自然降雨对干化土壤水分恢复有效性分析

汪 星[1]，张敬晓[2,3]，汪有科[4]，吕 望[5]，路 梅[2]，辛小桂[4]

(1.宁夏大学农学院,银川 750021;2.河北水利电力学院,
河北 沧州 061000;3.中国水利水电科学研究院,流域水循环模拟与调控国家重点实验，北京 100038;
4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;5.黄河水利科学研究院,郑州 450003)

摘要： 研究自然降雨对干化土壤水分恢复的有效性,有利于合理利用降水资源,加强干化土壤水分管理,促进土壤干层得到有效恢复。在陕北米脂试验站设置野外地下大型土柱,通过 2014—2019 年连续定位监测降雨、土壤含水率状况,分析自然降雨对干化土壤水分恢复的有效性。结果表明:(1)从深层干化土壤水分恢复角度考虑,黄土丘陵半干旱区降雨可以分为 3 种类型:表层入渗快速蒸发型、浅层入渗缓慢蒸发型和深层入渗补给型。其中深层入渗补给型降雨为有效降雨,该类型雨量>26 mm,能够对深层干化土壤产生有效水分补给。2014—2019 年发生深层入渗补给型降雨仅 16 次,累积雨量 791.8 mm,降雨次数、降雨量的有效率分别为 4.64%和 35.19%。(2)月尺度条件下,降雨量($P_{月}$)与逐月入渗深度($Z_{逐月}$)、月累积入渗深度($Z_{累积}$)均呈二次函数关系变化,$Z_{逐月}=-0.0102P_{月}^2+3.955P_{月}-6.7335$($R^2=0.963\ 9$),$Z_{累积}=-0.0003P_{月}^2-0.1331P_{月}+191.71$($R^2=0.920\ 8$)。(3)年尺度条件下,2014—2019 年雨量分别为 187.6,391.6,590.8,337.6,342.4,400.0 mm,降雨逐年引发的入渗深度依次为 160,220,400,260,260,120 cm,累积入渗深度依次可达 180,220,400,700,1 000,1 400 cm。研究结果对揭示自然降水恢复干化土壤机理,加强土壤干层人工蓄水保墒技术,合理选择保墒措施,以及促进当地生态环境建设具有积极的推动作用。

关键词： 自然降雨；干化土壤；土壤水分；有效性；累积降雨

中图分类号：S157.2;TV93　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1009-2242(2021)01-0161-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.024

The Effectiveness of Natural Rainfall on the Restoration of Water in the Dried Soil

WANG Xing[1], ZHANG Jingxiao[2,3], WANG Youke[4], LÜ Wang[5], LU Mei[2], XIN Xiaogui[4]

(1.*School of Agriculture*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021; 2.*Hebei University of Warer Resources and Electric Engineering*, *Cangzhou*, *Hebei* 061000; 3.*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038; 4.*Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100; 5.*Yellow River Institute of Hydraulic Research*, *Zhengzhou* 450003)

Abstract: Studying on the effectiveness of natural rainfall on the water restoration in the dried soil was conducive to use precipitation rationally, to strengthen the management of the dried soil water, and to promote the effective restoration of the soil dry layers. By setting a large underground soil column in Mizhi test station located in northern Shaanxi, the precipitation and soil moisture content were monitored continuously from 2014 to 2019. And the effectiveness of natural rainfall for the remediation of dry soil moisture was analyzed. The results showed that: (1) From the perspective of water remediation in deep dried soil, rainfall in the semi-arid loess hilly region could be divided into three types: surface layers infiltration with rapid evaporation, shallow layers infiltration with slow evaporation and deep layers infiltration with water recharge. The type of deep layers infiltration with water recharge rainfall was effective, and others were ineffective. The precipitation of this type was usually greater than 26 mm and could effectively recharge water to the deep dried soil. From 2014 to 2019, there were only 16 times of deep layers infiltration with water recharge rainfall, and the cumulative precipitation was 791.8 mm. The precipitation frequency and effective rate were

收稿日期：2020-08-16
资助项目：2020 宁夏自治区重点研发计划项目(2020BEB04005);国家重点研发计划项目(2017YFC0504703)
第一作者：汪星(1984—),男,博士,讲师,主要从事林地耗水研究。E-mail:WangXingSTR@163.com
通信作者：张敬晓(1987—),男,博士研究生,讲师,主要从事水资源高效利用研究。E-mail:zhangjingxiao198704@126.com

4.64% and 35.19%, respectively. (2) On a monthly scale, the precipitation (P) showed the quadratic function changes with the monthly infiltration depth (Z) and monthly cumulative infiltration depth ($Z_{accumulation}$): $Z=-0.0102P_{month}^2+3.955P_{month}-6.7335$ ($R^2=0.963\ 9$), $Z_{accumulation}=-0.0003P_{month}^2-0.1331P_{month}+191.71$ ($R^2=0.920\ 8$). (3) On the annual scale, the precipitation from 2014 to 2019 was 187.6, 391.6, 590.8, 337.6, 342.4 and 400.0 mm in sequence. The infiltration depths caused by rainfall year by year were 160, 220, 400, 260, 260 and 120 cm, and the cumulative infiltration depths were 180, 220, 400, 700, 1 000 and 1 400 cm, respectively. The research results played a positive role in revealing the mechanism of natural precipitation restoration of dried soil, strengthening the technology of artificial water storage and soil moisture conservation in the dried layers, selecting the measures of soil moisture conservation rationally and promoting the local ecological environment construction.

