

DOI:10.11686/cyxb2024069

<http://cyxb.magtech.com.cn>

滕远, 马兵, 吴贤忠, 等. 黄土区深厚土壤严重干化后再植苜蓿地的土壤水分入渗特征. 草业学报, 2025, 34(1): 66—79.

TENG Yuan, MA Bing, WU Xian-zhong, *et al.* Characteristics of soil water infiltration in replanted alfalfa plots after severe drying of deep soil horizons in loess areas. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 66—79.

黄土区深厚土壤严重干化后再植苜蓿地的土壤水分入渗特征

滕远^{1,2}, 马兵^{1,2}, 吴贤忠³, 汪星^{1,2*}, 吕雯⁴, 任鸿武¹, 汪治同⁵

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 林木资源高效生产全国重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. 兰州城市学院城市环境学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 5. 阿拉善左旗宗别立镇综合保障和技术推广中心, 内蒙古 阿拉善左旗 750300)

摘要: 自然降水是半干旱黄土区土壤水分的唯一来源。为了探究黄土丘陵区深厚土壤干化背景下再种植深根系、多年生植物后的土壤水分入渗对降雨的响应特征, 本研究在宁夏南部王洼水土保持试验站采用野外实地大规格土柱模拟干燥化土壤的方法种植苜蓿, 试验分析 2022—2023 年每年的 3—10 月定位观测数据。结果表明: 1) 能有效产生土壤水分入渗的降雨次数仅占总降雨次数的 41.67%, 降雨量与入渗量占比为: 小雨入渗量占其降雨量的 15.89%, 中雨入渗量占其降雨量的 35.63%, 大雨入渗量占其降雨量的 52.20%, 暴雨入渗量占其降雨量的 61.50%, 入渗量随着降雨量的增大呈增大的趋势; 2) 降雨入渗深度小于 30 cm 的降雨次数占总降雨次数的 76.04%, 入渗深度在 30~80 cm 的降雨次数占总降雨次数的 18.75%, 入渗深度在 80 cm 以上的降雨次数占总降雨次数的 5.21%; 3) 深层土壤干化背景下种植苜蓿, 一龄苜蓿地月尺度土壤剖面水分呈现增加趋势, 二龄苜蓿地月尺度土壤剖面水分呈减小趋势, 逐月降雨入渗深度 (Z_m) 随月降雨量 (P_m) 增加呈二次函数增大变化: $Z_m = -0.0101P_m^2 + 3.9426P_m$ ($R^2 = 0.9895$)。本研究可为黄土高原区深厚土壤严重干化后再植深根系、多年生植物及其可持续发展提供理论与数据支撑。

关键词: 黄土区; 土壤干化; 苜蓿; 土壤水分; 降雨入渗

Characteristics of soil water infiltration in replanted alfalfa plots after severe drying of deep soil horizons in loess areas

TENG Yuan^{1,2}, MA Bing^{1,2}, WU Xian-zhong³, WANG Xing^{1,2*}, LYU Wen⁴, REN Hong-wu¹, WANG Zhi-tong⁵

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750021, China; 3. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 4. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 5. Alxa Left Banner Zongbieli Town Comprehensive Security and Technology Promotion Center, Alxa Left Banner 750300, China

Abstract: Natural precipitation is the only water source in the semi-arid loess region. This research investigated the characteristics of soil water infiltration following precipitation after replanting deep-rooted, perennial plants in soil with severely depleted moisture levels in the hilly areas of the Loess Plateau. Specifically, the research simulated the cultivation of *Medicago sativa*, using large-scale soil columns (lysimeters) at the Wangwa Soil and Water Conservation Experiment Station in southern Ningxia. The simulation experiment was based on actual rainfall data

收稿日期: 2024-03-05; 改回日期: 2024-04-22

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC05019)和国家自然科学基金项目(32060301, 32260422)资助。

作者简介: 滕远(1995—), 男, 山东费县人, 在读硕士。E-mail: tengyuan95@foxmail.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xingwang1984@foxmail.com

from March to October in 2022–2023. The results indicated that: 1) Only 41.67% of all precipitation events resulted in soil water infiltration. The ratio of infiltration to precipitation varied with rainfall intensity: in light rain, moderate rain, heavy rain and torrential rain the infiltration was, respectively, 15.89%, 35.63%, 52.20% and 61.50% of the total precipitation. Infiltration amounts thus showed an increasing trend with increasing precipitation. 2) Precipitation infiltrating to depths of less than 30 cm, to depths of 30–80 cm, and to depths greater than 80 cm, accounted for, respectively, 76.04%, 18.75% and 5.21% of the total precipitation. 3) With respect to the issue of deep soil water depletion, alfalfa cultivation led to a trend of soil water increase in soil water measured monthly for one year old plants, while for two year old plants, soil water measured monthly showed a decreasing trend. The monthly infiltration depth (Z_m) increased with increasing monthly precipitation (P_m) as a quadratic function: $Z_m = -0.0101P_m^2 + 3.9426P_m$ ($R^2 = 0.9895$). The study provides data on deep soil water status, useful for planning the replanting and sustainable development of deep-rooted, perennial plants in areas on the Loess Plateau with severely dried deeper soil horizons.

Key words: loess soil region; soil drying; alfalfa; soil water; precipitation infiltration

土壤水分在干旱和半干旱地区的植物生存中起着至关重要的作用,是陆地生态系统水循环过程的重要组成部分。在降水量少、植物蒸腾量大、人为扰动剧烈等因素的共同作用下,黄土高原人工林草地土壤水分长期处于负平衡状态,土壤干燥化日趋严重,土壤干层的空间分布范围持续增大^[1–2]。黄土高原人工林草植被下的规模化土壤干层隔断了地下水补给路径^[3],导致原本脆弱的土壤水分生态更加恶化,不仅加重了现有植被生长衰败,而且已经产生后续深根系、多年生植被更替的严重阻碍^[4]。人工林草植被下的土壤形成干层后,其水分循环极具区域特殊性,深厚的土壤干层已经成为黄土高原生态环境建设中最棘手的问题^[5–6]。

黄土高原土层深厚,目前研究证明人工林草植被下的土壤干层深达 1000 cm,甚至 2000 cm^[7–8]。由于自然降水是该地区土壤水分的唯一来源,所以一旦深厚土层形成干层后很难恢复^[9],王志强等^[10]在绥德的研究得出人工林死亡或被砍伐开垦成农地后,土壤含水量大约需要 40 a 时间才能恢复到持续农地的水平。王力等^[11]研究认为土壤干层会导致土地退化,林草植被生长衰退,提早老化。邵明安等^[2]提出土壤干层的形成会阻碍陆地生态系统中的生物小循环、削弱水文大循环,严重影响当前植被建设成效和区域生态稳定。侯庆春等^[12]研究发现人工林草植被衰败后,深层土壤水分难以快速恢复,重新造林种草就有很大的难度。多年来研究人员对人工林草地土壤深层干化后再种植农作物研究较多,基本结论为黄土高原人工林草地深层土壤干化背景下恢复农作物种植影响较小^[13–14]。但是,人工林草地深层土壤干化后是否对后期更新深根系、多年生植物产生严重影响的试验研究较为薄弱。近年来,田璐等^[15]、汪星等^[16]、张敬晓等^[17]和周玉红等^[18]在榆林米脂县通过野外模拟试验对深层土壤严重干化后地面不同覆盖包括种植柠条(*Caragana korshinskii*)、枣树(*Ziziphus jujuba*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等进行了研究,初步提出在 430 mm 年降水量情况下,黄土高原人工林草地土壤深层干化后再种植植物前 3 年没有显著影响的观点。但由于相关研究报道很少,还缺乏充分的研究证明形成土壤干层后深根系植物再植能否正常生长,尤其是植物再植后在自然降雨条件下土壤水分的响应至今仍缺乏深入研究,亟待加强。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是典型多年生豆科植物,其根系发达,抗旱、耐旱能力强,是黄土高原区重要的牧草资源和主要的退耕还草植物之一^[19]。本研究在宁南黄土丘陵区的彭阳王洼水土保持试验站进行了 28 a 人工柠条林伐后再种植苜蓿试验,探讨深厚土层干化后再种植苜蓿情况下土壤剖面水分对降雨的响应特征,该研究对黄土丘陵区林草植被再建造与可持续利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市彭阳县王洼镇小流域内(106.65° E, 36.10° N),海拔 1882 m,年平均气温 8.6 °C、日照时数 2590 h·a⁻¹、平均降水量 480 mm·a⁻¹,无霜期 150 d·a⁻¹。0~300 cm 土壤容重的平均值为 1.33 g·

cm^{-3} , 土壤凋萎系数为 7.12%, 地貌类型为典型的黄土高原梁峁丘陵地, 区内梁峁相间, 地形支离破碎、沟壑纵横, 土壤类型以黄绵土与黑垆土为主(图 1)。研究区内人工种植苜蓿为雨养旱作, 研究样地为缓坡生长苜蓿地。自然植被类型由灌木草原向典型草原过渡, 原生植物多以低矮禾草为主, 并伴有少量灌木, 代表性植被有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)等, 人工植被主要有柠条锦鸡儿、苜蓿、山桃(*Amygdalus davidiana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等。其中苜蓿以产量高、草质优良成为彭阳县助农植物, 非常适用于家畜饲养, 彭阳县苜蓿总种植面积稳定在 8 万 hm^2 。

