水响应主要依赖于降水模式, 包括降水量、降水强度、降水时间等。5.1~15.0 mm 和 20.1~25.0 mm 降水量时, 降水强度对土壤水分入渗深度具有正反馈作用, 对入渗速率具有负反馈作用; 15.1~20.0 mm 降水量时, 降水强度对土壤水分入渗深度和速率均具有负反馈作用。

**关键词:** 荒漠草原; 垂直变化; 土壤水分; 降水变化; 降水模式

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)01-0072-06

**中图分类号:** S152.7, S157

**文献参数:** 樊婷, 张存厚, 张德广, 等. 内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 72-77. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.011; Fan Ting, Zhang Cunhou, Zhang Deguang, et al. Response of soil moisture of desert steppes to precipitation patterns in Damao Banner, Inner Mongolia[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 72-77.

## Response of Soil Moisture of Desert Steppes to Precipitation Patterns in Damao Banner, Inner Mongolia

Fan Ting<sup>1</sup>, Zhang Cunhou<sup>1,2</sup>, Zhang Deguang<sup>3</sup>, Su Yue<sup>1</sup>

(1. Center of Meteorology Disaster Monitoring and Warning and Artificial Influence Weather, Inner Mongolia Autonomous Region Weather Bureau, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

2. Centre of Ecology and Agricultural Meteorology, Inner Mongolia Autonomous Region Weather Bureau, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

**Abstract:** [Objective] The response mechanism of soil moisture in moving dunes according to different precipitation patterns was discussed to provide a reference to prevent degraded vegetation and land desertification of grasslands on desert steppes. [Methods] With the desert steppe in Damao Banner of Inner Mongolia being used as an example ecosystem, based on the hourly soil moisture and precipitation of soil moisture at automatic observation stations from 2016 to 2018, statistical methods were used to study the effects of precipitation on soil moisture. [Results] When the precipitation intensity was lower, the soil moisture response depth was

收稿日期: 2019-07-23

修回日期: 2019-11-29

**资助项目:** 内蒙古自然科学基金项目“内蒙古草原土壤水分对降水过程的脉动响应”(2019MS04006); 内蒙古自治区科技计划重点项目; 国家重点研发计划课题(2018YFC1506606); 中国气象局软科学研究项目(2019ZDIANXM02)

**第一作者:** 樊婷(1992—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 在读硕士研究生, 主要从事荒漠区气象防灾减灾研究。Email: 973911668@qq.com。

**通讯作者:** 张存厚(1977—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事草地生态和气候变化方面的研究。Email: zhangcunhou2004@163.com。

10 cm, 20 cm, and 50 cm, respectively. The days of the moisture response was 6 d, 7—9 d, and 10 d accordingly when the precipitation amount was 5.1—10.0 mm, 10.1—25.0 mm and >25.0 mm. The higher precipitation intensity led to deeper infiltration when the precipitation amount was 5.1—15.0 mm or 20.1—25.0 mm. When the precipitation was 15.1—20.0 mm, higher precipitation intensity corresponded to shallower infiltration. When the precipitation intensity was lower, the soil moisture of the 0—10 cm soil layer responded significantly after one hour regarding the number of total precipitation-amounts of 5.1—10.0 mm, 15.1—20.0 mm, and 20.1—25.0 mm, respectively. However, when the precipitation intensity was higher, the soil moisture of the 0—10 cm soil layer responded significantly after 5 h, 8 h, and 8 h, respectively. [Conclusion] The response of soil moisture to precipitation is mainly dependent on the precipitation pattern, including the precipitation amount, intensity, and duration. The intensity had positive feedback on soil moisture infiltration depth and negative feedback on soil moisture infiltration velocity when the precipitation amount was 5.1—15.0 mm or 20.1—25.0 mm. However, the precipitation intensity had a negative feedback on soil moisture infiltration depth and velocity when the precipitation amount was 15.1—20.0 mm.

