

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.008

# 黄丘区自然植被对暴雨的拦蓄作用

## ——以坊塌小流域为例

赵文婷<sup>1</sup>, 姜晓晗<sup>1</sup>, 李萌萌<sup>1</sup>, 焦菊英<sup>1,2</sup>, 严晰芹<sup>2</sup>, 祁泓锬<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 植被对暴雨的拦蓄是调控全球变暖进程中频发的雨洪灾害的重要手段。为探究黄丘区大规模退耕后自然植被坡面对暴雨的拦蓄作用, 针对陕西省延安市安塞区坊塌小流域 2019—2022 年全部发生的 6 场暴雨事件, 使用土壤水分自动监测系统对 1 个灌丛和 3 个草本群落坡面 10 m 土层进行逐小时监测。分析结果表明: 暴雨对草本群落最大补给深度可达 200 cm, 但对灌丛群落仅为 100 cm; 灌丛的拦蓄效果优于草本群落, 草本群落的拦蓄效果随退耕年限增长而提高; 自然灌草植被坡面对低雨量短时暴雨的拦蓄率可达 60.8%, 而对高雨量长历时暴雨仅可拦蓄 40.8%。因此, 建议在黄丘区合理保护和布局灌-草生态系统, 以提升植被-土壤对暴雨的容蓄减灾作用。

**关键词:** 暴雨事件; 灌草植被; 拦蓄作用; 土壤入渗; 黄丘区

中图分类号: S152 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2023)05-0731-13

暴雨是水土流失及洪水灾害的主要诱因, 严重威胁生态环境安全<sup>[1]</sup>。植物-土壤生态系统能够通过冠层和枯枝落叶层的拦挡及“土壤水库”等方式来降低雨洪灾害风险<sup>[2]</sup>。自退耕还林/草工程实施以来, 黄丘区植被覆盖度显著提高<sup>[3]</sup>, 土壤水分的入渗性能和蓄持能力显著提升<sup>[4]</sup>。然而, 在全球变暖导致暴雨发生频率大幅增加的背景下<sup>[5]</sup>, 退耕恢复植被对暴雨的拦蓄作用及抵御能力如何还不是很明确, 但这对提升植被-土壤生态系统对暴雨的减灾作用、优化植被恢复布局具有重要的指导意义。因此, 暴雨条件下不同退耕植被对水分拦蓄和土壤入渗能力的影响仍需进一步研究<sup>[6]</sup>, 明确退耕恢复植被对暴雨产流的影响及其对降雨的调控, 以尽最大可能提升植被对降雨的调控作用, 避免降雨-洪水灾害链的形成。

近年来, 植被对降雨的拦蓄作用受到国际广泛关注<sup>[7-8]</sup>。然而, 由于退耕还林/草工程为中国特色生态恢复工程, 故国内研究聚焦于退耕造成的影响, 多集中在不同植被类型与恢复方式对降雨的响应以及干化土层形成特征与恢复等<sup>[9]</sup>, 而针对不同暴雨条件下退耕植被蓄水减洪能力的研究较少。在黄丘区, 一般降雨的土壤补给深度为 100~200 cm, 仅有较大的降雨事件才能渗透至深层土壤<sup>[10]</sup>。如在 2013 年 7 月延安长历时极端降雨事件中(总雨量高达 792.9 mm), 自然退耕草本群落的补给深度可达 500 cm, 但人工退耕林地仅可补给至 300 cm<sup>[11]</sup>。虽然极端降雨事件发生频率相对较低, 但降雨强度在 50~100 mm/d 的暴雨即可导致黄丘区在短时间内产生地表径流, 在造成雨水资源浪费的同时, 也产生了严重的土壤侵蚀<sup>[11]</sup>。

人工植被掠夺性地利用有限的土壤水资源, 形成了明显的土壤干层, 影响生态系统的可持续发展<sup>[4, 12]</sup>。而自然恢复的植被由于与生态环境相适宜而具有较高的生态功能<sup>[13]</sup>。因此, 本文采用多探头土壤水分自动监测仪进行长期连续定位观测, 对 2019—2022 年陕西省延安市安塞区坊塌小流域不同退耕年限的自然恢复

收稿日期: 2023-03-16; 网络出版日期: 2023-10-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231008.1457.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2243213; 42077078)

作者简介: 赵文婷(1998—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面的研究。

E-mail: waiting831@126.com

通信作者: 焦菊英, E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

植被坡面土壤水分对暴雨的动态响应特征进行分析,以揭示黄丘区坡面植被自然恢复后对暴雨的拦蓄作用,为区域合理利用土壤水资源和优化植被布局提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省延安市安塞区坊塌小流域位于黄丘区腹地,属第二副区,具有沟壑纵横、地形破碎等典型黄丘区特征,也曾遭受严重的水土流失问题。该流域在1999年被选作退耕还林/草工程的“先行者”进行示范及推广<sup>[14]</sup>,拥有耕地、果园、林地、草地等多种土地利用类型,有坝系、水平梯田等水土保持工程措施,布设有大量径流小区和土壤水分监测仪器,且广泛开展了植被恢复、土壤恢复、土壤碳循环、侵蚀产沙、泥沙连通性等研究<sup>[15-17]</sup>,已成为典型的农业生态小流域和研究小流域。因此,坊塌小流域具有成为后续黄丘区植被恢复建设“由绿变稳”、生态保护与暴雨洪水减灾工作的一把“金钉子”的潜力。坊塌小流域地理坐标介于 $36^{\circ}47'19''\text{N}$ — $36^{\circ}49'35''\text{N}$ 、 $109^{\circ}14'40''\text{E}$ — $109^{\circ}17'09''\text{E}$ ,面积为 $10.5\text{ km}^2$ ,海拔为 $997\sim 1\,731\text{ m}$ ;属于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区,以水力侵蚀为主,多年平均气温为 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为 $542.6\text{ mm}$ ,降雨集中在7—10月且多暴雨,多年平均无霜期为 $160\text{ d}$ <sup>[18]</sup>;属于暖温带落叶阔叶林向暖温带草原区过渡的森林草原区,土壤类型以黄绵土为主,黄绵土颗粒组成以细砂粒和粉粒为主,疏松多孔,渗透性较强<sup>[19]</sup>。该流域优势植物种与黄丘区也基本相似<sup>[20]</sup>,主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)等<sup>[21]</sup>,典型自然植物群落主要为铁杆蒿群系和狼牙刺群落。