Keywords: natural rainfall; dry soil; soil moisture; effectiveness; cumulative precipitation

西北黄土丘陵半干旱地区是我国乃至全球典型的生态脆弱区,该区水资源严重匮乏,人均水平仅为全国平均水平的 24.1%[1]。长期以来,水资源短缺、水环境恶化、水土流失、荒漠化等一系列水资源问题严重制约着西北地区经济发展和生态发展[2-3]。已有研究[4]表明,黄土丘陵半干旱地区土壤水分频繁处于负平衡状态,“土壤水库”调节功能被大大削弱,甚至丧失,土壤干燥化现象日趋严重,土壤干层分布空间持续增大[5]。兰志龙等[6]研究指出,孟岔湾流域枣林 5—800 cm 土层平均土壤含水率仅为 4.79%,土壤干燥化严重,使枣树的经济效益、生态效益大大降低。因此,土壤干层问题严重破坏了区域植被建设与当地生态环境可持续发展的稳定性,成为植物学家、土壤学家和生态学家关注的焦点问题。

自然降雨是当地土壤水分的唯一来源[7]。为有效遏制黄土丘陵半干旱地区深层土壤干化发展,促进土壤干层自然恢复,最大限度收集雨水就地入渗是自然条件下的有效措施。李萍等[8]、张常亮等[9]研究认为,只有当降雨量>18 mm/d 时,浅层土壤含水率才会在其背景趋势上产生骤升;Huang 等[10]对 30 年生苹果林地伐后种植冬小麦条件下土壤水分恢复过程研究指出,0—3 m 土层恢复年限为 4.4~8.4 年,0—10 m 土层恢复需要 6.5~19.5 年,深层干化土壤水分恢复过程比较缓慢。自然降雨对于深层干化黄土的恢复状况与降雨特性、土地利用方式、下垫面等因素密切相关。白盛元等[7]基于野外观测试验,对大、中、小雨入渗特性进行研究得到,黄土丘陵区蒸发带深度为 80 cm,即该深度以下土壤水分以入渗为主,基本不受蒸发影响,对于恢复土壤干层发挥着重要作用;缪凌等[11]针对枣林、苜蓿草地、杏林和农地 4 种土地利用方式下的土壤水分特性研究指出,当年降雨入渗深度依次可达 240,180,200,120 cm;周玉红等[12]则基于不同覆盖条件下对黄土区自然降雨入渗特征研究指出,由于不同覆盖产生的蓄水特性差异,在一个生育期内早熟禾、裸地、树枝覆盖、薄膜覆盖 4 种处理下的最大入渗深度依次为 200,200,240,340 cm。目前,关于降雨对干化土壤水分恢复有效性的研究一方面缺乏长期系统观测,另一方面大部分研究集中在保墒措施对降雨入渗的影响,而自然降雨对土壤干层恢复的有效性如何?哪些类型降雨对于深层干化土壤有效恢复能够发挥作用?以及多年累积降雨对于土壤干层的恢复程度如何?针对以上问题,本研究利用野外土柱模拟枣林地干化土壤,通过研究降雨后的土壤水分特性,对该区降雨类型、月尺度降雨、年尺度降雨条件下干化土壤水分恢复的有效性进行深入研究,为明确黄土丘陵区自然降雨有效概率及干化土壤得到有效恢复提供数据支撑,对于充分利用降雨资源,合理调控土壤水分等具有一定的指导意义。

1 研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省米脂县银州镇(109.47°E,37.18°N)远志山红枣栽培试验基地,属于典型的黄土丘陵沟壑区。该区域降雨量小,蒸发量大,且降水年内分配不均,年平均降水量 451.6 mm,最大年降水量 704.8 mm,最小年降水量 186.1 mm,属于中温带半干旱性气候。试验区土壤为黄绵土,剖面发育不明显,土质均一,渗透性良好,土壤容重为 1.20~1.35 g/cm^3,0—60 cm 土壤计划湿润层的田间持水量约为 20%,土地较为贫瘠。

1.2 试验设计与指标测定

1.2.1 试验布设 在研究区立地条件一致的水平阶地,构建野外大型地下土柱。土柱规格直径 80 cm,深 1 000 cm,开挖后回填设置。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林地深层干化土壤。土壤含水率与真实的林地深层干化土壤相接近,基本保持在 6%左右。土壤容重尽量与原状土保持一致,控制在(1.3±0.5)g/cm^3。土壤质地、土壤层次等遵循与原状土一致的原则,因此开挖过程

中需按原状土状况分层堆放、保存，以便于回填时分层回填，回填后人工分层压实。为避免土柱土壤与周围土壤产生水分横向扩散，在柱体周围铺设 1 层厚约 1 mm 的塑料薄膜。考虑到降雨入渗至 1 000 cm 深度需要较长时间，土柱底部难以产生水分垂向扩散，故未进行密封处理。土柱布设完成后经过约 2 个月的自然沉降，以消除由于回填产生的偶然误差。土柱地表裸露，无植被覆盖，不产生蒸腾损耗和冠层截流。

1.2.2　指标测定　土壤水分：利用 CS650－CR1000 土壤水分自动监测系统进行测定，测定频率为 30 min/次。在土柱内埋设 CS650 型土壤水分探头用以测定土壤水分，在土柱外安装 CR1000 数据采集器，与柱体内的 100 个水分探头相连，用以采集土壤水分数据（图 1）。土壤水分探头在柱体 0～1 000 cm 范围内每间隔 10 cm 布置 1 个，共计布置 100 个。在 100 个探头埋设深度利用土钻采取土样，每个深度土壤取 3 个重复，采用烘干法（x，%）对 CS650－CR1000 土壤水分自动监测系统（y，%）可靠性进行检验，2 种方法所测土壤水分数据的拟合方程为：$y=0.8784x+0.5187$（$R^2=0.967$）。因此，CS650－CR1000 土壤水分自动监测系统可以反映真实情况，试验中的土壤水分数据均采用自动监测系统标定后测得的数据。