**Keywords:** desert steppe; vertical change; soil moisture; precipitation change; precipitation pattern

土壤湿度是地球乃至全球范围内陆地表面物理过程中的重要影响因子,在改善区域和全球气候模型、干旱监测、预估农作物产量和投资等方面发挥重要作用<sup>[1]</sup>。土壤湿度的异常通过地面蒸发的变化可引起地面边界层热量平衡和水分平衡的较大改变,在边界层水热交换过程中扮演重要角色<sup>[2]</sup>,以边界层水热交换原理为基础,通过遥感监测真实热惯量能够间接对土壤湿度变化进行监测<sup>[3]</sup>。

降水是影响土壤水分的最重要因素,对土壤水分起到调节和控制作用<sup>[4-6]</sup>,由于降水对不同深度土壤水分作用不同,可将土壤剖面划分为速变层(0—20 cm)、活跃层(20—30 cm)、次活跃层(30—40 cm)和相对稳定层(40—100 cm),且深层土壤湿度与前月降水量显著相关,对气候变化具有一定的记忆功能,可以积累大量的地表水文过程信息<sup>[7-9]</sup>。通常土壤水分和降水具正反馈关系,随降水增加而增加,但在极端干旱和湿润区域观察到土壤水分和降水的负反馈关系<sup>[10-11]</sup>,不仅受降水量影响,降水频率的变化对土壤水分动态有显著的影响,土壤水分瞬时入渗速率受雨强大小和时间变化影响较大<sup>[12-13]</sup>。土壤水分还与其他气象因素有关,如陈少勇等<sup>[6]</sup>得出结论土壤湿度与降水呈极显著的正相关,与气温呈不显著的负相关;除此之外,土壤水分的大小还受土地利用类型、海拔、坡度、坡向、时间、土壤深度等非气象因素的影响<sup>[14]</sup>,坡向、坡位不同,土壤水分变异较大<sup>[15]</sup>。

内蒙古自治区拥有面积 60% 以上的广袤草原,以畜牧业为主要生产方式。荒漠草原是所有草原中荒漠化最为严重的一种类型,荒漠草原处于草原与荒漠区的过渡带,三者降水特征、土壤物理、化学特征,植被特征等方面既有共同点又有不同点,荒漠草原生态环境脆弱,土壤水分匮乏,对降水极为敏感,因

此研究荒漠草原土壤水分对降水的响应特征具有极其特殊意义。达尔罕茂明安联合旗(以下简称达茂旗)荒漠草原降水—土壤水分关系不仅是保持草原生态系统水资源、防治植被退化及土地荒漠化的重要理论基础,还决定着内蒙古生产力水平,有助于提高当地人民生活、经济水平。本文使用内蒙古自治区达茂旗荒漠草原 2016—2018 年牧草主要生长季(5—9 月)逐小时降水及不同深度土壤含水量资料,选取研究时段内的 6 个自然背景下降水事件,研究降水后土壤垂直剖面含水量变化特征,应用统计学方法分析不同降水模式对土壤水分的影响,以期防治荒漠草原植被退化及荒漠化提供理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

达茂旗(N 41°42', E 110°26', 海拔 1 376.6 m),隶属于内蒙古自治区中部包头市,地貌属阴山北麓丘陵草原区,属中温带半干旱大陆性气候,草原类型为典型荒漠草原。达茂旗平均气温 4.4 °C,极端最低气温 -39.4 °C,极端最高气温 38.1 °C,年平均降水量 259.3 mm,且多集中于 7—8 月,年平均水汽压 5.0 hPa,年平均相对湿度 48.2%,年平均风速 33.6 m/s,以北风和西北风为主。

达茂旗荒漠草原是内蒙古草原的重要组成部分,植被类型为温带干旱、半干旱气候条件下多年生旱生草本,以戈壁针茅(*Stipa tianschanica*)为主,草地植被的群落结构简单,草层低矮、稀疏,分为以克氏针茅、冷蒿、小叶锦鸡儿、百里香等为主的天然草场(植被覆盖度 30%),和以老芒麦、沙打旺、苜蓿为主的人工草场(高 10~35 cm)<sup>[16-18]</sup>。土地类型以钙质土和棕钙土为主(见表 1),占总体面积的 90% 以上,呈带

状分布,非地带性土壤类型有草甸土、潮土、石质土、盐土,土壤质地多沙壤、轻壤,并有不同程度砾质化,土壤肥力普遍较低<sup>[16-17]</sup>。

表 1 内蒙古自治区达茂旗荒漠草原不同土层土壤物理性质

土壤深度/cm	土壤质地	田间持水量/%	土壤容重/ ( $g \cdot m^{-3}$ )	凋萎湿度/ %
0—10	中壤土	14.1	1.65	1.50
10—20	中壤土	12.9	1.56	1.50
20—30	轻壤土	14.8	1.58	1.10
30—40	重壤土	16.1	1.50	1.50
40—50	沙壤土	19.2	1.48	1.50