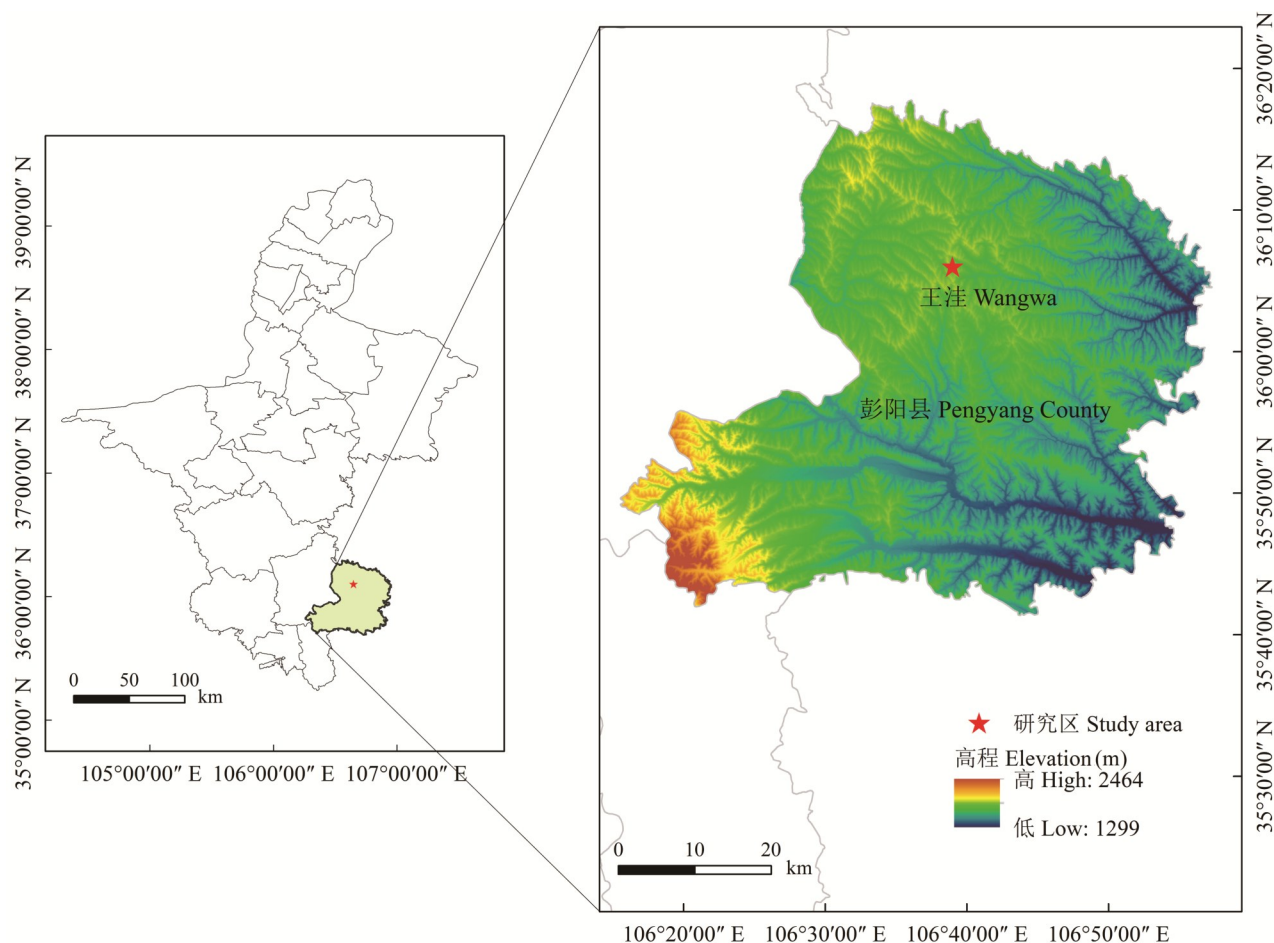


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

基于自然资源部标准地图服务网站中 GS(2019)1822 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website of the Ministry of Natural Resources with the drawing review No. GS(2019)1822, the boundary of the base map was not modified.

1.2 样地设置

试验样地选取在王洼水土保持试验站附近的 28 a 柠条林地, 柠条伐后采用开挖回填的方式构建地下土柱, 土柱规格为 300 cm × 300 cm × 600 cm 的矩形柱体。土柱布设过程中注意严格控制观测指标, 以最大限度模拟真实的柠条林地深层干化土壤, 开挖过程中, 将开挖土按层分别堆放, 以便后期按层回填, 开挖结束后, 回填过程中, 在土柱周围铺设一层厚约 1 mm 的隔水布, 将土柱土壤与外界土壤隔离, 避免入渗过程中水分向周围交流扩散, 土壤容重尽量与原状土保持一致, 控制在 $(1.3 \pm 0.5) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 并逐层压实, 形成地下土柱。土柱于 2021 年 8 月建成, 2021 年 8 月—2022 年 4 月为自然沉降期, 以消除回填所产生的误差, 同样处理 3 个重复。2022 年为苜蓿种植第一年。

1.3 土壤水分与降雨监测

试验采用 CS 650 型土壤水分探头 (Campbell Scientific, 美国) 对土壤水分进行监测, 按照土壤深度共计埋设 39 个水分探头, 0~300 cm 探头间隔 10 cm, 300~360 cm 探头间隔 20 cm, 360~600 cm 探头间隔 40 cm (图 2)。探头每隔 1 h 自动测定一次土壤水分, 每 3 个月对土壤水分探头进行一次校正。在土柱外侧安装 CR 1000 数据采集器 (Campbell Scientific, 美国), 与柱体内的水分探头相连, 以定时记录各探头数据。

降雨量由彭阳县王洼气象观测场 BLJW-4 气象站 (北京博伦经纬公司, 中国) 进行测定, 气象站布设在试验土柱西侧 200 m 处, 气象站详细记录了每个降雨事件的开始时间、持续时间和降雨量。