### 1.2 样地选择、土壤水分与降雨监测

自然植被恢复演替时间长,而完整的固定样地演替观测很少,因此“时空互代”法被广泛使用在自然植被恢复研究中。黄丘区的植被恢复演替需经历一年生草本群落、多年生蒿禾类草本群落、灌木群落和乔木群落阶段<sup>[20-22]</sup>。退耕还林/草工程已大规模实行24 a,已由一年生草本群落演替到多年生草本群落及灌木群落阶段,但尚未演替到乔木群落阶段。其中,半灌木铁杆蒿是植被演替到多年生蒿禾类草本阶段的主要群落的建群种或亚优势种;而灌木狼牙刺在多年生蒿类群落阶段侵入,因处于干燥贫瘠生境,基质恢复慢,可存留 $20\sim 40\text{ a}$ ,是黄丘区干旱生境中的主要植被类型<sup>[23-24]</sup>。依据课题组于2022年对黄丘区森林带、森林草原带和草原带的42个坡面物种组成的调查结果,铁杆蒿群系出现频率高达 $95.2\%$ ,狼牙刺群落约占灌木群落的 $60.0\%$ 。可见,铁杆蒿群系和狼牙刺群落是该区域的典型植物群落。同时,2019—2022年坊塌小流域的79个草本样方内铁杆蒿群系出现频率为 $81.0\%$ 。其中,铁杆蒿群落占铁杆蒿群系的 $36.9\%$ ,铁杆蒿+草木樨状黄芪群落占 $32.7\%$ ,铁杆蒿+长芒草群落占 $15.6\%$ 。在26个灌木样方中,狼牙刺群落占 $42.3\%$ 。可见,这4种植被群落类型在坊塌小流域也具有代表性。因此,本研究选取了立地条件相似且具有这4种典型植物群落的连贯坡面,通过多次野外考证与农户走访确定退耕年限,最终选择截至2022年退耕47 a的铁杆蒿群落、32 a的铁杆蒿+草木樨状黄芪群落、12 a的铁杆蒿+长芒草群落和47 a的灌丛狼牙刺群落作为研究对象,从不同演替阶段和不同群落结构差异角度进行对比分析,以深入了解退耕还林/草工程实施后不同恢复年限间同一群系的自然草本群落、灌木群落和草本群落对土壤水分调控效果的差异性,以评估自然退耕坡面对暴雨的抵御效果,为后续制定合理的植被建设方向提供科学参考,以实现退耕还林/草工程成果的可持续性。

退耕坡面上各布设有1个径流小区(图1,表1),规格为 $2.5\text{ m}\times 10.0\text{ m}$ 。同时,坡面均设有CS650-CR1000土壤水分自动监测系统(美国Campbell公司),可对 $0\sim 1\,000\text{ cm}$ 土层深度的土壤体积含水量进行长期原位、多层次的土壤水分动态监测,水分探头安装深度分别为10、30、50、70、100、200、300、500、700和 $1\,000\text{ cm}$ ,监测频率为1次/h,体积含水率变化范围为 $4.0\%\sim 34.1\%$ 。土壤水分观测年限为2019—

2022年,4 a的小时尺度0~1 000 cm土层的土壤水分监测数据精细地刻画了降雨过程中土壤水分的动态变化情况,为退耕还林/草工程生态效益评价以及雨洪灾害预防提供了宝贵的数据支撑。

降雨数据通过布置在本研究退耕植被坡面的翻斗式自记雨量计获取,监测频率为4次/h。降雨过程依据最小降雨间歇6 h进行划分,即降雨时间间隔小于6 h则为1次降雨过程,反之则为2次<sup>[25]</sup>。并对降雨事件的最大30 min雨强( $I_{30}$ )和平均雨强等参数进行计算。

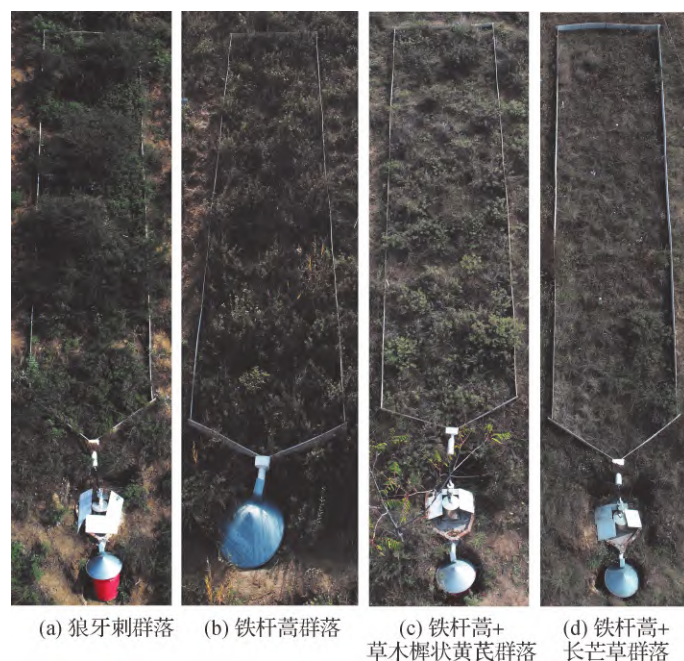


图1 退耕植被坡面的径流小区概况

Fig. 1 Runoff-plot profiles of sample sites

表1 样地不同植物群落基本信息

Table 1 Basic information on the different vegetation slope of sample sites

指标	狼牙刺群落	铁杆蒿群落	铁杆蒿+草木樨状黄芪群落	铁杆蒿+长芒草群落
坡度/(°)	26.8	28.0	25.4	27.7
退耕年限/a	44~47	44~47	29~32	9~12
植被盖度/%	50.00±7.70	56.00±11.80	48.70±8.60	21.60±5.60
枯落物盖度/%	20.80±9.90	27.30±16.00	17.10±6.20	9.40±2.80
结皮盖度/%	14.80±8.80	24.50±8.80	49.80±17.40	35.90±12.90
土壤重度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.09±0.05	1.11±0.02	1.11±0.03	1.15±0.02
毛管孔隙度/%	52.93±0.58	52.47±1.10	51.26±0.92	50.81±0.61
总孔隙度/%	54.84±1.05	54.96±0.84	52.56±0.79	52.25±0.87
力稳性团聚体含量/%	75.14±0.04	78.56±3.91	67.76±0.50	68.65±1.50
水稳性团聚体含量/%	61.34±4.45	66.12±2.13	59.18±4.00	50.64±5.49
有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	18.78±7.73	12.03±3.87	8.17±0.28	7.62±0.95

### 1.3 土壤对降雨拦蓄作用的表征指标

土壤对降雨的拦蓄即为降雨的就地入渗<sup>[26]</sup>,其中降雨进入土壤后在土层内的分布及其随时间的变化是

土壤拦蓄降雨的重要过程,故本研究选用土壤入渗量、土壤水分入渗率/消退率对暴雨条件下土壤的拦蓄过程进行描述,并采用土壤水分补给率指示土壤对暴雨的拦蓄效益。

(1) 土壤入渗量。某一土层在某一时刻的土壤蓄水量与降雨起始时刻土壤蓄水量的差值<sup>[27]</sup>。

$$S_i = W_{i,t} - W_{i,0} \quad (1)$$

$$S = \sum_i^n S_i \quad (2)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  土层土壤入渗量, mm;  $W_{i,t}$  为  $t$  时刻第  $i$  土层的土壤蓄水量, mm;  $t$  为降雨结束时刻(即雨后 0 h);  $W_{i,0}$  为降雨起始时刻第  $i$  土层的土壤蓄水量, 也称雨前土壤含水量, mm;  $S$  为观测所有土层的土壤水分入渗总量, mm;  $n$  为土层总数。本研究中  $i=1-10$  分别代表 10、30、50、70、100、200、300、500、700 和 1 000 cm 土层。