## 1.2 数据与方法

本文使用 2016—2018 年牧草主要生长季(5—9 月)期间达茂旗气象局自动气象观测站逐小时降水量及土壤体积含水量数据,观测站环境符合《地面气象观测规范》,观测场四周空旷平坦,保持有均匀草层,草高不超过 20 cm。

以土壤垂直剖面上每 10 cm 为一层,将土层分为 5 层,分别为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm,每层均安装插管式传感器。不同土层逐小时自动土壤含水量由 GStar-1 新型土壤水分自动测量仪获得,测量仪器由河南省气象局和中国电子科技集团公司第 27 研究所双方联合研制,其测量原理为新型频域反射法(frequency domain reflection, FDR)。该站土壤水分监测设备已利用人工土钻对比观测进行验证,并通过中国气象局业务化检验,在业务中应用多年。

从降水开始到降水结束,降水前后 5 d 内无有效降水且水热条件基本一致时,本文当作一次降水事件。从全年降水事件中筛选 4 次降水强度偏小的不同降水量代表性降水事件,绘制日尺度含水量曲线,统计从降水开始到结束 4 次降水事件土壤水分响应过程,进行降水量—土壤水分响应量、响应深度、响应天数关系研究;从全年降水事件中选取 3 组 6 次相同降水量级不同降水强度代表性事件,统计 3 组 6 次降水事件前 1 h,降水事件后 1,5,8,12,24 h 土壤含水量,绘制小时尺度土壤含水量曲线,进行降水强度—土壤水分响应深度、响应速率关系研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水特征

2016—2018 年 5—9 月研究区共发生降水事件 24 次,总降水量 379.9 mm。为了进一步研究不同降水量级在主要生长季发生频次的高低,按照降水量分

成 5 个等级,分别为 0.1~5.0,5.1~10.0,10.1~15.0,15.1~20.0,20.1~25.0 mm 和大于 25.0 mm。结果表明,最大过程降水量出现于 2018 年 8 月,为 55.7 mm。研究区降水发生频率最高的降水量等级为 15.1~20.0 mm,占有降水事件的 28%。每个等级的降水总量分别为 16.0,32.7,20.4,117.6,69.9 mm 及 123.3 mm,占总降水量的 4.0%,9.0%,5.0%,31.0%,18.0%及 33.0%(见图 1)。在上述降水事件中,大于 25.0 mm 降水量级的降水强度最高(2.33 mm/h),0.1~5.0 mm 的降水强度为最低(0.55 mm/h)。

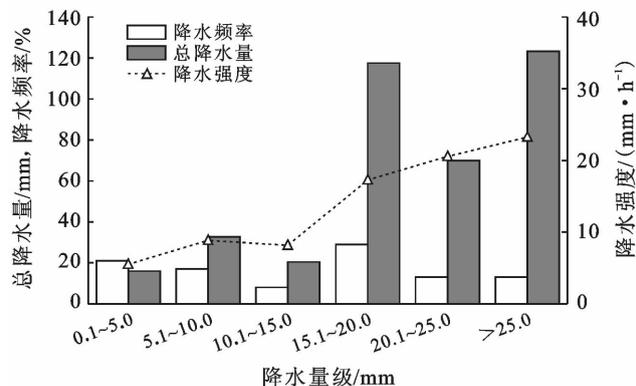


图 1 2016—2018 年内蒙古自治区达茂旗荒漠草原降水特征

### 2.2 土壤水分动态变化

在研究时段内,达茂旗荒漠草原最大的两次降水过程分别发生在 2016 年 7 月中旬(持续时间为 56 h,总降水量为 41.6 mm)和 2018 年 8 月上旬(持续时间为 48 h,总降水量为 55.7 mm),降水导致 0—10 cm 土层土壤含水量分别增加了 87.0%和 79.0%(见图 2)。随土层加深,土壤含水量呈现先减小、再增大的趋势。不同土层范围土壤水分对降水反应不同,0—10 cm 土壤水分动态与降水变化趋势基本一致,但土壤水分响应具滞后性,即土壤水分响应时间滞后于降水时间;10—30 cm 土壤水分变化趋势整体与降水趋势一致,滞后性较 0—10 cm 土层更强;30—50 cm 土壤水分只有在极端降水后才能产生响应,且这一土层范围滞后性最强。