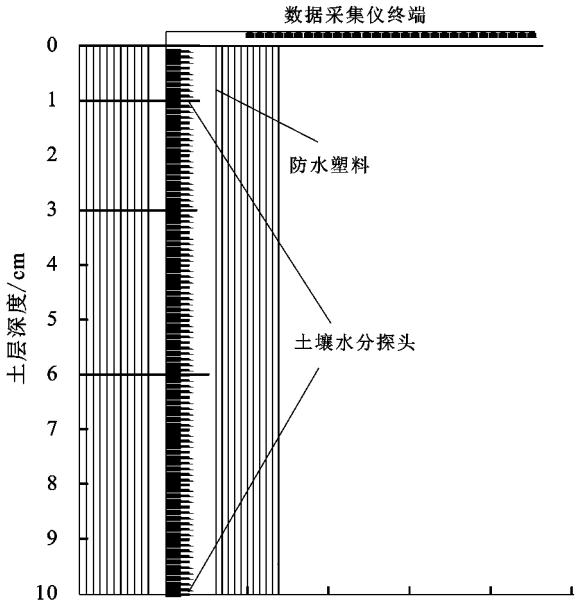

图 1　CS650－CR1000 土壤水分自动监测系统

气象因子：在试验区土柱东侧 5 m 处架设 BLJW－4 小型综合气象观测站用于测定气象因子，每隔 30 min 采集 1 次数据。

1.3　指标判定与计算

降雨类型划分：依据雨后水分迁移结束时的土壤剖面水分状况较雨前水平增加情况，将黄土丘陵区降雨划分为 3 种类型：表层入渗快速蒸发型（＜13 mm）、浅层入渗缓慢蒸发型（13～26 mm）与深层入渗补给型（＞26 mm）。表层入渗快速蒸发型、浅层入渗缓慢蒸发型在雨后水分迁移结束时土壤水分较雨前水平无增加，深层入渗补给型在雨后水分迁移结束时土壤水分较雨前水平引起下部一定深度范围内土层含水率增加，产生水分补给。

最大入渗深度：以降雨前土壤剖面水分为初始状态，判断水分迁移结束时土壤含水率在剖面中的增加范围，即为最大入渗深度。

有效入渗深度：表层土壤在雨水补给作用下能够短暂提升土壤水分，但在蒸发作用下也容易散失，土壤水分恢复至雨前水平。最大入渗深度排除浅层雨水补给后又恢复至雨前水平的土层深度即为有效入渗深度。

逐月（年）入渗深度：以各月（年）初土壤剖面水分为初始状态，判断各月（年）末土壤剖面水分增量范围，为逐月（年）入渗深度。

月（年）累积入渗深度：以试验布设初期（2014 年 8 月）土壤剖面水分为初始状态，判断各月（年）末土壤剖面水分增量范围，为月（年）累积入渗深度。

土层储水量[13]：根据土壤体积含水率计算。计算公式为：

$$W=10\times\omega\times h \tag{1}$$

式中：W 为土壤储水量（mm）；ω 为体积含水率（%）；h 为土层深度（cm）。

土壤蒸发量[13]：根据土壤水量平衡方程计算。试验土柱地表裸露，无作物种植。土柱井圈高出地表 10 cm，无径流产生。地下水埋藏较深，不产生深层渗漏。因此计算公式可简化为：

$$E=P+\Delta W \tag{2}$$

式中：E 为土壤蒸发量（mm）；P 为降雨量（mm）；ΔW 为计算时段初与计算时段末土壤储水量之差（mm）。

1.4　数据处理

试验所有数据均采用 SPSS 18 软件进行数据统计分析，利用 Origin 9.0 软件进行绘图。

2　结果与分析

2.1　降雨类型对干化土壤水分恢复的有效性

黄土丘陵半干旱地区降雨具有明显的年内、年际变化不均衡性，且降雨类型多以脉冲降雨为主[14]。为探究该区不同类型降雨对于干化土壤水分恢复的有效性影响，研究根据降雨类型划分标准，在 2019 年 4—6 月分别选取表层入渗快速蒸发型（5.8 mm）、浅层入渗缓慢蒸发型（16.2 mm）、深层入渗补给型（32.2 mm）降雨各 1 场，来探讨分析降雨类型对干化土壤水分恢复的有效性。

从图 2 可以看出，表层入渗快速蒸发型（图 2a）降雨量小，降雨入渗发生在 20 cm 的表层，降雨停止后 41 h 入渗层土壤水分又恢复到雨前的水平；浅层入渗缓慢蒸发型（图 2b）降雨量较大，降雨入渗达 40

cm，降雨停止后 189 h 入渗层土壤水分恢复至雨前水平；深层入渗补给型（图 2c）降雨量进一步增大，降雨入渗深度达 140 cm，20 cm 以上层次土壤水分在雨后 319.5 h 恢复至雨前水平。3 种降雨类型下土壤水分均具有降雨入渗、入渗水分扩散和蒸发造成上层土壤水分恢复至雨前水平 3 个过程，只有降雨入渗达到一定深度才会出现上层蒸发土壤水分降低，同时入渗水分持续向下运移补充恢复深层土壤的现象，即深层入渗补给型降雨。因此，深层入渗补给型降雨是黄土区深层干化土壤得到有效恢复的关键。由图 2c 可知，在 8.5 h 降雨历时内，32.2 mm 的降雨快速入渗补充到 20 cm 土层内，含水率由 13.1%骤增至 14.25%，雨后第 241.5 h 入渗深达达到最大，为 140 cm，该深度范围内土壤含水率由雨停时 14.17%增加至 15.0%，土壤水分得到较大补充；之后表层土壤水分被蒸发损耗。由于该类型降雨雨量较大，一方面土壤剖面得到较大水分补充，另一方面最大入渗深度较大，使得下层土壤受蒸发影响很弱，因此在雨后第 319.5 h 仅表层 20 cm 恢复至雨前状况（13.1%），20—140 cm 深度范围土壤水分（14.77%）较雨前（14.02%）增加 0.75%，为有效降雨。对米脂 2014—2019 年发生的所有降雨及其对干化土壤恢复的有效性进行统计分析（表 1）显示，6 年内累计发生降雨 345 次，总降雨量 2 250 mm，其中能够对深层干化土壤形成有效恢复的深层入渗补给型降雨仅 16 次，累积雨量 791.8 mm，降雨次数、降雨量的有效率分别为 4.64%和 35.19%。