(2) 土壤蓄水量。一定土层厚度土壤中的总水量, 由不同土层的土壤体积含水量换算得出<sup>[28]</sup>。

$$W = \sum_i^n \theta_i d_i \quad (3)$$

式中:  $W$  为土壤蓄水量, mm;  $\theta_i$  为各土层的体积含水量, 即土壤水分自动监测数据,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $d_i$  为对应土层的厚度, mm。

(3) 土壤水分入渗率/消退率<sup>[29]</sup>。降雨过程中土壤水分入渗量/消退量与土壤水分增加/消减时间的比值。

$$V_i = \frac{S_{i,z}}{t_{i,\max}} \quad (4)$$

$$R_i = \frac{S_{i,x}}{t_{96} - t_{i,\max}} \quad (5)$$

$$S_{i,z} = W_{i,\max} - W_{i,0} \quad (6)$$

$$S_{i,x} = W_{i,\max} - W_{i,96} \quad (7)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  土层土壤水分入渗率,  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $R_i$  为第  $i$  土层土壤水分消退率,  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $t_{i,\max}$  为降雨开始时至第  $i$  土层土壤含水量达到最大值的时长, h;  $t_{96}$  代表雨后 96 h, 值为 96, 因为在本研究中各土层土壤入渗过程在 96 h 内基本完成, 且不存在后续场次降雨的干扰;  $S_{i,z}$  为第  $i$  土层土壤水分入渗量, mm;  $S_{i,x}$  为第  $i$  土层土壤水分消退量, mm;  $W_{i,\max}$  为第  $i$  土层土壤含水量达到最大值时的土壤蓄水量, mm;  $W_{i,0}$  和  $W_{i,96}$  分别为雨后 0 h 和 96 h 第  $i$  土层的土壤蓄水量, mm。

(4) 土壤水分补给率<sup>[29]</sup>。降雨转化为土壤水分的量占降水量的比值。

$$B = \frac{S_t}{P} \times 100\% \quad (8)$$

$$S_t = W_t - W_0 \quad (9)$$

式中:  $B$  为观测的所有土层的土壤水分补给率, %;  $S_t$  为  $t$  时刻观测的所有土层的总土壤入渗量, mm;  $P$  为降水量, mm;  $W_t$  为  $t$  时刻观测的所有土层的总土壤蓄水量, mm;  $W_0$  为降雨开始时刻观测所有土层的总土壤蓄水量, mm。

## 1.4 数据分析

采用 CS650-CR1000 土壤水分自动监测系统仪器的配套软件 LoggerNet 和 Microsoft Excel 2016 进行土壤水分数据提取及分析; 基于 SPSS 26.0 开展土壤水分指标与降雨指标、雨前土壤含水量及土壤深度的 K-S 正态性检验和 Spearman 相关性分析, 以探究不同指标之间的相关关系; 本文中的图件均通过 Origin 2022 和 Adobe Photoshop 2020 绘制。

## 2 结果分析

### 2.1 暴雨事件特征

根据国家气象局降雨等级划分标准, 研究区在 2019—2022 年共发生 6 场暴雨事件。其中, 暴雨 5 场,

大暴雨 1 场, 累计降水量为 666.5 mm, 占 4 a 内共发生的 244 次降雨事件总降水量的 63.7%。同时, 这些暴雨事件的径流深累计 35.8 mm, 占比高达总径流深的 67.3%。这 6 场暴雨事件的降雨与产流特征如图 2 和表 2 所示。根据各场暴雨的历时和雨量特征将以上 6 场暴雨划分为长历时、高雨量暴雨(暴雨 3 和 5)和短历时、低雨量暴雨(暴雨 1、2、4 和 6)。同时结合强度划分标准<sup>[30]</sup>将其进一步划分为长历时、中雨强、高雨量暴雨(暴雨 3 和 5), 短历时、中雨强、低雨量暴雨(暴雨 2 和 6)以及短历时、高雨强、低雨量暴雨(暴雨 1 和 4)。

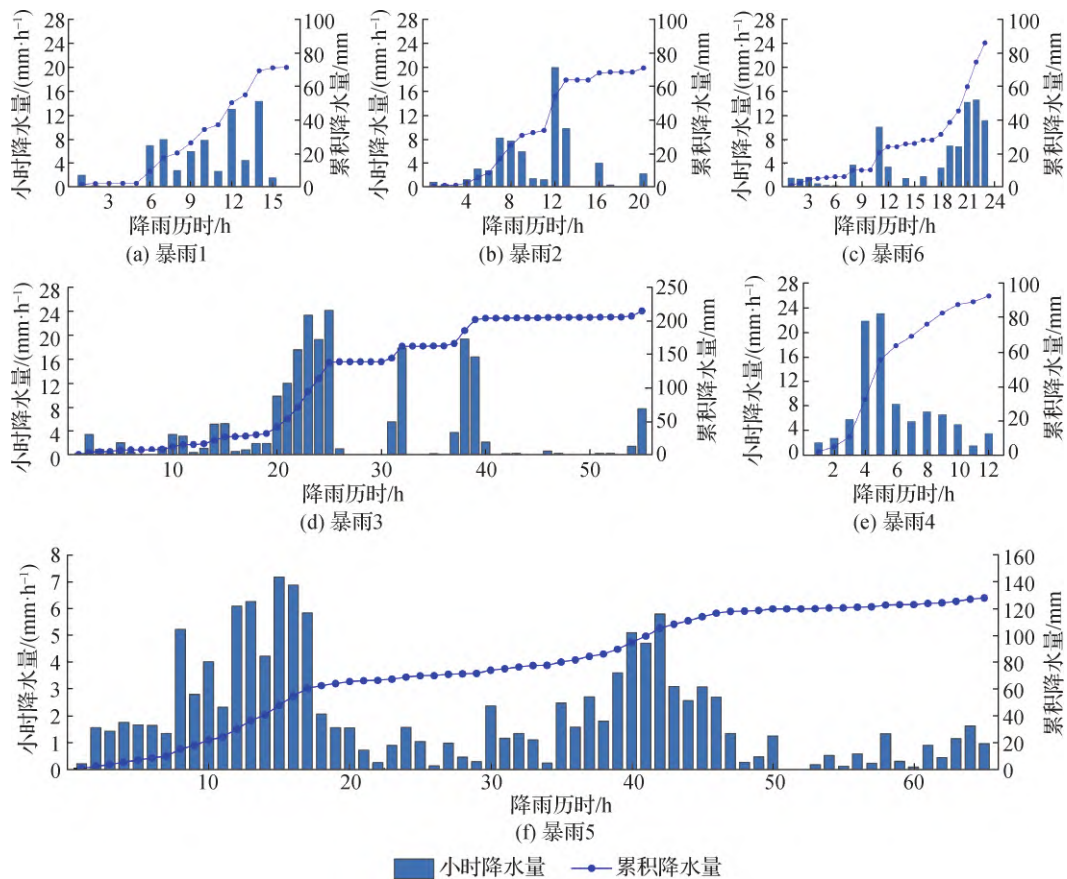


图 2 6 场暴雨事件累积降水量及降雨过程

Fig.2 Cumulative rainfall and rainfall process for the 6 heavy rainfall events

表 2 2019—2022 年暴雨事件及产流特征

Table 2 Heavy rainfall events and runoff characteristics from 2019 to 2022

名称	时间	降水量/mm	对 4 a 总降雨的贡献/%	降雨历时/h	平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	$I_{30}$ /(mm·h <sup>-1</sup> )	径流深/mm	对 4 a 总径流深的贡献/%
暴雨 1	2019-07-21	72.1	6.9	15.0	4.81	21.60	3.77	7.1
暴雨 2	2019-08-03	72.0	6.9	19.8	3.72	30.60	4.45	8.4
暴雨 3	2020-08-04	215.2	20.6	53.8	4.00	35.80	24.28	45.7
暴雨 4	2021-09-03	92.8	8.9	11.8	7.99	31.04	2.23	4.2
暴雨 5	2021-10-03	127.4	12.2	63.9	1.99	12.58	0.54	1.0
暴雨 6	2022-07-14	87.0	8.3	22.0	3.97	24.18	0.52	1.0