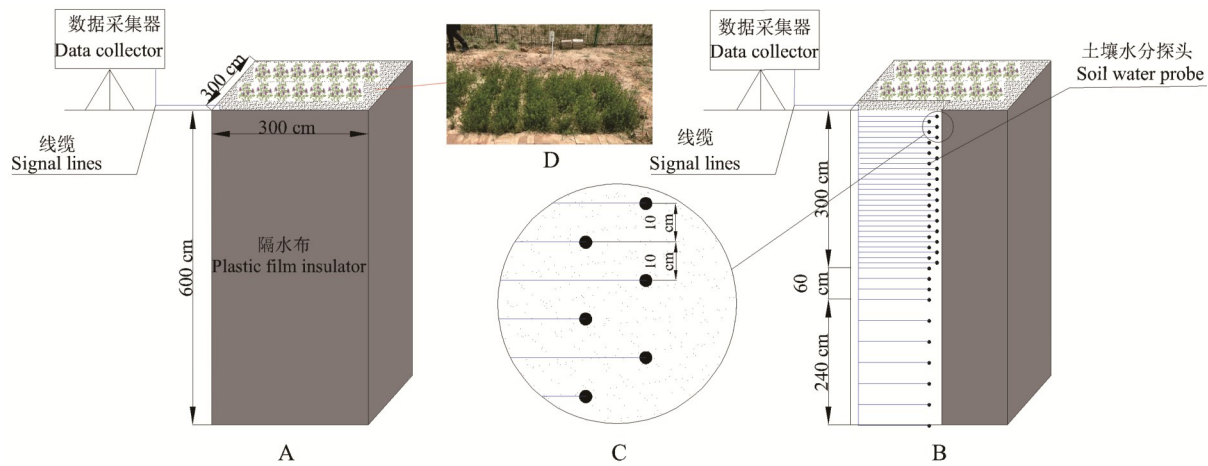


图 2 土壤水分探头布置

Fig. 2 The arrangement of the soil water probes

A 是原位测试苜蓿地土壤水分监测柱状示意图, 周围有 600 cm 深的防水土工布隔离外围水分与植物根系干扰; B 是土壤水分探头布设剖面示意图; C 是水分探头布局局部放大示意图, 为了减小水分探头之间互相干扰每个土壤水分探头按照左右摆动安装; D 是土柱表面种植的苜蓿实拍图。A is a histogram of *in-situ* test of soil water monitoring in alfalfa field. There are 600 cm deep plastic film around to isolate the interference of peripheral water and plant roots; B is a schematic diagram of soil water probe layout profile; C is the local amplification diagram of the water probe layout. In order to reduce the mutual interference between the water probes, each soil water probe is installed according to the left and right swing; D is the actual photograph of alfalfa planted on the surface of the soil column.

1.4 研究区降雨特征

试验期间降雨统计表明, 2022 年 3 月—2023 年 10 月苜蓿生长季内共发生降雨 96 次, 总降雨量为 724.00 mm, 据中国气象局资料, 按照降雨量级 (小雨: 0~9.9 mm; 中雨: 10.0~24.9 mm; 大雨: 25.0~49.9 mm; 暴雨: >50.0 mm)^[20] 将降雨次数和降雨量分类统计见表 1。小雨降雨次数为 75 次, 降雨次数最多, 占总降雨次数的 78.13%, 降雨量为 256.40 mm, 占总降雨量的 35.41%, 平均降雨量为 3.42 mm, 平均降雨历时为 5.21 h; 中雨降雨次数为 16 次, 占总降雨次数的 16.67%, 降雨量为 256.60 mm, 占总降雨量的 35.44%, 平均降雨量为 16.04 mm, 平均降

表 1 不同降雨类型特征

Table 1 Characteristics of different precipitation type

降雨类型 Precipitation type	降雨次数 Number of precipitations	累计降雨量 Cumulative precipita- tion (mm)	平均降雨量 Average precipita- tion (mm)	累计降雨历时 Cumulative precipita- tion time (h)	平均降雨历时 Average precipitation time (h)	平均降雨强度 Average precipitation intensity (mm·h ⁻¹)
小雨 Light rain	75	256.40	3.42	390.83	5.21	0.66
中雨 Moderate rain	16	256.60	16.04	259.67	16.23	0.99
大雨 Heavy rain	4	138.80	34.70	38.42	9.61	3.61
暴雨 Torrential rain	1	72.20	72.20	14.25	14.25	5.07

雨历时为 16.23 h;大雨降雨次数为 4 次,占总降雨次数的 4.17%,降雨量为 138.80 mm,占总降雨量的 19.17%,平均降雨量为 34.70 mm,平均降雨历时为 9.61 h;暴雨降雨次数为 1 次,占总降雨次数的 1.04%,降雨量为 72.20 mm,占总降雨量的 9.97%,降雨历时为 14.25 h。监测期内从降雨类型特征来看,研究区流域的降雨类型主要为历时短、雨量小的低强度降雨。

1.5 指标判定与计算

1)降雨入渗深度:对比降雨始、末时刻干化土壤水分状况,土壤水分增加的深度即为降雨入渗深度。

2)月累积入渗深度:以试验布设初期土壤剖面体积含水量为初始状态,判断各月末土壤剖面水分增量范围为月累积入渗深度。

3)土壤水分入渗量:

$$I(t) = \int_0^L [\theta(z, t_s) - \theta(z, t_0)] dz$$

式中: $I(t)$ 为入渗量(mm), $\theta(z, t_s)$ 为时段末土壤体积含水量(%), $\theta(z, t_0)$ 为时段初土壤体积含水量(%), L 为土层厚度(mm)。

1.6 数据分析

使用 SPSS 27.0 进行数据处理与统计分析,采用 Origin 2024 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 典型降雨下的土壤水分入渗特征

2.1.1 小雨下的土壤水分入渗 2023 年 4 月 2 日发生的 8.40 mm 降雨,历时 12.50 h,降雨强度 $0.67 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,初始平均土壤含水量为 18.86%,降雨结束时表层 10 cm 土壤含水量由 18.81% 提升至 20.40%,10~20 cm 土层平均土壤含水量由降雨前的 18.74% 增加到 19.54%,入渗深度为 20 cm(图 3a);由土壤水分入渗量公式计算得出,入渗土壤水分 1.59 mm,是降雨量的 18.93%;雨后 12 h,表层 10 cm 土壤含水量降低至 19.30%,同时土壤水分有少量下渗至 30 cm 处,10~30 cm 平均土壤含水量由 18.73% 增加到 18.96%(图 3b);雨后 21 h 表层 10 cm 土壤水分恢复至雨前水平的 18.81%(图 3c);雨后 32 h,10 cm 土层土壤水分低于雨前水平,降至 18.50%(图 3d)。2023 年 7 月 20 日发生的 8.80 mm 降雨,历时 6.50 h,降雨强度 $1.35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,初始平均土壤含水量为 17.56%,降雨结束时表层 10 cm 土壤含水量由 18.00% 提升至 19.85%,10~20 cm 土层平均土壤含水量由 17.88% 增加至 18.80%,入渗土壤水分 1.85 mm,是降雨量的 21.02%,在降雨历时内入渗深度为 20 cm;雨后 10 h,表层 10 cm 土壤含水量降低至 18.70%;雨后 19 h,表层 10 cm 土壤水分恢复至雨前水平;雨后 30 h,10~20 cm 土层土壤水分已低于雨前水平(图 3e~h)。

通过以上分析看出,小雨入渗深度较小,最大入渗深度在 30 cm,小雨下的入渗水分受蒸发作用明显,降雨停止后土壤水分全部被蒸发损耗,无显著增加($P > 0.05$,表 2),对于深层干化土壤不能形成水分补给,为无效降雨。

2.1.2 中雨下的土壤水分入渗 2023 年 8 月 25 日发生的 17.00 mm 降雨,历时 11.25 h,降雨强度 $1.51 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,初始平均土壤含水量为 17.50%,降雨结束时表层 10 cm 土壤含水量由 17.45% 提升至 21.22%,10~40 cm 土层平均土壤含水量由 17.44% 增加至 18.95%,在降雨历时内土壤水分入渗深度达到 40 cm(图 4a),由土壤水分入渗量公式计算得出,入渗土壤水分 6.07 mm,是降雨量的 35.68%;雨后 28 h,入渗深度达到最大,入渗到 50 cm,10~50 cm 土层土壤平均含水量由雨前 17.46% 增加至 18.11%(图 4b);雨后 40 h,10 cm 土壤水分快速降低,恢复至雨前水平,下层土壤中大量水分向上运输被蒸发损耗,仅有少量水分继续向下运移(图 4c);雨后 54 h,土壤水分持续被苜蓿生长消耗和向上层运移被蒸发消耗,10 cm 土壤水分已低于雨前水平,20 和 30 cm 土壤水分完全恢复至雨前水平,40~50 cm 土层平均含水量为 17.51%,较降雨前的 17.41% 仍提高 0.10%(图 4d)。2023 年 9 月 27 日发生的 20.80 mm 降雨,历时 12.00 h,降雨强度 $1.73 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,初始平均土壤含水量为 16.96%(表 3),降雨结束时表层 10 cm 土壤含水量由 16.78% 提升至 20.68%,10~50 cm 土层平均土壤含水量由 16.77% 增加至 18.42%,