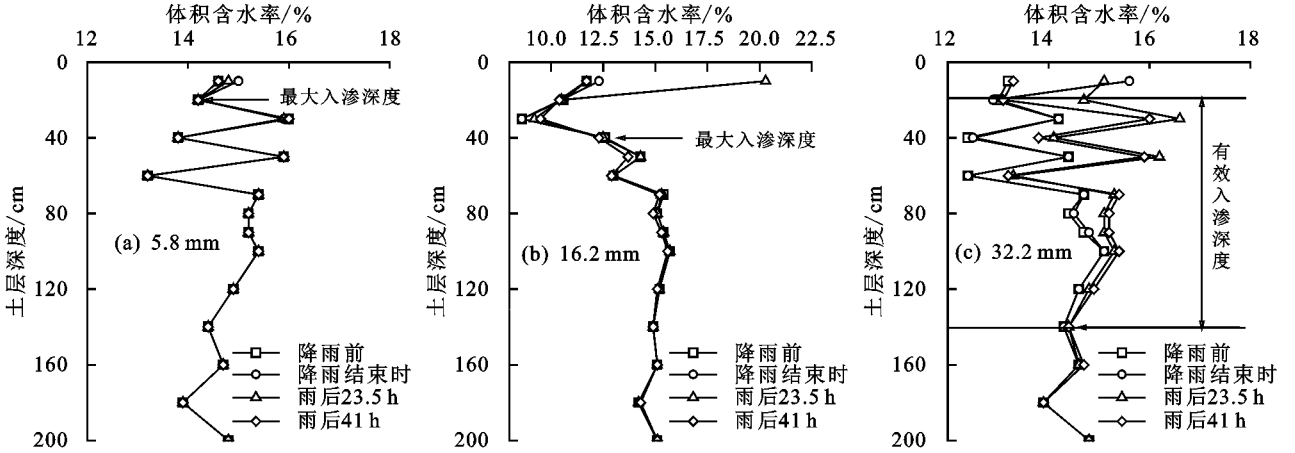

图 2 3 种类型降雨下干化土壤水分恢复特征

表 1 2014—2019 年米脂降雨与其对干化土壤恢复的有效性统计分析

序号	降雨类型	雨量范围/mm	最大入渗深度/cm	发生次数		累积雨量		有效性
				次数/次	占比/%	雨量/mm	占比/%	
1	表层快速蒸发型	0～13	20～30	292	84.64	832.0	36.98	无效降雨
2	浅层缓慢蒸发型	13～26	40～90	37	10.72	626.2	27.83	无效降雨
3	深层入渗补给型	>26	>90	16	4.64	791.8	35.19	有效降雨

2.2 月降雨对干化土壤水分恢复的有效性

由于降雨具有明显的年内分布特征，即月际特征明显，因此考虑干化黄土在自然降雨条件下得到水分恢复有效性的月尺度效应，有利于将降雨分布特征与土壤水分恢复特征进行结合分析。从图 3 可以看出，7—9 月为降雨丰沛阶段，其他月份降雨较少。统计 2014—2019 年降雨情况，各年 7—9 月期间分别发生降雨 156.4，179.6，312.8，200.4，242.8，249.6 mm，分别占当年降雨量的 83.37%，45.86%，52.95%，59.36%，70.91%，62.40%。2014—2019 年内月最大入渗深度也发生在 7—9 月，具体时间分别为 2014 年 9 月，2015 年 9 月，2016 年 7 月，2017 年 7 月，2018 年 7 月，2019 年 8 月，最大入渗深度依次为 160，350，400，350，300，280 cm。整体上，月入渗深度（$Z_{月}$）与降雨量（$P_{月}$）呈现出高度一致性，运用 SPSS 分析其相关性可以得到二者呈抛物线关系变化：$Z_{逐月}=-0.0102P_{月}^2+3.955P_{月}-6.7335$（$R^2=0.963\ 9$）。以 2014 年 8 月试验布设初期为初始状态，考虑土壤水分在月尺度降雨下的累积效应发现，自观测期初期至观测末期，月累积入渗深度呈递增趋势变化，增加趋势表现为开始增速缓慢，后期增速加快。利用 SPSS 对月累积入渗深度（$Z_{累积}$）与月降雨量（$P_{月}$）进行回归分析，得到回归方程：$Z_{累积}=-0.0003P_{月}^2-0.1331P_{月}+191.71$（$R^2=0.920\ 8$）。

张敬晓等[15]研究认为，黄土丘陵区 0—90 cm 深度土层为降雨入渗、蒸发敏感层，该深度范围内土壤受降雨入渗、蒸发影响较大，土壤水分运动活跃；90 cm 以下土壤水分逐渐以入渗为主，随土层深度加大，土壤水分受蒸发作用影响减小。因此，仅 90 cm 以下入渗量能够较长时间储存在土壤中，为干化土壤水分