### 2.3 土壤水分变化对降水脉动响应

2.3.1 土壤水分日变化对降水的脉动响应 如图 3 所示,降水事件 1(降水量 7.2 mm)显示,本次降水仅能使 0—10 cm 土层土壤含水量增加 36.7%,大于 10 cm 土壤深度的土壤含水量影响较小,降水事件响应天数为 6 d(图 3a);降水事件 2(降水量 18.0 mm)和降水事件 3(降水量 24.1 mm)能影响 0—20 cm 土壤水分,使 0—10,10—20 cm 土层土壤含水量分别增

加 70.0% 及 50.0% 以上, 土壤含水量对降水事件响应天数分别为 7 d 和 9 d (图 3b 和图 3c); 降水事件 4 (降水量 41.6 mm) 的降水能影响 0—50 cm 土壤水

分, 使 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm 土壤含水量分别增加 81.9%, 73.3%, 74.2%, 78.3% 及 64.6%, 降水事件响应过程 10 d (图 3d)。

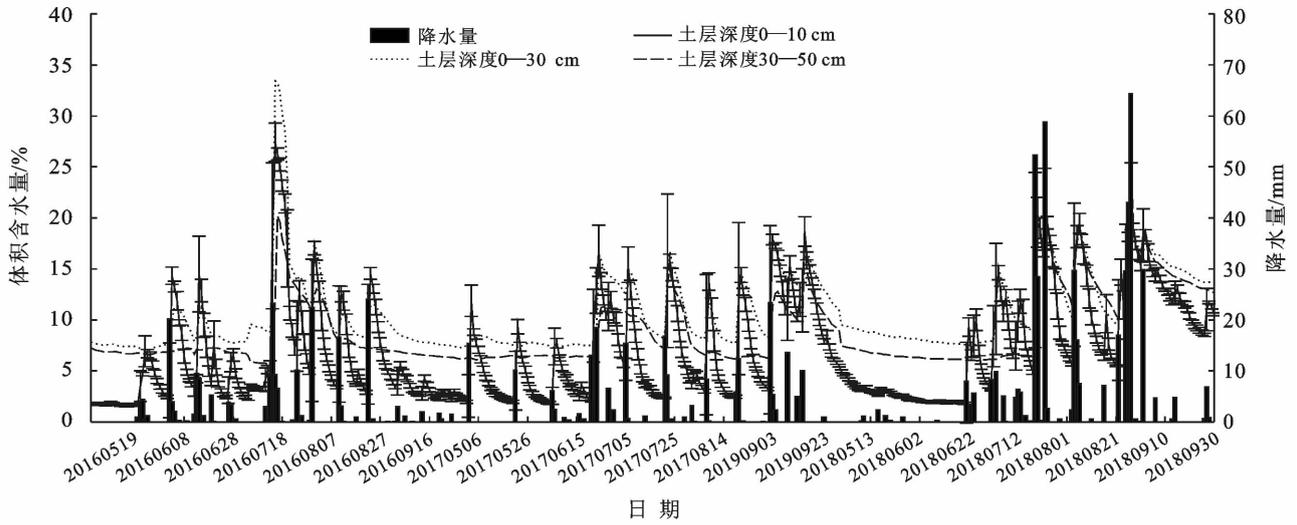


图 2 2016—2018 年内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的脉动响应

因此, 由图 3 可知, 在达茂旗荒漠草原, 相同降水量, 降水时间较长, 即降水强度较小时, 5.1~25.0 mm 的降水可以入渗补给浅层(0—20 cm)土壤水分。

其中, 在 5.1~10.0 mm 的降水过程中, 土壤水分入渗深度为 10 cm, 在 10.1~25.0 mm 的降水过程中, 土壤水分的入渗深度为 20 cm; 大于 25.0 mm 的降水才能补给更深层次的土壤水分, 土壤水分的入渗深度为 50 cm。