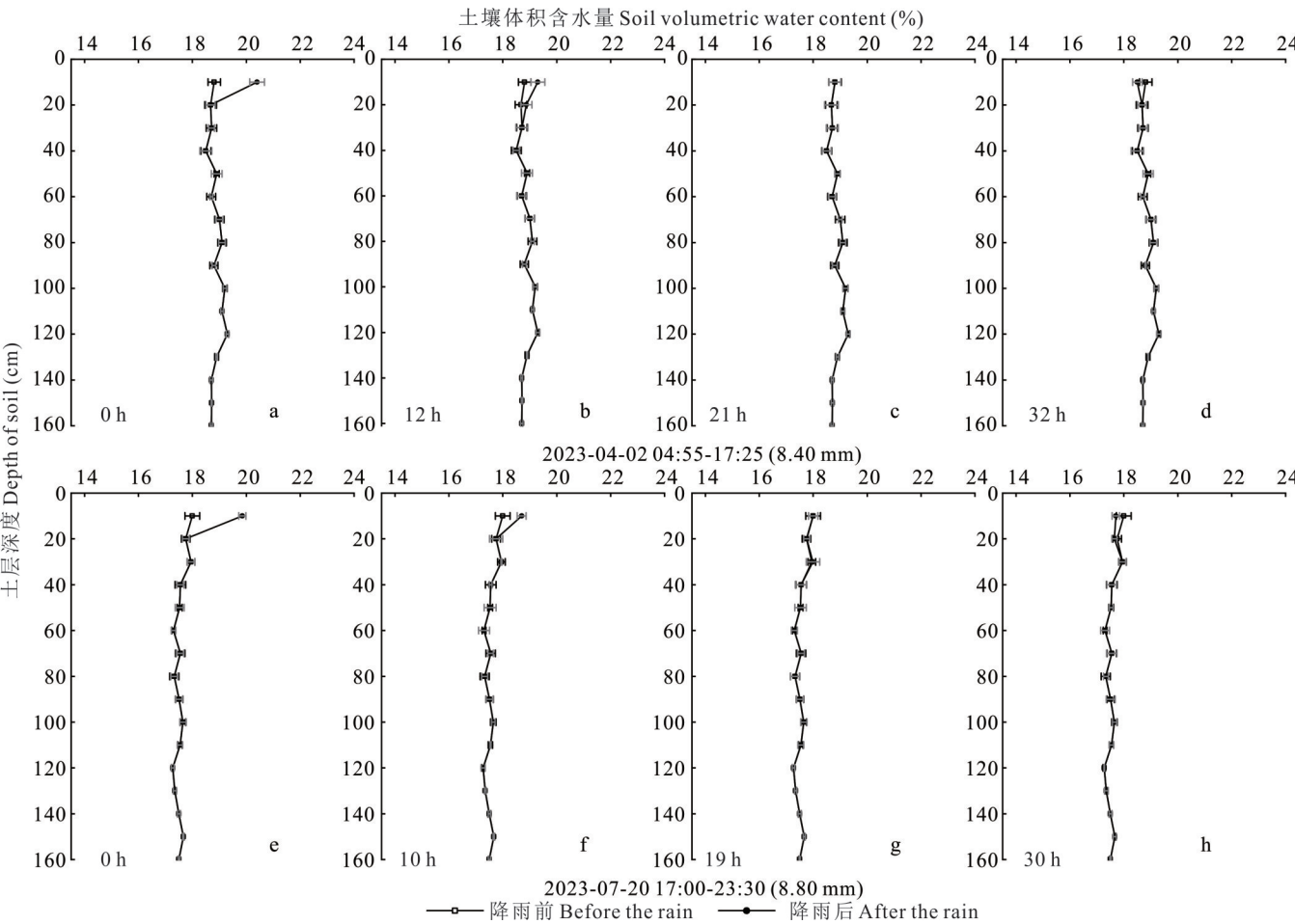


图3 小雨下土壤水分变化
Fig. 3 Soil water changes in light rain

表 2 小雨降雨信息
Table 2 Light rain information

日期 Date	雨型 Rain type	降雨量 Precipitation (mm)	平均土壤体积含水量 Average soil volumetric water content (%)							
			降雨前 Before the rain	降雨结束 At the end of the rain	雨后 12 h 12 hours after the rain	雨后 21 h 21 hours after the rain	雨后 32 h 32 hours after the rain	雨后 10 h 10 hours after the rain	雨后 19 h 19 hours after the rain	雨后 30 h 30 hours after the rain
2023-04-02	小雨 Light rain	8.40	18.86±0.13a	18.96±0.11a	18.90±0.13a	18.86±0.12a	18.84±0.12a	—	—	—
2023-07-20	小雨 Light rain	8.80	17.56±0.12a	17.68±0.11a	—	—	—	17.60±0.10a	17.56±0.14a	17.53±0.10a

同行不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same row indicate significant differences at the 0.05 level. —: 空值 Empty value. 下同 The same below.

入渗土壤水分 8.23 mm,是降雨量的 39.56%,在降雨历时内土壤水分入渗深度达到 50 cm;雨后 32 h,水分将继续向下层土壤运移,入渗深度达到最大,入渗到 60 cm;雨后 58 h,10 cm 土壤水分恢复至雨前水平;雨后 72 h,10 和 20 cm 土壤水分已低于雨前水平,30 cm 土壤水分恢复至雨前水平,40~60 cm 土层平均含水量为 16.96%,较降雨前 16.81% 仍提高 0.15%(图 4e~h)。

通过以上分析看出,中雨较小雨来说在土壤中入渗深度更大、储蓄时间更长,入渗深度可达 60 cm,但由于苜蓿生长耗水和地表蒸发,降雨结束后 54 和 72 h,大部分土壤水分被损耗,分别较两次降雨前无显著增加($P>0.05$,表 3),难以对深层干化土壤形成补给,但雨量带来的水分会有效补给苜蓿根系吸收利用。