## 2.2 暴雨条件下不同植物群落坡面土壤水分入渗特征

暴雨事件对植物群落坡面的补给深度最深可达 200 cm。其中,暴雨对草本群落坡面的补给深度为 70 ~ 200 cm,而对灌丛坡面的补给深度仅为 70 ~ 100 cm。且不同暴雨类型对植物群落坡面的补给深度也存在差异。在短历时、低雨量的暴雨事件中,各植物群落充分入渗后的平均补给深度为 70 ~ 100 cm,其中,土壤水分入渗深度( $d$ )对暴雨 1 的响应最小,经充分入渗,除铁杆蒿群落的补给深度达到 100 cm,其余 3 个群落的最大入渗深度均为 70 cm;而对于长历时、高雨量暴雨事件,各群落土壤水分补给深度为 100 ~ 200 cm(图 3,其中, $W_0$  为雨前土壤含水量; $S_0$  为雨后 0 h 土壤入渗量; $S_{96}$  为雨后 96 h 土壤入渗量),其中,狼牙刺群

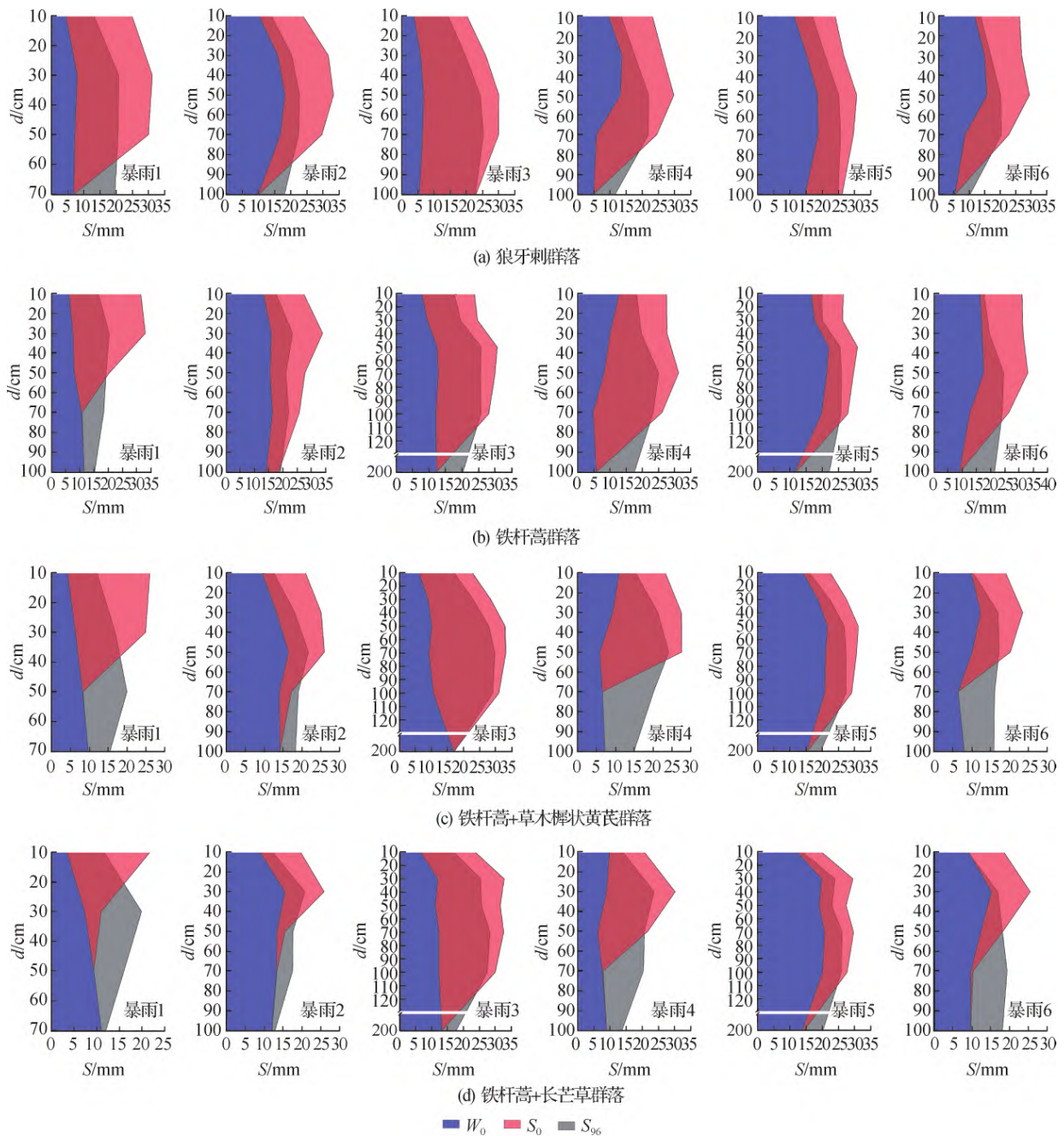


图3 不同暴雨事件下植物群落坡面各土层水分入渗量与入渗深度

Fig.3 Soil moisture infiltration and depth of each soil layer on plant community slopes under different heavy rainfall events

落的补给深度为 100 cm, 其余群落均为 200 cm, 这表明长历时、高雨量的暴雨事件对植物群落坡面的入渗深度更深。

植被群落坡面土壤水分入渗总量对暴雨的响应较为复杂, 主要受到降水量和  $I_{30}$  的主导 ( $p < 0.05$ ), 而平均雨强对土壤水分入渗总量的影响却并不显著 ( $p > 0.05$ ) (表 3)。各植被群落坡面在短历时、低雨量暴雨中的平均土壤水分入渗总量为 48.7 mm (图 3), 其中, 暴雨 1 和暴雨 2 的降水量相当, 但暴雨 2 的  $I_{30}$  是暴雨 1 的 1.4 倍, 理应暴雨 1 的土壤入渗总量高于暴雨 2, 但由于暴雨 2 的雨前土壤含水量高于暴雨 1, 其各群落坡面的降雨入渗总量较暴雨 1 低 6.06% ~ 16.00%, 平均入渗深度向下延伸 30 ~ 50 cm。在长历时、高雨量暴雨事件中, 各植被群落坡面的平均土壤水分入渗总量为 72.9 mm, 远高于短历时、低雨量暴雨事件 (图 3)。其中, 暴雨 5 的降水量低于暴雨 3, 但平均雨前土壤含水量较暴雨 3 多 43.1 mm, 其在植物群落坡面的平均土壤水分入渗量较暴雨 3 少 50.3 mm。可见, 除了降水量和  $I_{30}$  外, 雨前土壤含水量也会对土壤入渗产生影响。