其中, 在 5.1~10.0 mm 的降水过程中, 土壤水

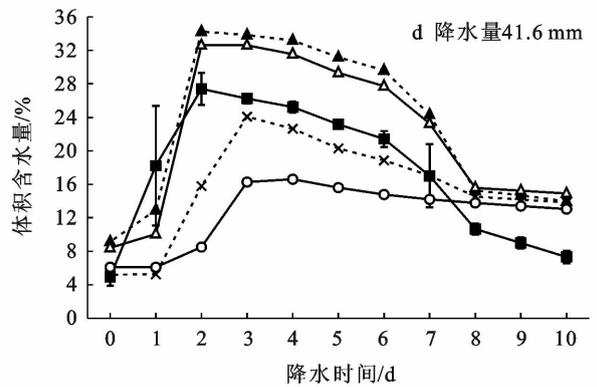
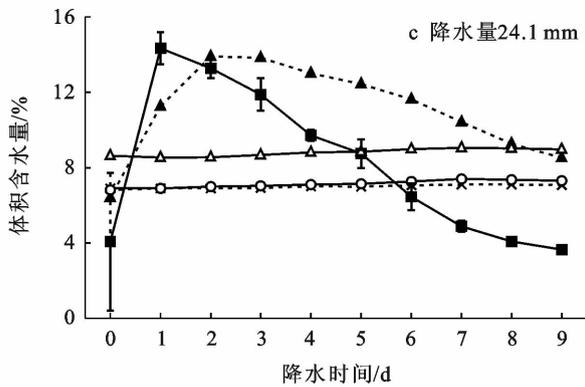
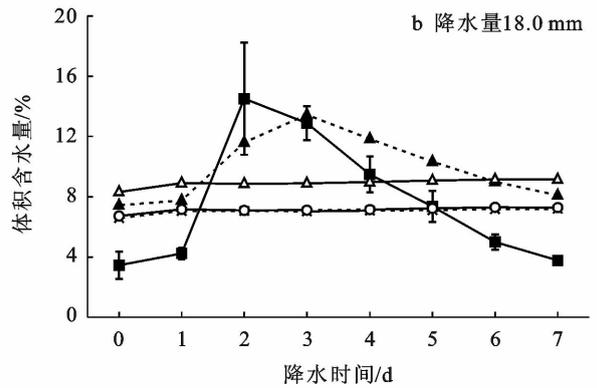
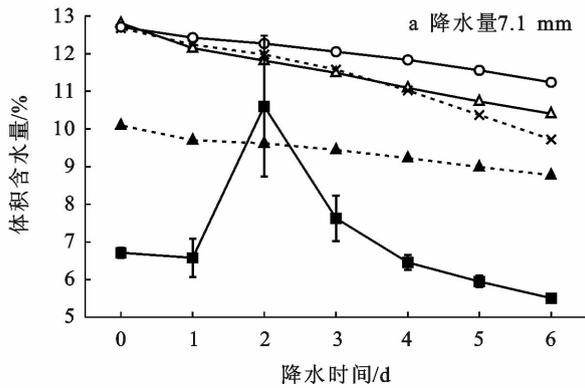


图 3 2016—2018 年内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤含水量对降水响应日变化

2.3.2 土壤水分逐小时变化对降水的脉动响应 降水后土壤含水量比降水前1 h增加5%以上时,土壤水分对降水有响应,增加50%以上时,土壤水分响应显著。选取3组6次同一降水量级不同降水强度降水事件,进一步分析降水强度对土壤水分的影响,3组降水事件降水量级分别为5.1~15.0,15.1~20.0,20.1~25.0 mm(如图4所示)。

由图4可知,降水事件1(降水量10.2 mm)的降水强度为0.7 mm/h,降水发生后0—10 cm土壤含水量在1 h后增加81.8%,大于10 cm深度土壤水分在24 h后无明显变化甚至略有减少(图4a),降水事件2(降水量8.4 mm)的降水强度为2.1 mm/h,能够使0—10,10—20 cm土壤含水量分别在1 h和5 h后增加78.2%和52.6%(图4b);降水事件3(降水量18.0 mm)的降水强度为1.4 mm/h,0—10,10—20 cm土壤含水量在1 h后分别增加73.9%和21.6%,大于20 cm深度土壤含水量在24 h后无明显变化甚至略有减少(图4c),降水事件4(降水量17.0 mm)的降水强度为2.1 mm/h,能够使0—10 cm土壤含水量在1,5,8 h后分别增加46.8%,41.0%及57.9%,大于

10 cm深度土壤含水量增量较小甚至略有减小(图4d);降水事件5(降水量24.1 mm)的降水强度为1.7 mm/h,仅能使0—10,10—20 cm土壤含水量在1 h后分别增加84.8%和11.3%(图4e),降水事件6(降水量22.7 mm)的降水强度为3.2 mm/h,能够使0—10,10—20,20—30,30—40 cm土层分别在8,8,12,24 h后增加77.6%,23.8%,29.2%及19.0%(图4f)。