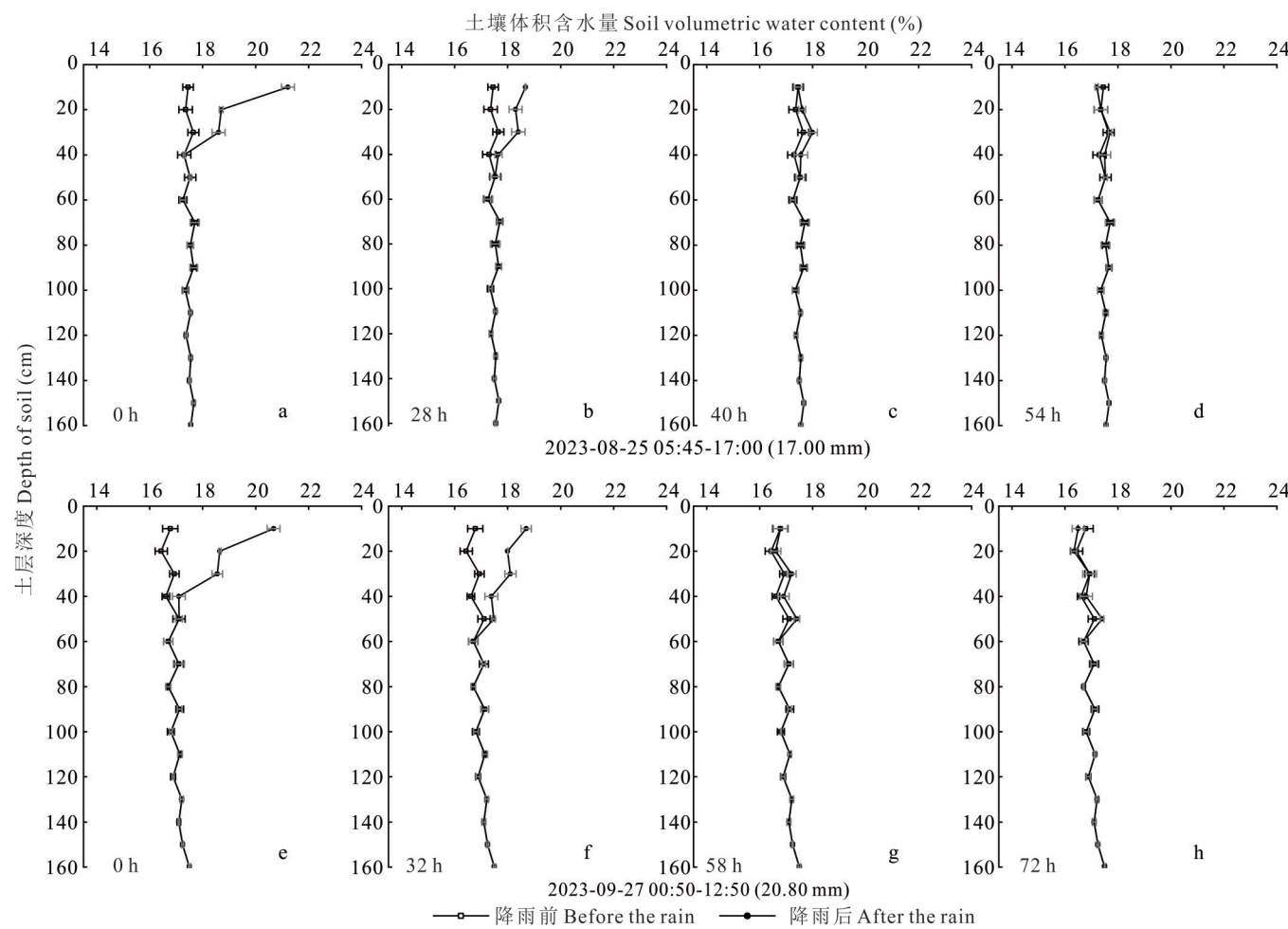


图4 中雨后土壤水分变化

Fig. 4 Soil water changes in moderate rain

表3 中雨降雨信息

Table 3 Moderate rain information

日期 Date	雨型 Rain type	降雨量 Precipitation (mm)	平均土壤体积含水量 Average soil volumetric water content (%)							
			降雨前 Before the rain	降雨结束 At the end of the rain	雨后 28 h 28 hours after the rain	雨后 40 h 40 hours after the rain	雨后 54 h 54 hours after the rain	雨后 32 h 32 hours after the rain	雨后 58 h 58 hours after the rain	雨后 72 h 72 hours after the rain
2023-08-25	中雨	17.00	17.50±	17.87±	17.70±	17.55±	17.50±	—	—	—
	Moderate rain		0.13b	0.10a	0.13ab	0.14ab	0.11b			
2023-09-27	中雨	20.80	16.96±	17.47±	—	—	—	17.32±	17.02±	16.96±
	Moderate rain		0.14c	0.12a				0.11ab	0.12bc	0.10c

2.1.3 大雨和暴雨下的土壤水分入渗 2023年7月11日发生的27.80 mm降雨,历时10.00 h,降雨强度2.78 mm·h⁻¹,初始平均土壤含水量为17.76%(表4),降雨结束时,10~50 cm以上土层平均含水量由17.54%增加到20.45%,50 cm以下土层无变化,此时土壤水分入渗深度为50 cm(图5a),由土壤水分入渗量公式计算得出,入渗土壤水分14.56 mm,是降雨量的52.37%;降雨结束后,水分继续向下层运移渗透,雨后55 h水分入渗深度达到最大,约为80 cm,70~80 cm平均土壤含水量由17.76%增加至17.96%(图5b);表层土壤水分继续被蒸发和被苜蓿消耗,土壤含水量不断降低,下层土壤水分则在水势梯度作用下一方面大量向上运移补充,另一方面继续向深层运移,雨后79 h,表层20 cm以上土层含水量已经完全恢复至雨前水平,而20~80 cm土层平均含水量为

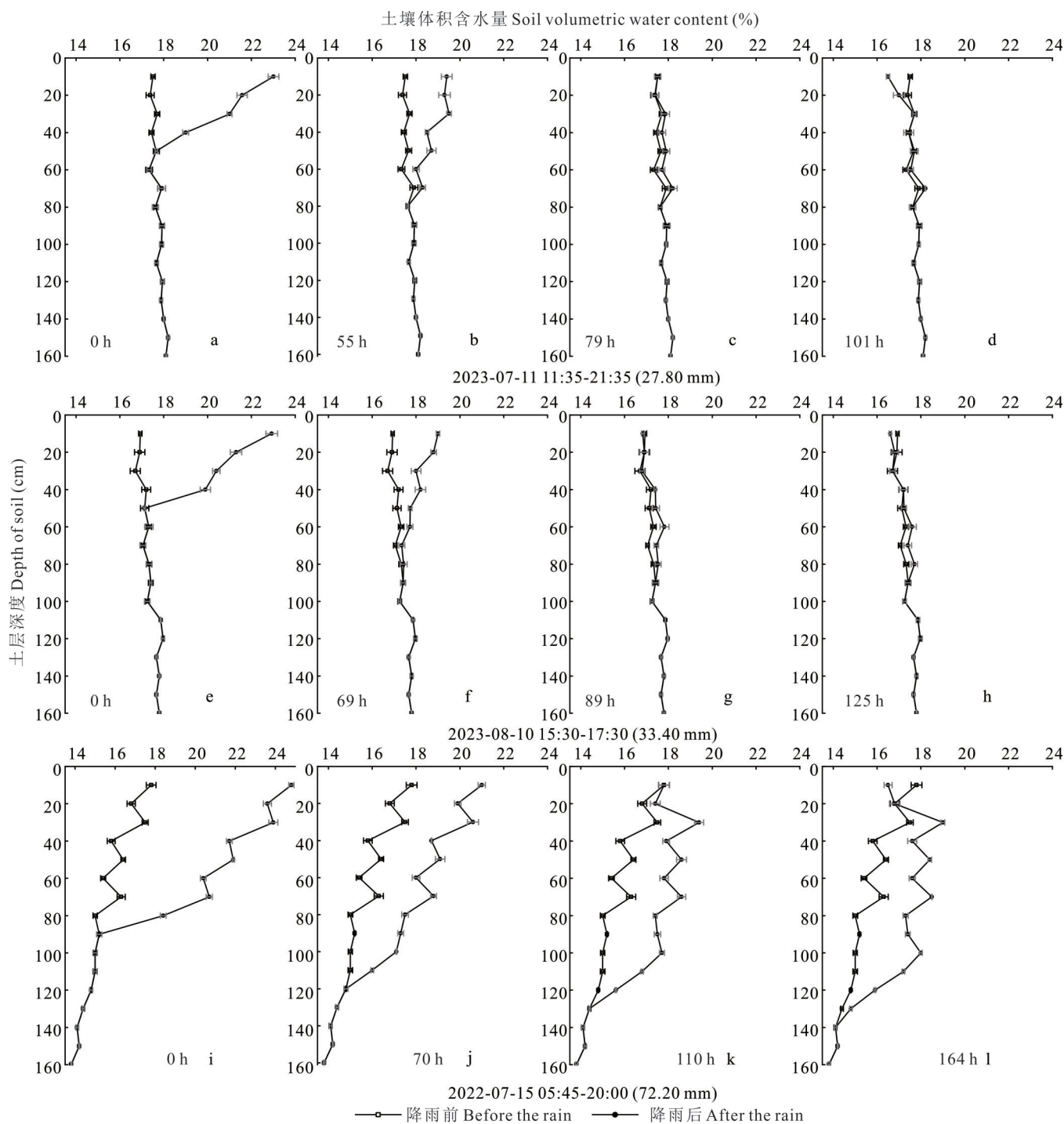


图5 大雨和暴雨下土壤水分变化

Fig. 5 Soil water changes in heavy and torrential rain

18.56%,较雨前17.58%仍有提升(图5c);随着时间推移,上层土壤水分持续消耗,至雨后101 h,10和20 cm土壤含水量已低于降雨前水平,30、40和50 cm土层土壤含水量完全恢复至雨前水平,50~80 cm深度土层平均土壤含水量为17.76%,较雨前17.63%增加0.13%,此场降雨有效入渗深度为80 cm(图5d)。2023年8月10日发生的33.40 mm降雨,历时2 h,降雨强度 $16.70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,初始平均土壤含水量为17.37%(表4),降雨结束时表层10 cm土壤含水量由16.93%提升至22.93%,10~50 cm土层平均土壤含水量由16.97%增加至20.33%,入渗土壤水分16.80 mm,是降雨量的50.30%,降雨结束时土壤水分入渗深度为50 cm;雨后69 h水分入渗深度达到最大,为90 cm;雨后89 h,表层20~30 cm土壤含水量已经完全恢复至雨前水平,10 cm土层含水量已经低于降雨前水平,