恢复的有效入渗量，0—90 cm 入渗量在土壤中仅能维持短期补给，易在蒸发作用下被蒸发损耗，为无效雨量。2014—2019 年逐月降雨入渗量与蒸发量情况见图 4。6 年内月尺度降雨下，无效雨量中蒸发量损失较大，损失雨量处于 0.20～78.49 mm/月，占月降雨量的 24.99%～100%；0—90 cm 入渗量处于 0～47.63 mm/月，占月降雨量的 9.09%～75.01%。降雨有效雨量为入渗至 90 cm 以下的水量，变化范围为 0～90.90 mm/月，占月降雨量的 0～43.85%。整体来看，月降雨量中能够储存在 90 cm 以下深层土壤中对干化状态形成有效水分补给的水量（有效雨量）小于蒸发量与 0—90 cm 入渗量之和（无效雨量），月尺度条件下自然降雨对深层干化黄土水分恢复的有效率不大于 43.85%。

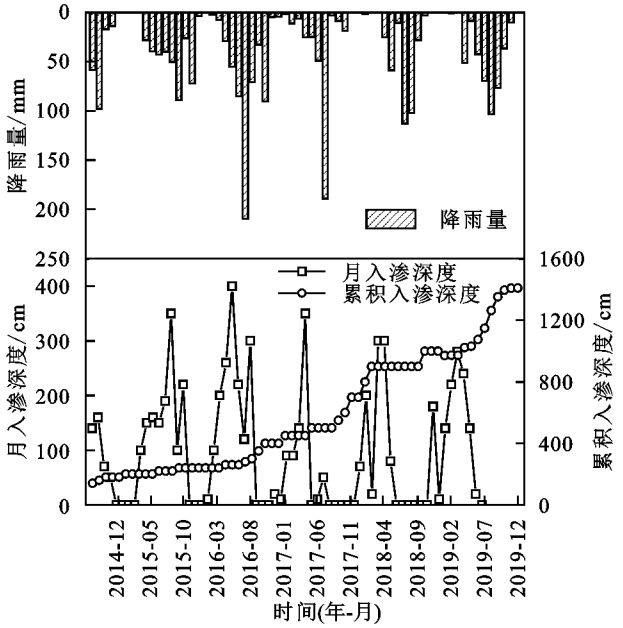

图 3　月尺度下降雨量、入渗深度与累积入渗深度变化

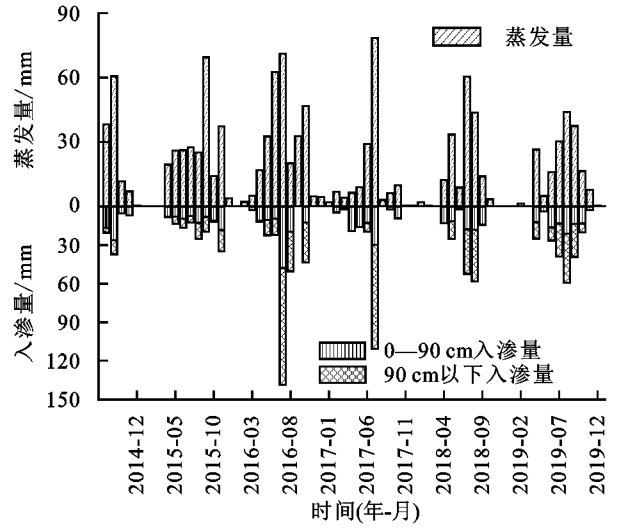

图 4　2014—2019 年逐月入渗量与蒸发量

2.3　年降雨对干化土壤水分恢复的有效性

从图 5 可以看出，2014—2019 年发生降雨 187.6，391.6，590.8，337.6，342.4，400 mm，当年引发降雨入渗深度依次为 180，220，400，260，260，120 cm，年入渗深度与年雨量基本呈正相关。自然降雨对土壤水分入渗的累积效应体现在累积入渗深度逐年加深，6 年内累积入渗深度依次可达 180，220，400，700，1 000，1 400 cm。需要说明的是，至 2018 年，降雨对干化土壤的水分恢复深度已经达到 1 000 cm，由于土柱底部未进行密封处理，2019 年降雨将继续穿越 1 000 cm 向更深层次土壤运移。由于土壤水分运移深度超过土柱布设最大深度（1 000 cm），2019 年累积入渗深度在此无法直接研判，但是依据 2.2 部分中推测得到的月尺度条件下累积入渗深度与降雨量的回归模型，可以推断至 2019 年底累积入渗深度将达 1 400 cm。