因此,在达茂旗荒漠草原5.1~15.0 mm和20.1~25.0 mm量级降水,降水强度对土壤水分响应深度具有正反馈作用,降水强度越大土壤水分入渗深度越大,15.1~20.0 mm降水强度对土壤水分入渗深度具有负反馈作用,降水强度越大土壤水分入渗深度越小。降水强度对土壤水分入渗速率具有负反馈作用,降水强度越大土壤水分入渗速率越小,且随降水量级增大降水强度对土壤水分负反馈作用增强,5.1~15.0,15.1~20.0,20.1~25.0 mm的降水,降水强度较小时0—10 cm土壤水分均在1 h后就响应显著;降水强度较大时0—10 cm土壤水分分别在1,1,8 h后响应,5,8,8 h后才能响应显著。

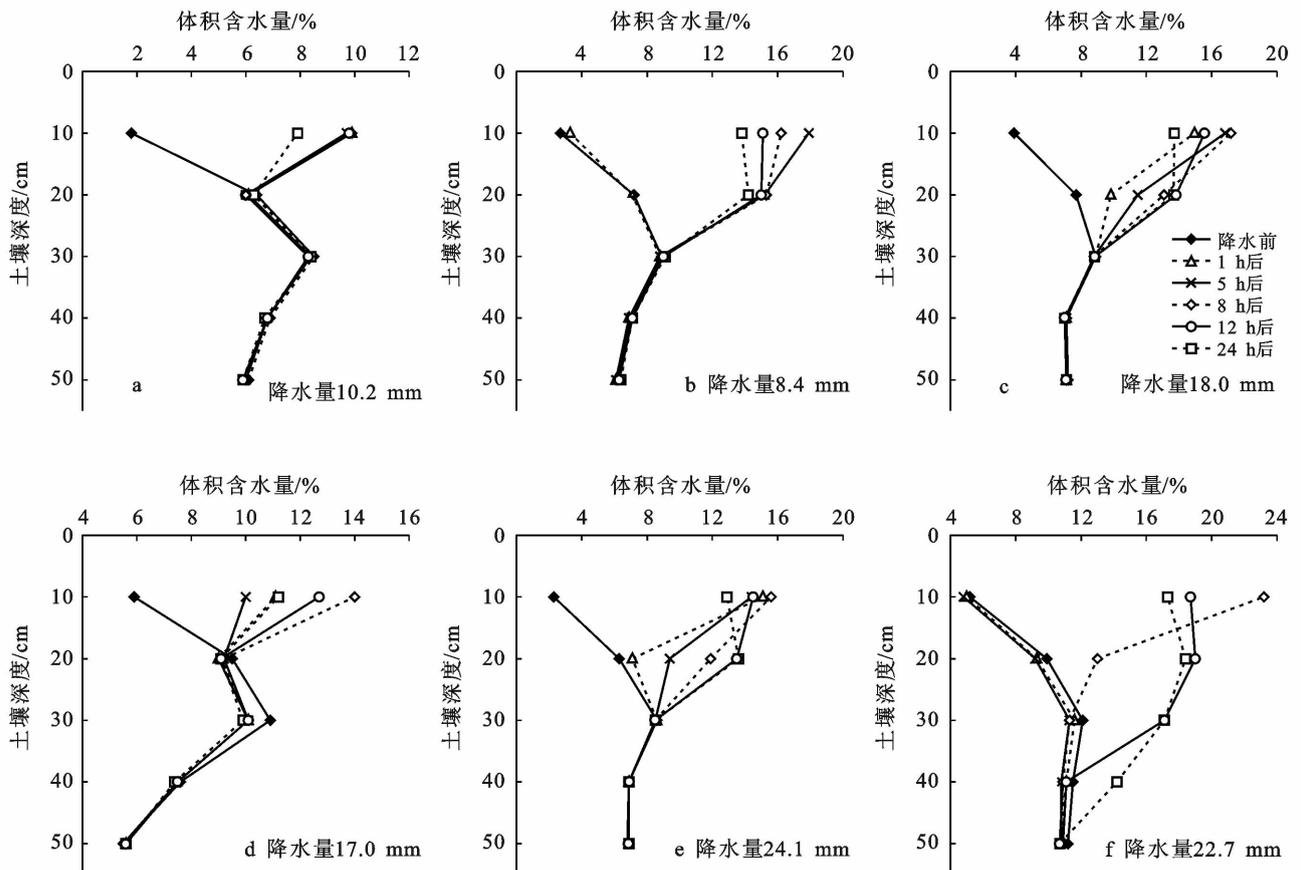


图4 2016—2018年内蒙古自治区达茂旗荒漠草原体积含水量对降水响应小时变化

### 3 讨论

降水量较大时才能入渗补给根层土壤水分,满足植物生长发育,研究区大于 25 mm 量级降水事件虽然频率较低,但降水总量最大,说明荒漠草原大降水事件发生较少,但可直接影响植被生存发展,与周海等<sup>[4]</sup>研究结果一致。随土层加深,土壤含水量具有先增大,再减小的趋势,这与有关研究领域的研究结果相似<sup>[19-20]</sup>,原因一方面在于荒漠草原植被覆盖度小,地表裸露面积大,蒸发剧烈消耗表层土壤含水量;另一方面在于植物通过根系吸收土壤水分,满足自身生长发育,消耗根层土壤含水量。

研究区域内发生 5.1~10.0 mm 降水入渗补给深度为 10 cm,荒漠区相同降水量级入渗补给深度至少为 20 cm<sup>[21]</sup>;研究区域内发生 10.1~25.0 mm 降水事件入渗补给深度为 20 cm,沙区相同降水量级入渗补给深度至少为 40 cm<sup>[22]</sup>。说明相对沙区和荒漠区,荒漠草原土壤水分对降水量更为敏感,一个原因是相对荒漠区和沙区,荒漠草原沙化程度较低,土壤质地多壤土,含砂量较少,土壤孔隙度更细小不利于降水入渗,陈娟等的研究中也发现砂黏比与土壤累积入渗量呈正比<sup>[23]</sup>;另一个原因是荒漠草原比沙区和荒漠区植被覆盖度大,生物量多,因此植物蒸腾消耗水分更大。

降水强度增大时雨滴动能增大有利于降水入渗,土壤水分响应量及速率增大<sup>[24]</sup>;然而,降水强度大也会产生地表径流,研究区植被稀少,茎叶能够拦截的地表径流量少,不利于降水入渗,土壤水分响应量及速率减少。所以,降水强度对土壤水分入渗效率的影响,是雨滴动能增大与地表径流共同作用的结果,但其耦合机理尚不明确,有待日后进一步研究分析。

降水入渗还与土壤物理、化学特性,植被以及地下水位等有关,达茂旗荒漠草原地表水缺乏且高度盐渍化,地下水位埋深不到 1 m<sup>[25-26]</sup>,地下水可以通过根系提升补给土壤水分<sup>[27]</sup>,对土壤水分再分布具有一定影响,今后需要加强这方面研究。本文未考虑土壤初始含水量对土壤水分入渗的影响,今后需要补充分析。

### 4 结论

(1) 土壤剖面不同土层范围土壤水分变化规律不同。土壤含水量变化与降水量变化趋势存在一致性,但随土壤深度增加,一致性减小;土壤含水量变化滞后于降水量变化,随土壤深度增加,滞后性增强。

(2) 土壤水分对降水响应过程复杂,主要受土壤

初始含水量,降水模式即降雨量、降雨强度、降雨时间等共同影响,与大部分研究结果一致<sup>[28-30]</sup>。降水强度较小时,降水量增大有利于降水入渗。降水量级较小(5.1~15.0 mm)或较大(20.1~25.0 mm)时,降水强度增大有利于降水入渗;降水量级中等(15.1~20.0 mm)时,降水强度增大不利于降水入渗。