表4 大雨降雨信息

Table 4 Heavy rain information

日期 Date	雨型 Rain type	降雨量 Precipitation (mm)	平均土壤体积含水量 Average soil volumetric water content (%)							
			降雨前 Before the rain	降雨结束 At the end of the rain	雨后 55 h 55 hours after the rain	雨后 79 h 79 hours after the rain	雨后 101 h 101 hours after the rain	雨后 69 h 69 hours after the rain	雨后 89 h 89 hours after the rain	雨后 125 h 125 hours after the rain
2023-07-11	大雨 Heavy rain	27.80	17.76± 0.10c	18.67± 0.12a	18.31± 0.11b	17.84± 0.11c	17.71± 0.11c	—	—	—
2023-08-10	大雨 Heavy rain	33.40	17.37± 0.10c	18.42± 0.12a	—	—	—	17.85± 0.11b	17.47± 0.11c	17.41± 0.12c

而 30~90 cm 土层平均含水量较雨前还有提升;雨后 125 h, 10 和 20 cm 土壤含水量已低于降雨前水平, 30 和 40 cm 土层土壤含水量完全恢复至雨前水平, 40~90 cm 深度范围内平均土壤含水量较雨前增加 0.18%, 此场降雨有效入渗深度为 90 cm(图 5e~h)。

2022 年 7 月 15 日发生的 72.20 mm 降雨, 历时 14.25 h, 降雨强度 $5.10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 初始平均土壤含水量为 15.47%(表 5), 降雨结束时表层 10 cm 土壤含水量由 17.80% 提升至 24.80%, 10~90 cm 土层平均土壤含水量由 16.24% 增加至 21.18%(图 5i), 由土壤水分入渗量公式计算得出, 入渗土壤水分 44.40 mm, 是降雨量的 61.50%, 此时土壤水分入渗深度为 90 cm; 降雨结束后, 水分继续向下层运移渗透, 雨后 70 h 水分入渗深度达到 120 cm, 10~120 cm 平均土壤含水量由 15.92% 增加至 18.23%(图 5j); 表层土壤水分继续被蒸发和被苜蓿消耗, 土壤含水量不断降低, 下层土壤水分则在水势梯度作用下一方面大量向上运移补充, 另一方面继续向深层运移, 雨后 110 h, 10 cm 土层含水量已经恢复至雨前水平, 而 20~140 cm 土层平均含水量为 17.17%, 较雨前 15.52% 仍有提升(图 5k); 随着时间推移, 上层土壤水分持续消耗, 至雨后 164 h, 10 cm 以上土层含水量已低于降雨前水平, 20 cm 土层含水量恢复至雨前水平, 30~140 cm 深度土层平均土壤含水量为 17.15%, 较雨前 15.41% 增加 1.74%, 此场降雨有效入渗深度为 140 cm(图 5l)。

通过以上分析看出, 大雨的最大入渗深度可达 80 cm, 与中雨相比, 入渗深度进一步提高, 虽然最大入渗深度已经超越了蒸发影响深度, 但其还受苜蓿根系吸收消耗的影响, 在降雨结束后 101 和 125 h, 土壤水分分别与两次降雨前相比无显著增加($P>0.05$, 表 4), 因此入渗有效补给程度有限; 暴雨的最大入渗深度可达 140 cm, 即使在降雨结束 164 h 后, 土壤水分较雨前有显著增加($P<0.05$, 表 5), 入渗有效补给较大雨进一步提高。

表5 暴雨降雨信息

Table 5 Torrential rain information

日期 Date	雨型 Rain type	降雨量 Precipitation (mm)	平均土壤体积含水量 Average soil volumetric water content (%)				
			降雨前 Before the rain	降雨结束 At the end of the rain	雨后 70 h 70 hours after the rain	雨后 110 h 110 hours after the rain	雨后 164 h 164 hours after the rain
2022-07-15	暴雨 Torrential rain	72.20	15.47±0.11d	18.25±0.12a	17.21±0.11b	16.81±0.14c	16.69±0.11c

2.2 逐次降雨入渗深度变化特征

在监测期内(2022 年 3 月—2023 年 10 月), 累计发生降雨 96 次(图 6)。其中, 入渗深度没有达到 10 cm 的降雨有 56 次, 占总降雨次数的 58.33%, 累计降雨量为 124.20 mm, 占总降雨量的 17.15%; 入渗深度达到 20 cm 的降雨有 17 次, 占总降雨次数的 17.71%, 累计降雨量为 114.20 mm, 占总降雨量的 15.77%; 入渗深度达到 30 cm 的降雨有 2 次, 占总降雨次数的 2.08%, 累计降雨量为 18.00 mm, 占总降雨量的 2.49%; 入渗深度达到 40 cm 的降雨有 8 次, 占总降雨次数的 8.33%, 累计降雨量为 96.40 mm, 占总降雨量的 13.31%; 入渗深度达到 50 cm 的降雨有 3 次, 占总降雨次数的 3.13%, 累计降雨量为 52.00 mm, 占总降雨量的 7.18%; 入渗深度达到 60 cm 的降雨有 5

次, 占总降雨次数的 5.21%, 累计降雨量为 108.20 mm, 占总降雨量的 14.94%; 入渗深度达到 80、90、100、110 cm 的降雨各有 1 次, 各占总降雨次数的 1.04%; 最大入渗深度达到 140 cm, 降雨量为 72.2 mm, 占总降雨量的 9.97%。通过回归分析表明, 逐次降雨入渗深度(Z)随逐次降雨量(P)增加呈二次函数递增变化: $Z = -0.0228P^2 + 3.6910P$ ($R^2 = 0.9588$)。入渗深度产生的变化受到降雨量、气温以及苜蓿生长所需水分等多种因素的共同影响, 逐次降雨入渗深度能够显著地反映降雨入渗的有效性。

2.3 月尺度下的降雨入渗变化特征

月尺度下自然降雨引发的入渗响应存在一定变化。7—9 月为降雨丰沛阶段, 其他月份降雨较少, 2 年内月尺度降雨下, 月入渗量和月蒸散量随着月降雨量的波动而变化, 整体差异显著 ($P < 0.05$, 图 7)。计算得知, 观测期内累积发生降雨 724.00 mm, 蒸散量为 584.79 mm, 占降雨量的 80.77%, 入渗量为 139.21 mm, 占降雨量的 19.23%。逐月入渗深度随着月降雨量的增大而增大, 月降雨量与逐月入渗深度一致性良好 (图 8), 使用 SPSS 软件进行回归分析表明, 逐月降雨入渗深度(Z_m)随月降雨量(P_m)增加呈二次函数递增变化: $Z_m = -0.0101P_m^2 + 3.9426P_m$ ($R^2 = 0.9895$)。累积入渗深度在 2022 年 3—9 月逐渐增大, 到 9 月达到最大 (360 cm), 之后随着月份的增加便不再变化, 从水量平衡的角度来看, 可能是因为 2023 年为苜蓿种植的第二年, 耗水加剧, 加上 2023 年降雨量较上一年偏少造成的。

3 讨论

由于降雨入渗过程和入渗量代表了水循环的初始阶段, 因此研究降雨入渗过程和入渗量具有重要意义。以

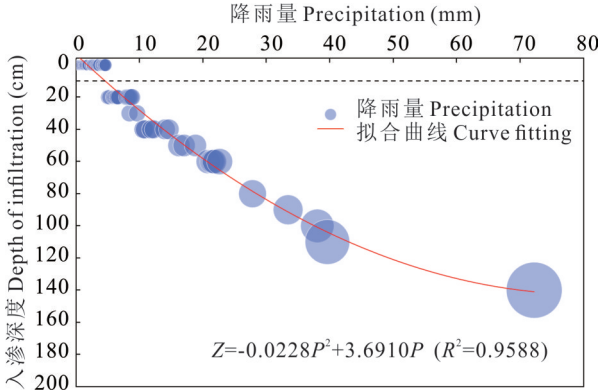


图 6 逐次降雨量与入渗深度变化
Fig. 6 Changes of individual precipitation and infiltration depth