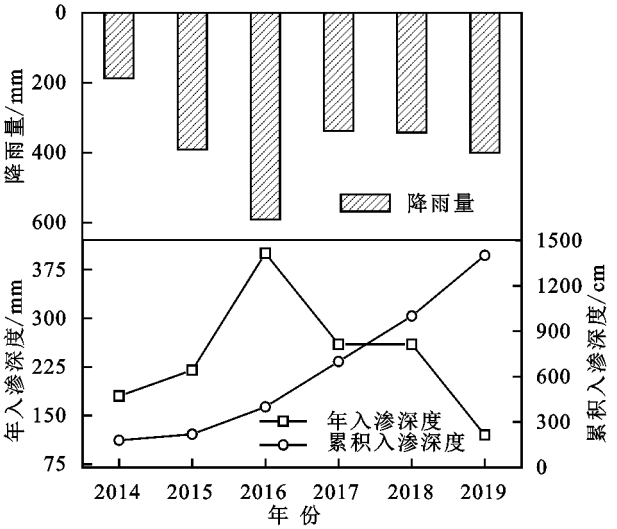

图 5　年尺度下降雨量、入渗深度与累积入渗深度变化

从图 6 可以看出，2014—2019 年蒸发量分别为 153.76，277.93，280.76，65.69，104.73，365.08 mm，占当年降雨量的 81.96%，70.97%，47.52%，19.46%，30.59%，91.27%；0—90 cm 入渗量依次为 29.33，81.33，200.26，203.76，168.53，19.68 mm，占当年降雨量的 15.63%，20.77%，33.90%，60.36%，49.22%，4.92%，以上均为无效雨量。90 cm 以下入渗雨量依次为 4.52，32.35，109.79，68.14，69.14，15.24 mm，占当年降雨量的 2.41%，8.26%，18.58%，20.19%，20.19%，3.81%，为有效雨量。整体来看，自然降雨对于深层干化黄土形成水分恢复的有效概率仅为 2.41%～20.19%，其余大部分水量被蒸发损耗。

从图 7 可以看出，一方面雨量累积入渗深度随时间延续不断加深，2014—2019 年降雨引发的累积入渗深度依次为 180，220，400，700，1 000，>1 000 cm，与图 5 结果一致；另一方面，在每个年度内雨水自地表渗入土层后再土壤剖面内的存储状况呈“倒三角”形分布，即土壤存蓄水量由地表向深层逐渐减少，这也合理解释了自然降雨对于干化土壤水分恢复

的有效性(2.41%～20.19%)小于无效性(79.81%～97.59%)的原因。

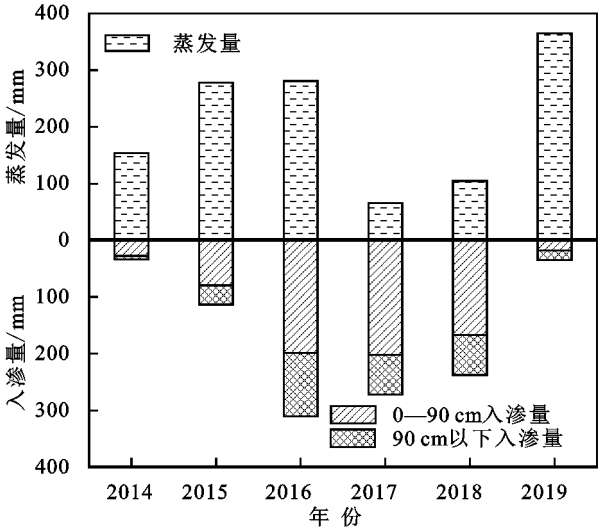

图 6 2014—2019 年逐年入渗量与蒸发量

由图 8 可知,在自然降雨累积入渗作用下,入渗的土壤水分一方面来源于当年降雨,另一方面得益于之前年份降雨的累积影响,即多年累积降雨作用下后续年份降雨推动较早年份雨水逐年向深层土壤入渗运移,土壤水分以“波浪”形式逐年向深层推进。2014 年(第 1 年)土壤水分运移深度为 180 cm;2015 年(第 2 年)推动 2014 年(第 1 年)蓄积在 180 cm 深度内的水分向下运移 40 cm,到达 220 cm 深度;2016 年(第 3 年)降雨则继续推动 2014 年、2015(第 1,2 年)年蓄积在土壤中的水量由 180 cm 向深层运移至 400 cm。如此推进,土壤水分在 2017 年(第 4 年)运移深度达到 700 cm,在 2018 年(第 5 年)达到 1 000 cm,至 2019 年(第 6 年)则超过 1 000 cm。以农地为对照,可以分析得到 6 年内干化土壤的水分有效恢复程度,2014—2019 年干化土壤完全恢复深度依次为 140,180,300,600,700,300 cm,完全恢复程度可达 14%,18%,30%,60%,70%,30%。