#### [参 考 文 献]

- [1] Song Dongsheng, Zhao Kai, Guan Zhi. Advances in research on soil moisture by microwave remote sensing in China[J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(2): 186-191.
- [2] 李国平,符淙斌,叶笃正. 大尺度降雨异常对地面过程的影响:一类气候反馈机制的初步研究[J]. 大气科学, 1991, 15(2): 25-34.
- [3] 余涛,田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-31.
- [4] 周海,赵文智. 河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1637-1645.
- [5] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- [6] 陈少勇,郭凯忠,董安祥. 黄土高原土壤湿度变化规律研究[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 530-537.
- [7] 何子森,肖培青,郝仕龙,等. 黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 16-24.
- [8] 何志斌,赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-362.
- [9] Cai Jingze, Zhang Yuanzhi, Li Yu, et al. Analyzing the characteristics of soil moisture using GLDAS data: A case study in Eastern China[J]. Applied Sciences, 2017, 7(6): 566.
- [10] 胡春丽,李辑,王婉昭,等. 辽宁省春播期降水的时空特征及其对土壤水分的影响[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 55-60, 72.
- [11] Yang Lingbin, Sun Guoqing, Zhi Lu, et al. Negative soil moisture-precipitation feedback in dry and wet regions[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4026.
- [12] Piao Shilong, Yin Lei, Wang Xuhui, et al. Summer soil moisture regulated by precipitation frequency in China[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 044012.
- [13] 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1): 42-45.
- [14] 周小雪,王立,蔡国军,等. 干旱半干旱地区土壤水分变化特征[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(9): 8-10.
- [15] 朱德兰,吴发启. 不同地形部位土壤水分的年变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 31-34.