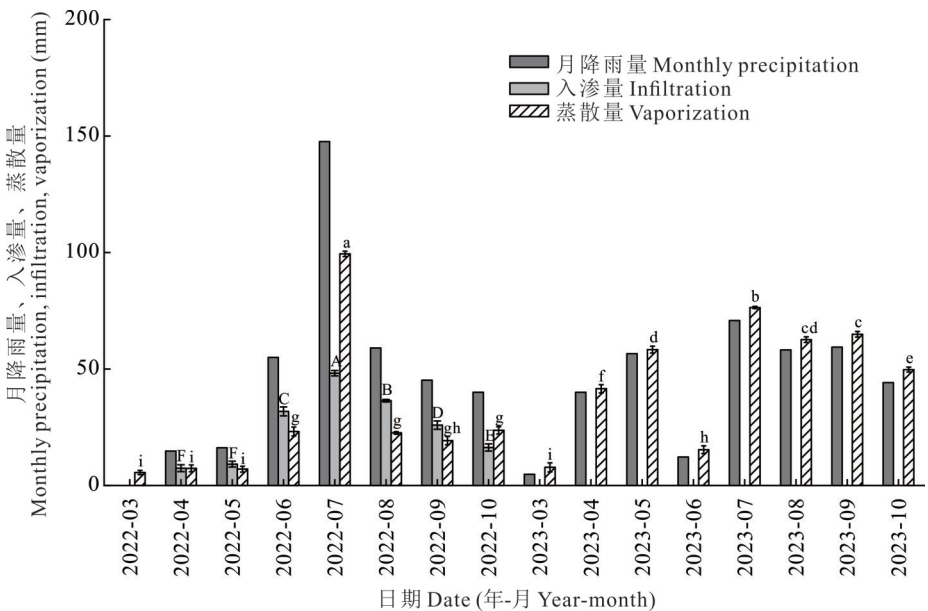


图 7 月降雨量、入渗量、蒸散量动态变化
Fig. 7 Dynamic changes of monthly precipitation, infiltration, vaporization

不同大写字母表示不同月份入渗量在 0.05 水平差异显著, 不同小写字母表示不同月份蒸散量在 0.05 水平差异显著。Different uppercase letters indicate significant differences in infiltration at the 0.05 level for different months, and different lowercase letters indicate significant differences in vaporization at the 0.05 level for different months.

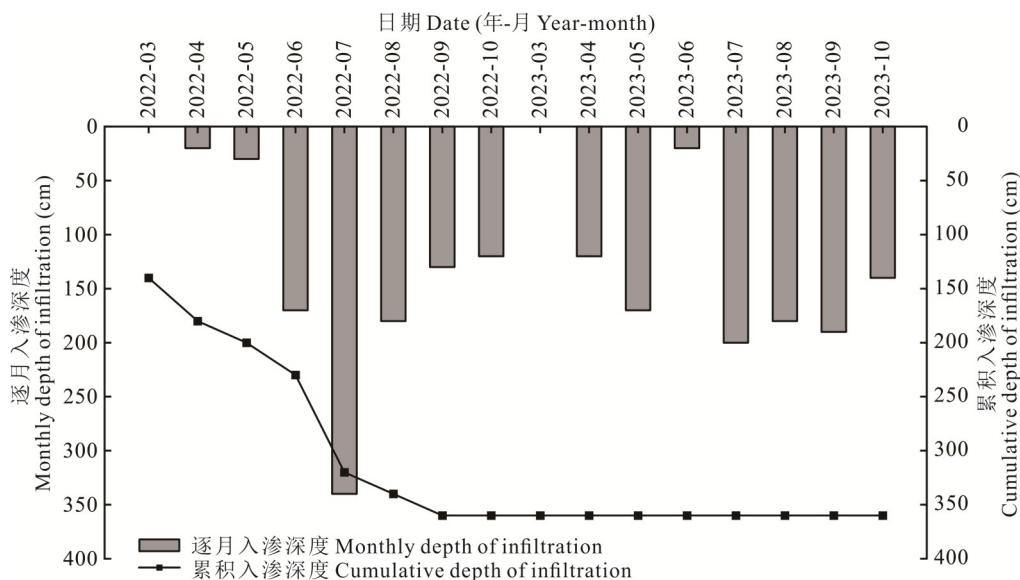


图8 逐月入渗深度、累积入渗深度动态变化

Fig. 8 Dynamic changes of monthly infiltration depth and cumulative infiltration depth

往关于深厚土壤严重干化背景下的土壤水分循环的研究报道较少, Wang等^[21]、张敬晓等^[22]在黄土高原通过构建大型土柱, 进行多年连续观测, 开展了裸地干化土壤水分恢复研究。本研究基于宁夏彭阳王洼水土保持试验站进行的28 a人工柠条林伐后种植苜蓿的试验, 探讨了深层土壤干化后再种植苜蓿地的土壤水分特征, 对今后研究深层土壤干化背景下再种植多年生、深根系植物可行性及黄土区植被再建造和可持续发展具有较好的参考价值。

近年热点研究表明, 降雨对土壤水分的影响主要受降雨量、强度、持续时间和频率的控制^[23-25], 通常小降雨事件只影响土壤最上层, 容易通过直接蒸发散失, 土壤水分主要由大降雨事件贡献, 总和较大、峰值强度较高的降雨事件能使降雨入渗到更深的土壤深度^[26-27], 本研究与前人研究结论相同。前人大多描述的是降雨前后某个定时间, 如高元亢^[28]在野外布设水分探头对高龄柠条林地雨后24、48 h土壤水分进行了分析, 本研究通过定位连续观测, 较前人更详细解析了小雨、中雨、大雨和暴雨下的土壤水分入渗过程, 发现降雨量与入渗量的关系表现为随着降雨量的增加, 入渗量逐渐增加, 雨量越大, 入渗量占雨量的比例越大, 说明雨量越大, 土壤能得到更多的水分补给。还发现土壤初始含水量不同, 土壤水分入渗深度存在差异, 如降雨量同在8 mm左右条件下, 土壤初始含水量为17.56%时, 入渗深度为20 cm, 而当初始土壤含水量为18.87%时, 入渗深度可达到30 cm, 在降雨量相似的情况下, 土壤水分随着降雨强度、土壤前期含水量的增加而增加。针对极端暴雨条件下剖面土壤水分的动态变化和蓄水过程的研究并不多见, 王承书等^[29]采用土壤墒情仪对暴雨事件下黄土丘陵沟壑区草地剖面土壤水分进行了实时动态监测, 研究了黄土丘陵沟壑区草地剖面在极端暴雨条件下土壤蓄水能力和入渗规律, 发现桥沟草地0~140 cm土层对降雨有较强的容蓄作用, 平均蓄水量较140~200 cm土层大约高26.49%, 蓄水量为降雨前的1.37倍。本研究更精准地观测到暴雨对土壤入渗的作用, 如对2022年的一场暴雨进行了更详细的连续时间下的土壤水分分析, 发现在雨后164 h, 30~140 cm深度平均土壤含水量为17.15%, 较雨前15.41%还有增加, 此场降雨有效入渗深度达到140 cm。

在月时间尺度上, 土壤水分在剖面上的动态变化主要受降雨量的影响, 一般来说, 土壤水分随着降雨量的增加而增加。本研究从月尺度的观测中发现, 月降雨量与月入渗深度一致性良好, 说明降雨量与土壤水分入渗深度的关系较好。在对比2023和2022年的土壤水分月累积入渗深度时, 发现一个显著的特点: 2022年水分累积入渗深度在9月前持续增加, 这主要是苜蓿种植第一年耗水小的原因; 2023年土壤水分累积入渗深度相较于2022年并未出现增加, 这主要因为2023年是苜蓿种植的第二年, 苜蓿生长需水量增加且当年降雨偏少导致220 cm土层以上土壤水分呈逐月减少的趋势。本次土壤水分动态监测时间长度为两年, 在时间长度上偏短, 无法反映年际变