土壤水分入渗率 ( $V$ ) 随着平均雨强和  $I_{30}$  的增加而增加 ( $p < 0.01$ ) (表 3)。其中, 短历时、高雨强、低雨量暴雨的土壤水分入渗率为 2.11 mm/h; 其次为短历时、中雨强、低雨量暴雨,  $V = 1.11$  mm/h; 而长历时、中雨强、大雨量暴雨的  $V$  仅为 0.96 mm/h (图 4)。

灌丛群落的入渗能力强于草本群落, 而草本群落的入渗能力随退耕年限的增加而增加。暴雨条件下灌丛和草本植物群落坡面 0 ~ 200 cm 的土壤水分入渗总量介于 22.1 ~ 102.9 mm (图 3)。其中, 灌丛狼牙刺群落坡面对暴雨响应最为强烈, 入渗总量均值高达 61.4 mm; 而草本群落铁杆蒿 + 长芒草、铁杆蒿 + 草木樨状黄芪和铁杆蒿群落坡面的入渗总量分别为 56.6、51.3 和 65.7 mm。不同植物群落坡面的土壤水分入渗率也展现出同样趋势, 灌丛群落较草本群落的土壤水分入渗率高 10.9% ~ 41.2%, 铁杆蒿群落较铁杆蒿 + 长芒草群落和铁杆蒿 + 草木樨状黄芪群落的土壤水分入渗率分别增加 0.50 和 0.15 mm/h (图 4)。

表 3 土壤水分指标与降雨指标、雨前土壤含水量及土壤深度的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil moisture indexes with rainfall indexes, soil moisture content before rain and soil depth

指标	土壤水分入渗总量	土壤水分补给率	各层土壤水分入渗量	土壤水分入渗率
降水量	0.508*	-0.310	0.290**	-0.127
$I_{30}$	0.522**	0.169	0.411**	0.296**
平均雨强	0.317	0.416*	0.392**	0.398**
降雨历时	0.078	-0.536**	-0.089	-0.365**
雨前土壤含水量	-0.310	-0.190	-0.361**	-0.307**
土壤深度	—	—	-0.540**	-0.673**

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平上显著相关; \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上极显著相关。土壤水分入渗总量及补给率相关性分析的样本数为 24, 各层土壤水分入渗量及入渗率的样本数为 122 个。

### 2.3 暴雨条件下不同植物群落坡面土壤水分的补给特征

降雨结束初期退耕时间长的群落坡面对暴雨的拦蓄作用较退耕时间短的群落更强, 但坡面的拦蓄作用会随时间的推移呈降低趋势, 而且退耕年限长的植物群落坡面对暴雨的拦截作用随时间下降的幅度较退耕年限短的群落更大。因为植物群落坡面的土壤水分补给率与暴雨事件的降雨历时呈现极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ ) (表 3)。在短历时、低雨量暴雨中, 退耕 47 a 的铁杆蒿群落和狼牙刺群落坡面雨后 0 h 的平均土壤水分补给率大于退耕时间较短的铁杆蒿 + 草木樨状黄芪和铁杆蒿 + 长芒草群落; 而在降雨结束 96 h 后, 退耕年限较长的狼牙刺群落和铁杆蒿群落的平均土壤水分补给率分别降低了 26.3%、21.1%, 但退耕年限较短的群落仅降低了 9.3% 和 4.0% (表 4)。

高雨强暴雨较中雨强暴雨的平均土壤水分补给能力更强。其中, 短历时、高雨强、低雨量暴雨的雨后 0 h 平均土壤水分补给率为 64.8%, 雨后 96 h 降低至 53.8%; 而短历时、中雨强、低雨量暴雨平均土壤水

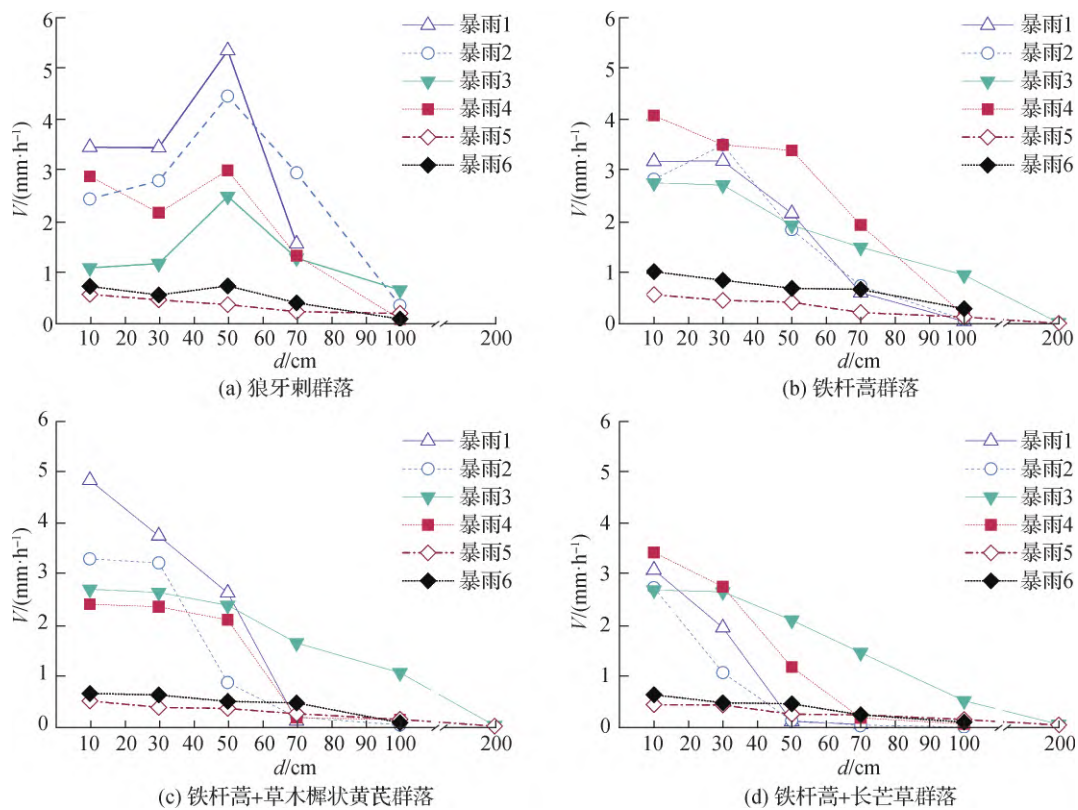


图4 不同暴雨条件下植物群落各土层的土壤水分入渗率

Fig. 4 Soil moisture infiltration rate of each soil layer of plant community under different heavy rainfall events