(下转第 84 页)

- 体系作物产量和重金属平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 237-242.
- [6] 邵金秋, 刘楚琛, 阎秀兰, 等. 河北省典型污灌区农田镉污染特征及环境风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 917-927.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [8] Yun S W, Baveye P C, Kim D H, et al. Analysis of metal(loid)s contamination and their continuous input in soils around a zinc smelter: Development of methodology and a case study in South Korea[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 140-149.
- [9] Torralba-Sanchez T L, Kuo D T F, Allen H E, et al. Bioconcentration factors and plant-water partition coefficients of munitions compounds in barley[J]. *Chemosphere*, 2017, 189: 538-546.
- [10] 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 等. 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4348-4358.
- [11] 景若瑶, 崔二革, 樊向阳, 等. 不同钾肥对再生水灌溉条件下土壤—作物系统 Cd 的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 328-333, 339.
- [12] 司友斌, 王娟. 异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3533-3542.
- [13] 袁兴超, 李博, 朱仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 807-817.
- [14] 和君强, 贺前锋, 刘代欢, 等. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型: 以长沙某地水稻土为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1181-1194.
- [15] 王沛裴, 郑顺林, 万年鑫, 等. 有机肥对 Pb、Cd 污染下马铃薯生长及土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 659-663.
- [16] 陈秀玲, 张磊, 王凯荣. 不同铁营养状况下间作小麦对花生吸收 Cd 的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 257-261, 265.
- [17] Liang Chuangzhou, Xiao Haijun, Hu Ziqi, et al. Uptake, transportation, and accumulation of C60 fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 330-338.
- [18] Wang Zhenghai, Qin Haoyang, Liu Xinyun. Health risk assessment of heavy metals in the soil-water-rice system around the Xiazhuang uranium mine, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5904-5912.

(上接第 77 页)

- [16] 王合云, 郭建英, 李红丽, 等. 短花针茅荒漠草原不同退化程度的植被特征[J]. 中国草地学报, 2015, 37(3): 76-81.
- [17] 王安琪, 刘桂香, 李小娟. 基于 TM 影像的内蒙古达茂旗草地景观格局动态分析[J]. 中国草地学报, 2009, 31(5): 30-36.
- [18] 刘华琳, 焦瑞, 徐晓民. 干旱草原区达茂旗天然植被生态需水量研究[J]. 科技传播, 2014, 6(22): 154-155.
- [19] 姚淑霞, 张铜会, 赵传成, 等. 科尔沁地区不同类型沙地土壤水分的时空异质性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 253-256, 260.
- [20] Yao Shuxia, Zhao Chuancheng, Zhang Tonghui, et al. Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia, northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 97: 92-98.
- [21] 刘冰, 赵文智, 常学向, 等. 黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 716-722.
- [22] 何志斌, 赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-362.
- [23] 陈娟, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 20-25.
- [24] 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 4-9.
- [25] 刘华琳, 徐晓民, 焦瑞, 等. 达茂旗草原植被生态与地下水覆盖量风险研究[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(4): 44-46.
- [26] 刘华琳, 徐晓民, 焦瑞. 基于 GIS 的地下水及其环境问题分析[J]. 科技创新论坛, 2013(14): 144-145.
- [27] 王明明, 刘新平, 李玉霖, 等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 54-61.
- [28] 殷建华. 南方红壤丘陵区不同植被类型土壤不同土层水分对降水的响应[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(11): 74-79.
- [29] 常昌明, 牛建明, 王海, 等. 小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 260-265.
- [30] 张凯, 冯起, 吕永清, 等. 民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分异研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1149-1155.