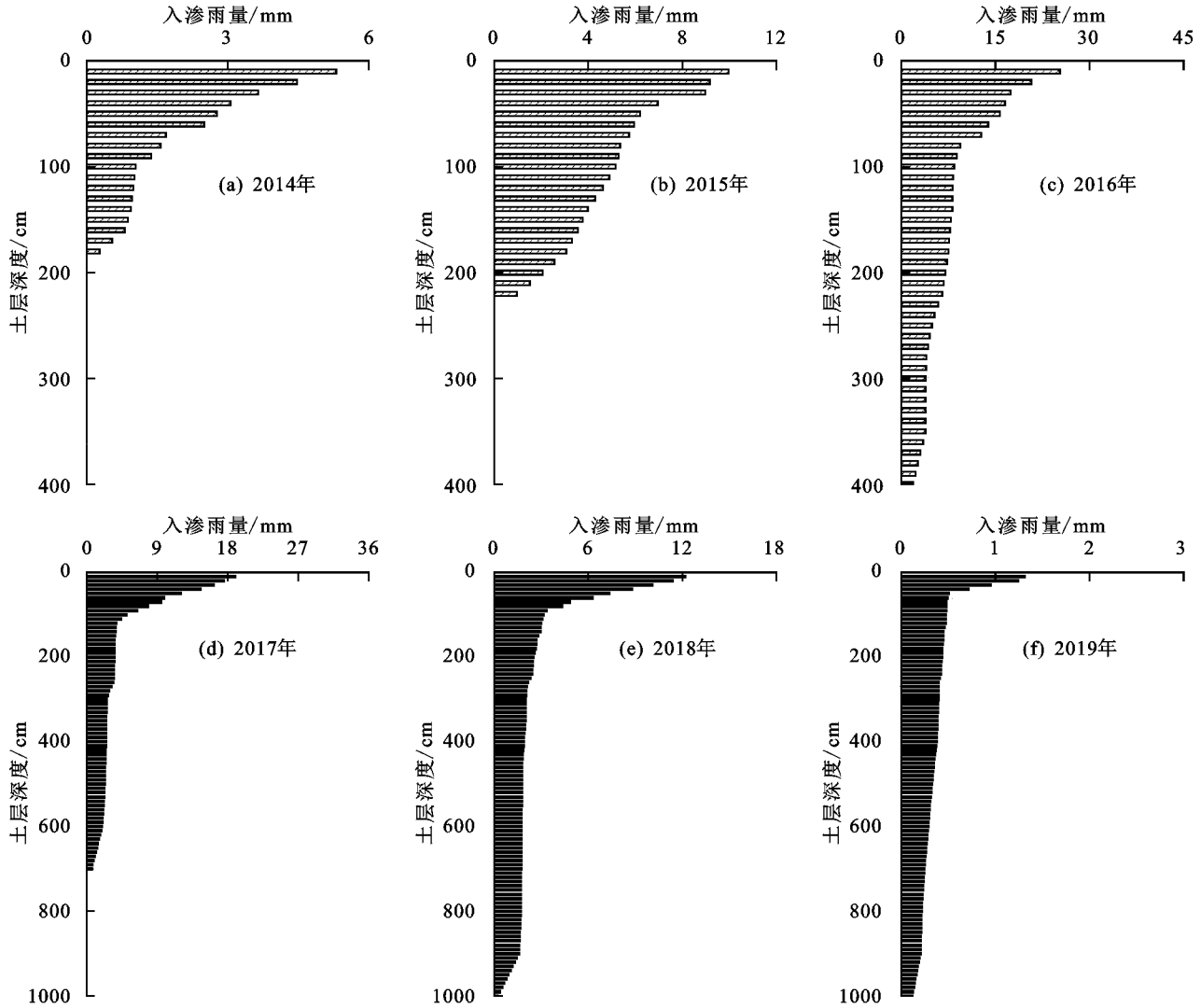

图 7 2014—2019 年不同深度土层雨量存储

3 讨 论

黄土丘陵半干旱地区推进人工林草建设工程 50 多年以来,植被覆盖率得到较大提高,但作物过度耗水打破了自然降水与原生植被之间的动态平衡,引发了土壤干层等生态环境问题[16-20]。已有研究[16,21]表明,陕北黄土丘陵半干旱地区土壤干层厚度可达 580

cm，随着作物生长年限的增加仍在不断加深，干层深度将达到甚至超过 1 000 cm。深厚的黄土层和特殊的地形特征限制了地下水灌溉补给，自然降水成为黄土丘陵半干旱地区土壤干层恢复的关键途径。但是当地降水对于深层干化土壤的水分恢复有效性极为有限，大部分降水不具有恢复深层干化土壤的作用。冯金超等[22]认为，黄土丘陵半干旱地区降雨能够引发 100—300 cm 深度土壤入渗响应，在丰水年能够达到 500 cm。而表层土壤受蒸发作用影响剧烈，对深层干化土壤水分恢复没有作用，只有储存在深层土壤中的水分对于土壤干层恢复、维系作物生存才具有重要意义。本研究以土壤水分对于降雨入渗的响应深度为主要指标，借助张敬晓等[15]前期研究成果，将土壤剖面分为 2 个层次：0—90 cm 为降雨入渗、蒸发敏感层，雨水入渗补给后易散失，为无效雨水；90 cm 以下能够较长时间存蓄在土壤中，随时间推移不断下渗，能够促进深层干化土壤得到水分恢复，为有效雨水。研究从降雨类型、月降雨、年降雨 3 个方面剖析了其有效性，对于更好认识深层干化土壤水分恢复及深化研究干化土壤恢复机理有积极意义。

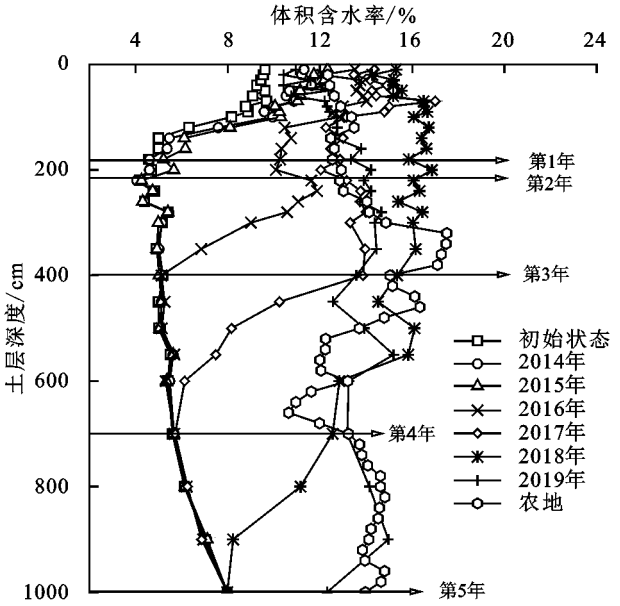

图 8　2014—2019 年土壤剖面水分恢复状况

汪星等[23]前期通过实地观测认为，降雨在当年的影响深度不超过 300 cm。本文基于年尺度下降雨对干化土壤水分恢复的有效性分析得到，2016 年当年降雨入渗深度达到 400 cm，超过了 300 cm，这种差异主要是由于前期研究地面有植物生长，也可能与试验土柱模拟干化土壤有关，这个问题有待今后继续研究。王志强等[24]、孙剑等[25]分别针对林后放牧荒坡、6 年生苜蓿草地土壤水分特性研究指出，干化土壤水分恢复是一个非常缓慢的过程，1 000 cm 深度得到有效恢复需要 23.8～40.0 年，甚至 150 年以上时间。本研究通过多年累积降雨入渗特性分析得到，裸地情况下 1 000 cm 深度干化土层得到水分恢复仅需要 5～6 年时间，研究结果更加乐观。其原因可能是由于裸地环境排除了作物耗水影响，使得自然降雨对于干化土壤水分恢复的有效概率得到较大提高。