分补给率为 56.8%，雨后 96 h 缩减为 33.3%；在长历时、中雨强、高雨量暴雨中，雨后 0 h 土壤水分补给率为 40.8%，远低于短历时、低雨量暴雨条件下的土壤水分补给率(表 4)。

表 4 不同暴雨及植物群落坡面雨后 0、96 h 的土壤水分补给率

Table 4 Soil moisture recharge rate at 0 and 96 h after rain on slopes with different heavy rainfall events and vegetation slope 单位: %

暴雨	暴雨类型	0 h					96 h				
		狼牙刺群落	铁杆蒿群落	铁杆蒿+草木樨状黄芪群落	铁杆蒿+长芒草群落	平均值	狼牙刺群落	铁杆蒿群落	铁杆蒿+草木樨状黄芪群落	铁杆蒿+长芒草群落	平均值
暴雨 1	短历时、高雨	92.9	88.2	56.4	28.2	64.8	66.3	64.1	49.0	39.5	53.8
暴雨 4	强、低雨量	66.6	82.5	56.4	47.5		42.6	67.4	51.5	49.8	
暴雨 2	短历时、中雨	80.2	81.3	50.2	30.0	56.8	37.1	39.6	31.2	25.0	33.3
暴雨 6	强、低雨量	64.8	67.6	35.1	45.4		29.8	40.4	34.4	29.1	
暴雨 3	长历时、中雨	47.2	42.3	47.8	41.5	40.8	36.4	34.8	36.9	34.7	30.0
暴雨 5	强、高雨量	46.3	34.7	35.5	30.9		27.6	24.0	22.2	21.7	
平均值		66.3	66.1	46.9	37.2	—	40.0	45.0	37.6	33.3	—

不同植物群落各土层的土壤水分消退率( $R$ )随着土壤深度的增加快速下降(图 5)。其中,狼牙刺、铁杆蒿群落 10~50 cm 土层土壤水分消退率相对较高,平均值分别为 0.13 mm/h 和 0.11 mm/h; 经 96 h 充分入渗后,土壤水分向深层运移,70~200 cm 土层的土壤水分增加,所以 70~100 cm 土层的土壤水分消退率较



低, 平均值分别为 0.04 mm/h 和 0.03 mm/h。铁杆蒿 + 草木樨状黄芪、铁杆蒿 + 长芒草群落 10 ~ 30 cm 土层的土壤水分消退率相对较高, 平均值均为 0.11 mm/h, 而 50 ~ 100 cm 土层的土壤水分消退率平均值均降至 0.03 mm/h。这 4 种群落坡面各土层的平均土壤水分消退率分别为 0.11、0.09、0.08、0.08 mm/h。对不同暴雨事件而言, 长历时、高雨量暴雨事件的土壤水分消退率平均值为 0.06 mm/h; 而短历时、低雨量暴雨事件的消退率平均值为 0.09 mm/h, 其中的高雨强暴雨事件的土壤水分消退率高达 0.11 mm/h, 特别是暴雨 1, 土壤水分消退率高达 0.15 mm/h, 各植物群落在 10 ~ 30 cm 土层的土壤水分消退率为其他场次暴雨相应土层土壤水分消退率的 0.5 ~ 2.3 倍。

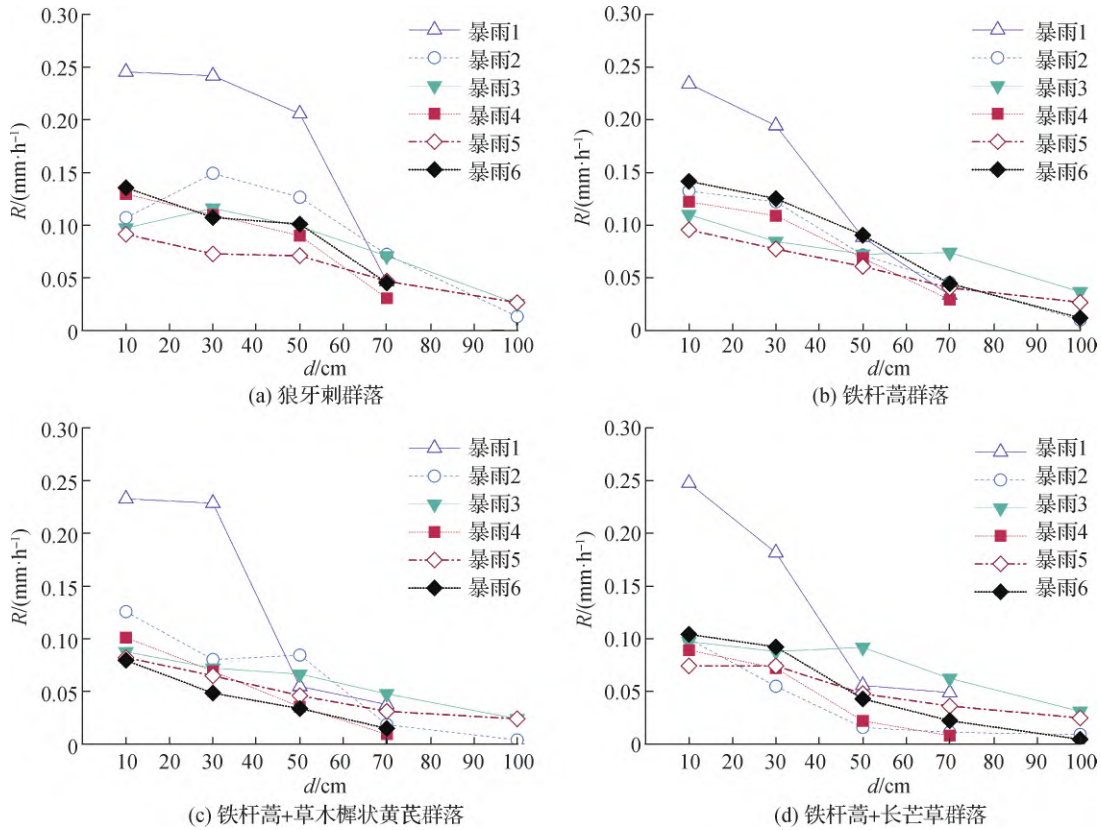


图 5 不同植物群落坡面各土层的土壤水分消退率

Fig. 5 Soil moisture abatement rate of each soil layer on slopes with different vegetation slope

### 3 讨 论

黄丘区坊塌小流域自实行退耕还林/草措施以来, 植被覆盖度及地上生物量大幅增加, 土壤水分物理性质和结构得以有效改善<sup>[31]</sup>, 但退耕后土壤水分对暴雨的响应研究仍有不足, 所以本研究采用由自计雨量计获取的 2019—2022 年流域内发生的 6 场暴雨进行了研究, 虽然暴雨次数较少, 但通过对 2007—2020 年位于黄丘区的绥德县、志丹县和吴起县的暴雨事件统计发现, 这些站点在 14 a 内均仅发生了 7 次暴雨和 1 次大暴雨, 而在 2017—2020 年 4 a 内发生了 3 ~ 4 次暴雨和 1 次大暴雨。可见, 黄丘区暴雨事件的出现愈加频繁。因此, 坊塌小流域在 4 a 监测到的 5 场暴雨和 1 场大暴雨事件, 在数量上具有典型性。同时, 6 场暴雨事件可被划分为“长历时、中雨强、高雨量暴雨”、“短历时、中雨强、低雨量暴雨”以及“短历时、高雨强、低雨量暴雨”3 种黄丘区常出现的类型<sup>[32]</sup>, 且均有 2 场重复。因此, 虽然本研究时段中仅发生了 6 场暴雨事件,