化如在丰水年、平水年以及枯水年降雨累积入渗深度与这种较大时间长度上对应的规律与特征,所以今后应进行长期年际监测,进一步研究不同时间尺度的土壤水分变化特征与机理,完善试验数据,检验试验结果的可靠性。现有条件下试验限制了土壤水分探头的布设间距为10、20、40 cm,而随着观测年限的增加,发现深层土壤水分的观测精度逐渐降低,随着探头的体积越来越小,精度越来越准,后续还可以进一步完善。同时,随着种植年限的增加,苜蓿产量增加,水分会如何变化,有待以后进一步地持续研究。另外,本研究是建立在野外模拟深层土壤干化状态下的种植试验,尽管能够得出干燥化土壤再种植植物后的土壤入渗对降雨的响应规律,但仍然与真实的原状土层种植植物存在差异性,今后如何进行原状干燥化土壤下的再种植试验还是十分值得考虑的方向。

4 结论

1) 宁南黄土丘陵区能有效产生土壤水分入渗的降雨有40次,占总降雨次数的41.67%,累计雨量599.80 mm,降雨量与入渗量占比为:小雨入渗量占降雨量的15.89%,中雨入渗量占降雨量的35.63%,大雨入渗量占降雨量的52.20%,暴雨入渗量占降雨量的61.50%,入渗量随着降雨量的增大呈增大的趋势。

2) 宁南黄土丘陵区降雨入渗深度小于30 cm的降雨有73次,占总降雨次数的76.04%,累计雨量238.40 mm,占总降雨量的32.93%,入渗深度在30~80 cm的降雨有18次,占总降雨次数的18.75%,累计雨量274.60 mm,占总降雨量的37.93%,入渗深度在80 cm以上的降雨有5次,占总降雨次数的5.21%,累计雨量211.00 mm,占总降雨量的29.14%。

3) 深层土壤干化背景下种植苜蓿,一龄苜蓿地月尺度土壤剖面水分呈增加趋势,二龄苜蓿地月尺度土壤剖面水分呈减小趋势,逐月降雨入渗深度(Z_m)随月降雨量(P_m)增加呈二次函数增大变化: $Z_m = -0.0101P_m^2 + 3.9426P_m$ ($R^2 = 0.9895$)。

参考文献 References:

- [1] Wan S M, Jia Z K, Han Q F, *et al.* Dry soil layer forming and soil moisture restoration of alfalfa grassland in the semi-humid region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1045—1051.
万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复. *生态学报*, 2008, 28(3): 1045—1051.
- [2] Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, *et al.* A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14—22.
邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14—22.
- [3] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427—432.
李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427—432.
- [4] Wang G L, Liu G B, Chang X, *et al.* A study on the effect of soil water on vegetation rehabilitation in watershed of loess hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 339—344.
王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 339—344.
- [5] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 1—6.
杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1—6.
- [6] Hu L J, Shao M A, Yang W Z. Relationship between vegetation spatial collocations and soil moisture spatial heterogeneities in the Loess Plateau area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(6): 14—20.
胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系. *草业学报*, 2004, 13(6): 14—20.
- [7] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, *et al.* Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, 39(9): 1297—1303.
王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2009, 39(9): 1297—1303.
- [8] Wang Y Q, Lv W, Ma X M, *et al.* Distribution characteristics of root, soil moisture and nutrients in *Caragana korshinskii* forest strip land in southern Ningxia. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(1): 42—49.
王永强, 吕雯, 马晓梅, 等. 宁南带状柠条林地根系及土壤水分养分分布特征. *西北林学院学报*, 2023, 38(1): 42—49.
- [9] Bai S Y, Wang Y K, Ma J P, *et al.* Experimental study on rainfall infiltration in semiarid region of the Loess Plateau.

- Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 218–223, 231.
- 白盛元, 汪有科, 马建鹏, 等. 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 218–223, 231.
- [10] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, *et al.* Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 77–83.
- 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究. 农业工程学报, 2007, 23(11): 77–83.
- [11] Wang L, Shao M A, Hou Q C. The primary research on dried soil layer in the Loess Plateau. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2001, 29(4): 34–38.
- 王力, 邵明安, 侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 34–38.
- [12] Hou Q C, Han R L, Han S F. Preliminary research on the problem of soil drying in artificial forest and grass land in the Loess Plateau. Soil and Water Conservation in China, 1999(5): 13–16.
- 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. 中国水土保持, 1999(5): 13–16.
- [13] Huang M, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 67–76.
- [14] Liu J Y, Han X Y, Zhu Y J. Deep soil water environmental effects after the mutual conversion between apple orchard and farmland in Changwu tableland region. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 130–135.
- 刘锦月, 韩晓阳, 朱元骏. 长武塬区苹果园和农田相互转换的深层土壤水环境效应. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 130–135.
- [15] Tian L, Zhang J X, Gao J E, *et al.* Experiment on dry soil water restoration in deep layer. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 255–262.
- 田璐, 张敬晓, 高建恩, 等. 深层干化土壤水分恢复试验研究. 农业机械学报, 2019, 50(4): 255–262.
- [16] Wang X, Gao Z Y, Wang Y K, *et al.* Effects of pruning and mulching on soil desiccation remediation in rain-fed jujube plantation in the semi-arid loess hilly gull region. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(7): 24–30.
- 汪星, 高志永, 汪有科, 等. 修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应. 林业科学, 2018, 54(7): 24–30.
- [17] Zhang J X, Wang X, Wang Y K, *et al.* Regularities of rainfall infiltration and water migration in woodland drying soil in the loess hilly region. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 231–238.
- 张敬晓, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律. 水土保持学报, 2017, 31(3): 231–238.
- [18] Zhou Y H, Dong J G, Wang Y K, *et al.* Research on soil water recovery ability under different typical mulches. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 334–339.
- 周玉红, 董建国, 汪有科, 等. 几种典型覆盖下的土壤水分恢复研究. 水土保持研究, 2015, 22(2): 334–339.
- [19] Ali G, Wang Z, Li X, *et al.* Deep soil water deficit and recovery in alfalfa fields of the Loess Plateau of China. Field Crops Research, 2021, 260: 107990.
- [20] Li P, Li T L, Wang A D, *et al.* In-situ test research on regularities of water migration in loess. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1331–1339.
- 李萍, 李同录, 王阿丹, 等. 黄土中水分迁移规律现场试验研究. 岩土力学, 2013, 34(5): 1331–1339.
- [21] Wang X, Zhang K, Li J, *et al.* Response of soil water in deep dry soil layers to monthly precipitation, plant species, and surface mulch in a semi-arid hilly loess region of China. Agricultural Water Management, 2024, 291: 108612.
- [22] Zhang J X, Wang X, Xu D, *et al.* Experimental study on moisture recovery of dried soil under natural precipitation condition. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 159–166.
- 张敬晓, 汪星, 许迪, 等. 自然降雨条件下干化土壤水分恢复试验. 农业工程学报, 2021, 37(4): 159–166.
- [23] Zhang J, Duan L, Liu T, *et al.* Experimental analysis of soil moisture response to rainfall in a typical grassland hillslope under different vegetation treatments. Environmental Research, 2022, 213: 113608.
- [24] Zhu P, Zhang G, Wang H, *et al.* Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107086.
- [25] Huang J, Wu P, Zhao X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. Catena, 2013, 104: 93–102.
- [26] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 211–220.

- [27] Zhao J, Li G, Lin H, *et al.* Soil moisture response to rainfall on the Chinese Loess Plateau after a long-term vegetation rehabilitation. *Hydrological Processes*, 2018, 32(12): 1738—1754.
- [28] Gao Y K. Study on spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in 22 a artificial *Caragana korshinskii* forest in loess hilly region of southern Ningxia. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
高元亢. 宁南 22 龄人工柠条林地土壤水分时空分布特征研究. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [29] Wang C S, Yang X N, Sun W Y, *et al.* Soil water storage capacity and rainwater infiltration in hilly-gully loess region under severe rainstorm. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 296—306.
王承书, 杨晓楠, 孙文义, 等. 极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律. *土壤学报*, 2020, 57(2): 296—306.