黄土丘陵半干旱地区人工林种多样，作物耗水特性差别较大。为排除限定作物导致研究结果具有局限性，研究设置了地表裸露的野外大型地下土柱，来初步反映自然降雨对林地深层干化土壤恢复有效性规律。真实的林地干化土壤地表有作物栽植，降雨后的雨水去向除了蒸发量，还存在冠层截流、蒸腾损耗等水量损失。本研究讨论的降水有效性，主要指降水对永久性干化土层的作用，忽略了植物生长需水和地表浅层土壤水分的增加，所以本研究仅代表裸露地表状况下自然降雨对干化土壤形成有效的水分恢复结果观点。

4　结 论

(1)从自然降雨对深层干化土壤水分恢复有效性角度考虑，黄土丘陵半干旱区降雨可以分为 3 种类型：表层快速蒸发型、浅层缓慢蒸发型、深层入渗补给型。其中表层快速蒸发型降雨雨量<13 mm，浅层缓慢蒸发型降雨雨量处于 13～26 mm，为无效降雨；深层入渗补给型降雨雨量>26 mm，能够对深层干化土壤产生水分补给，为有效降雨。2014—2019 年发生深层入渗补给型降雨仅 16 次，累积雨量 791.8 mm，降雨次数、降雨量的有效率分别为 4.64%和 35.19%。

(2)月尺度条件下，降雨量($P_{月}$)与逐月入渗深度($Z_{逐月}$)、月累积入渗深度($Z_{累积}$)均呈二次函数关系变化：$Z_{逐月}=-0.0102P_{月}^2+3.955P_{月}-6.7335$($R^2=0.963\ 9$)，$Z_{累积}=-0.0003P_{月}^2-0.1331P_{月}+191.71$($R^2=0.920\ 8$)。

(3)年尺度条件下，2014—2019 年雨量分别为 187.6，391.6，590.8，337.6，342.4，400 mm，降雨逐年引发的入渗深度依次为 160，220，400，260，260，120 cm，累积入渗深度依次可达 180，220，400，700，1 000，1 400 cm。

参考文献：

[1]　李祥东.西北干旱区土壤水分时空变异特征及其影响因素研究[D].陕西 杨凌：中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心)，2019.

[2]　李智飞.河西走廊地区水资源脆弱性指标及应用研究[D].北京：华北电力大学，2014.

[3]　张建云.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京：科学出版社，2007.

[4]　杨文治，田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报，2004，41(1)：1-6.

[5]　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[J].地球科学进展，2016，31(1)：14-22.

[6]　兰志龙，潘小莲，赵英，等.黄土丘陵区不同土地利用模

式对深层土壤含水量的影响[J].应用生态学报,2017,28(3):847-855.

[7] 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[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-223.

[8] 李萍,李同录,付昱凯,等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3551-3560.

[9] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.

[10] 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 [J]. Agricultural Water Management,2006,85(1/2):67-76.

[11] 缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):13-18.

[12] 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[J].水土保持研究,2015,22(2):334-339.

[13] 张文飞,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水[J].农业工程学报,2017,33(7):140-148.

[14] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.

[15] 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[J].水土保持学报,2017,31(3):231-238.

[16] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology,2010,381(1/2):9-17.

[17] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J].Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(4):437-448.

[18] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China [J].Geoderma,2010,159(1/2):99-108.

[19] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J].Geoderma,2008,143(1):91-100.

[20] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.

[21] 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[J].生态学报,2008,28(3):1045-1051.

[22] 冯金超,党宏忠,王檬檬,等.晋西黄土区苹果园生长季土壤水分动态[J].水土保持研究,2020,27(1):139-145.

[23] 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[J].林业科学,2018,54(7):24-30.

[24] 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[J].农业工程学报,2007,23(11):77-83.

[25] 孙剑,李军,王美艳,等.黄土高原半干旱偏旱区苜蓿—粮食轮作土壤水分恢复效应[J].农业工程学报,2009,25(6):33-39.

(上接第 160 页)

[30] Jin T T, Fu B J, Liu G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(8):2519-2530.

[31] 尹秋龙,焦菊英,寇萌.极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J].自然资源学报,2015,30(3):459-469.

[32] 梁海斌.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤水分特征研究[D].太原:山西大学,2014.

[33] Xu M X, Wang Z, Zhao Y G. Stratification ratio of soil organic carbon as an indicator of carbon sequestration and soil quality in ecological restoration [J]. Restoration Ecology,2017,26(3):555-562.

[34] 苏杨,朱健,王平,等.土壤持水能力研究进展[J].中国农学通报,2013,29(14):140-145.

[35] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.

[36] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11):3889-3898.

[37] 温仲明,焦峰,赫晓慧,等.黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J].草业学报,2007,16(1):16-23.

[38] 王凯博,陈美玲,秦娟,等.子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J].西北植物学报,2007,27(10):2089-2096.

[39] Vachaud G A, Silans A P D, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1 [J].Soil Science Society of America Journal,1985,49(4):822-828.

[40] Coppola A, Comegna A, Dragonetti G, et al. Average moisture saturation effects on temporal stability of soil water spatial distribution at field scale [J]. Soil and Tillage Research,2011,114(2):155-164.

[41] 刘江华,刘国彬,陈淑芸.刺槐林地土壤水分与林下植物生物量的关系[J].水土保持研究,2009,16(3):57-60.