但其对黄丘区暴雨事件的发生是具有代表性的。

当前,黄丘区的自然植被坡面土壤水分对降雨的响应过程较为复杂,主要受降水量、 $I_{30}$ 、降雨历时的主导调控。特别是  $I_{30}$  较平均雨强影响的解释力更为显著,因为平均雨强容易掩盖自然降雨过程中的“强度爆发”与“间歇性”等降雨波动特征<sup>[27]</sup>。随着降雨强度增加,土壤拦蓄率随之增加,且在 4.8 和 7.9 mm/h 的高雨强暴雨事件中坡面土壤水分入渗率达到 2.11 mm/h,远超当地的土壤稳渗率 1.15 ~ 1.30 mm/h<sup>[33]</sup>,但并未发生超渗产流事件,可能黄丘区的植被建设已使降雨-产流模式发生自“超渗产流”向“蓄满产流”的转变<sup>[34]</sup>。在降雨过程中,表层土壤水分先受到补充;由于不同土层间土水势的差异,水分逐渐向深层转移;但随着降雨历时的增加,不同土层间的土水势差值逐渐减小,导致各自然植物群落坡面的土壤水分入渗率和补给率随降雨历时的延伸出现不同程度的下降<sup>[35]</sup>。

水分在土壤剖面内的运移及分配受到植被类型、土壤质地和雨前土壤含水量等下垫面因素的调控。在黄丘区,对土壤水分的补给深度基本集中在地下 70 ~ 200 cm,其中草地坡面的补给深度最深可达 200 cm。但由于灌丛蒸散量大,表层土壤水分消耗剧烈,因此灌丛群落坡面 100 cm 以下土层的水分难以得到补充<sup>[36]</sup>。此外,植被恢复与重建过程中,土壤有机质、孔隙度、团粒结构及水稳性团聚体增加,土壤重度降低<sup>[37-38]</sup>,土壤质地发生改善,所以呈现退耕年限久的植被对暴雨的拦蓄能力强和灌丛群落坡面较草本群落坡面对暴雨的拦蓄能力更强的规律。具体在本研究中,草本群落的土壤有机质含量自退耕 12 a 的 7.62 g/kg 提升至 12.03 g/kg,水稳性团聚体含量由 50.64% 提升至 66.12%,毛管孔隙度由 50.81% 提升至 52.47%,土壤重度因此降低了 0.04 g/cm(表 1),促使水分的下渗与贮蓄<sup>[29,31]</sup>。故草本群落中,退耕 47 a 的入渗量较退耕 32 a 和 12 a 分别提升 14.0% 和 22.0%。灌木群落阶段的毛管孔隙度、有机质含量比同退耕年限的草本群落更高,土壤重度更低,故而拥有更强的入渗能力<sup>[27,39]</sup>。同时,退耕年限长的狼牙刺和铁杆蒿群落坡面由于土壤孔隙度的增加,对其土层内入渗的土壤水分再分配迅速,也可迅速排空大部分进入浅土层内的降雨,如若短期内再次降雨,仍可容纳较多的雨水。此外,来自降雨的入渗水分首先要补足表层因植被导致的水分亏缺才能继续下渗,所以雨前土壤含水量高的坡面会较含水量低的坡面先补足表层土壤水分进行深层入渗,导致入渗深度更深。然而,坡面在补足表层水分后,湿润前沿的水力梯度也随之减小,下渗的过程相对更为困难,因此入渗量更少<sup>[27]</sup>。

综上,退耕植被恢复的确有利于增强土壤持蓄水分的能力,减少径流汇集,错峰消洪,促成“伪蓄满产流”。然而,土壤只能拦蓄部分降雨,其产生的径流仍可诱发土壤侵蚀,增大洪水风险。因此,在黄丘区仍应在加强自然恢复植被坡面拦蓄能力的同时,合理配置引排措施,以期更好地发挥植被-土壤对暴雨的拦蓄作用。

## 4 结 论

本研究通过对陕西省延安市安塞区坊塌小流域在 2019—2021 年所发生的 6 次暴雨事件进行逐小时土壤水分监测,定量分析了不同自然灌草植被坡面在不同暴雨类型下的拦蓄效果,探究了黄丘区退耕自然灌草植被坡面对暴雨的拦蓄作用。主要结论如下:

(1) 6 场暴雨对草本群落的补给深度最深可达 200 cm,但对灌丛狼牙刺群落的补给深度最深仅为 100 cm。灌丛狼牙刺群落的土壤水分入渗量、入渗率均较草本群落高;草本群落中,退耕年限长的铁杆蒿群落的入渗量、入渗率均高于退耕年限较短的铁杆蒿+草木樨状黄芪群落和铁杆蒿+长芒草群落。

(2) 灌木狼牙刺群落的土壤水分入渗总量、土壤水分入渗率以及土壤水分补给率较草本群落更优,即灌木狼牙刺群落对暴雨的拦蓄效果更强,草本群落对暴雨的拦蓄效果随退耕年限的增长而提升;但雨前土壤含水量较高会降低植物群落对暴雨的拦蓄作用。

(3) 自然灌草植被坡面在短历时、高雨强、低雨量暴雨前期可平均拦蓄约 64.8% 的降雨,在短历时、中雨强、低雨量暴雨条件下可拦蓄 56.8%,但长历时、中雨强、高雨量暴雨仅可拦蓄 40.8%。

## 参考文献:

- [1] 汪星, 张敬晓, 吕望, 等. 黄土丘陵区深层干化土壤对降雨入渗的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 29–38, 63. (WANG X, ZHANG J X, LYU W, et al. Infiltration response of deep dry soil to rainfall in the loess hilly region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 29–38, 63. (in Chinese))
- [2] 赵炯昌, 卫伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌木植被垂直结构变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8602–8611. (ZHAO J C, WEI W, DUAN X W. Response of the runoff and sediment process on loess slope to the vertical structure changes of three shrub and grass vegetations under simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8602–8611. (in Chinese))
- [3] MAO R C, SONG J X, TANG B, et al. Vegetation variation regulates soil moisture sensitivity to climate change on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128763.
- [4] HAN L, CHANG Y Q, CHEN R, et al. Response of soil moisture to vegetation and trade-off analysis in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109273.
- [5] GRÜNDEMANN G J, van de GIESEN N, BRUNNER L, et al. Rarest rainfall events will see the greatest relative increase in magnitude under future climate change[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 235.
- [6] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性[J]. 地球环境学报, 2022, 13(2): 121–131. (JIN Z. Ecohydrological effects and sustainability of the grain for green project on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(2): 121–131. (in Chinese))
- [7] PARONUZZI P, BOLLA A. Rainfall infiltration and slope stability of alpine colluvial terraces subject to storms (NE Italy) [J]. Engineering Geology, 2023, 323: 107199.
- [8] BAHDDOU S, OTTEN W, WHALLEY W R, et al. Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss[J]. Geoderma, 2023, 431: 116341.
- [9] 白晓, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 109–119. (BAI X, JIA X X, SHAO M A, et al. Simulating long-term soil water balance in response to land use change in the Northern China's Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 109–119. (in Chinese))
- [10] YU X N, HUANG Y M, LI E G, et al. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, Northwest China[J]. Catena, 2018, 161: 96–103.
- [11] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄丘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. (YIN Q L, JIAO J Y, KOU M. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 459–469. (in Chinese))
- [12] GE F C, XU M X, LI B B, et al. Afforestation reduced the deep profile soil water sustainability on the semiarid Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 544: 121240.
- [13] HUANG L M, SHAO M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 199: 102962.
- [14] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398–7409. (LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398–7409. (in Chinese))
- [15] XU Q, LI M M, JIANG X H, et al. Response of rill erosion to rainfall types and maintenance on the Loess Plateau: implications for road erosion control[J]. Catena, 2022, 219: 106642.
- [16] YAN X Q, JIAO J Y, LI M M, et al. Lateral sediment connectivity of landslides occurred under a heavy rainstorm and its influence on sediment yield of slope-channel cascade on the Loess Plateau[J]. Catena, 2022, 216: 106378.
- [17] SUN P C, PAN Y W, WU Y P, et al. The effects of land use and cover changes on lateral carbon losses from an ungagged head-water basin on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: 129751.
- [18] 李玉进, 胡澍, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4100–4107. (LI Y J, HU S, JIAO J Y, et al. Response of soil organic carbon to vegetation restoration in different erosion environments in the hilly-gullied region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4100–4107. (in Chinese))

- [19] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503–1515. (GAO H D, LI Z B, LI P, et al. The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1503–1515. (in Chinese))
- [20] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2981–2997. (JIAO J Y, ZHANG Z G, JIA Y F, et al. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of North Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 2981–2997. (in Chinese))
- [21] 严方晨, 焦菊英, 曹斌挺, 等. 黄丘区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性: 以坊塌流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 64–72. (YAN F C, JIAO J Y, CAO B T, et al. Soil anti-erodibility of abandoned lands during different succession stages of plant community in hilly-gullied region of the Loess Plateau: take Fangta small watershed as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 64–72. (in Chinese))
- [22] 曾光, 杨勤科, 张信宝. 黄丘区退耕地植被自然恢复过程: 以吴起县双树沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 48–52. (ZENG G, YANG Q K, ZHANG X B. Natural succession process of vegetation on the abandoned land in the hilly-gully region of Loess Plateau: a case study of Shuangshugou watershed in Wuqi County[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(3): 48–52. (in Chinese))
- [23] 朱志诚. 陕北黄土高原灌木林的类型及其动态特性[J]. 陕西林业科技, 1992(1): 36–42. (ZHU Z C. The types and dynamic characteristics of shrubs on Loess Plateau in North Shaanxi[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 1992(1): 36–42. (in Chinese))
- [24] 徐学华, 张文辉, 张慧, 等. 黄土丘陵区狼牙刺群落恢复过程中物种多样性动态研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(3): 1–5. (XU X H, ZHANG W H, ZHANG H, et al. Study on the species diversity dynamics of *Sophora davidii* community in loess hilly region[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(3): 1–5. (in Chinese))
- [25] DUNKERLEY D. The importance of incorporating rain intensity profiles in rainfall simulation studies of infiltration, runoff production, soil erosion, and related landsurface processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126834.
- [26] 陈宝根, 王仕琴, 宋献方. 一维土壤水分运动模拟在土壤水分特征研究中的应用: 以华北平原衡水实验站为例[J]. 水文, 2011, 31(3): 64–70. (CHEN B G, WANG S Q, SONG X F. Application of 1-D soil water movement simulation in research on soil water characteristics: a case of Hengshui experimental station[J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(3): 64–70. (in Chinese))
- [27] 靳晓辉, 陈敏建, 闫龙, 等. 不同灌溉方式对降雨入渗深度的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(11): 1168–1174. (JIN X H, CHEN M J, YAN L, et al. Influences of different irrigation methods on rainfall infiltration depth[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(11): 1168–1174. (in Chinese))
- [28] JIA Y H, SHAO M G. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 33–42.
- [29] CUI Z, HUANG Z, WANG Y B, et al. Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127893.
- [30] 罗琳, 王忠静, 刘晓燕, 等. 黄河流域中游典型支流汛期降雨特性变化分析[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 848–855. (LUO L, WANG Z J, LIU X Y, et al. Changes in characteristics of precipitation in flood season over five typical basins of middle reaches of the Yellow River in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7): 848–855. (in Chinese))
- [31] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169–175. (YAN Q H, YUAN C P, LEI T W, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 169–175. (in Chinese))
- [32] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299–305. (JIANG D S, HUANG G J. Study on the filtration rate of soils on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(4): 299–305. (in Chinese))
- [33] JIN Z, GUO L, YU Y L, et al. Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141375.
- [34] 梁越, 焦菊英. 黄土高原小流域产沙性降雨标准分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 8–14. (LIANG Y, JIAO J

- Y. Analysis on rainfall standards while sediment occurring in small watersheds on the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(3): 8–14. (in Chinese)
- [35] PARIZEK B, ROSTAGNO C M, SOTTINI R. Soil erosion as affected by shrub encroachment in Northeastern Patagonia [J]. *Journal of Range Management*, 2002, 55(1): 43–48.
- [36] 杨新民, 杨文治. 灌木林地的水分平衡研究 [J]. *水土保持研究*, 1998, 5(1): 109–118. (YANG X M, YANG W Z. Study on the water balance in shrub land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(1): 109–118. (in Chinese))
- [37] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 等. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 62–69. (CHEN W Y, ZHANG S N, HUA R, et al. Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 62–69. (in Chinese))
- [38] 顾朝军, 穆兴民, 孙文义, 等. 极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1755–1767. (GU C J, MU X M, SUN W Y, et al. Comparative analysis of the responses of rainstorm flood and sediment yield to vegetation rehabilitation in the Yanhe River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1755–1767. (in Chinese))
- [39] 肖婧, 王兵. 黄丘区坡面尺度撂荒地入渗特征影响因素试验研究 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(6): 820–831. (XIAO J, WANG B. Experimental study on the influencing factors of infiltration characteristics of abandoned grassland on slope scale in the loess hilly and gully region [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(6): 820–831. (in Chinese))

## Interception and storage of heavy rainfall by natural vegetations in the loess hilly and gully area\*

ZHAO Wenting<sup>1</sup>, JIANG Xiaohan<sup>1</sup>, LI Mengmeng<sup>1</sup>, JIAO Juying<sup>1,2</sup>, YAN Xiqin<sup>2</sup>, QI Hongkun<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China*)

**Abstract:** Vegetative trapping of heavy rainfall is an important mechanism for mitigating frequent rain-induced flood disasters in the context of global warming. To investigate the role of natural vegetation in trapping heavy rainfall following the widespread implementation of the “the Grain for Green” project in the Loess Hilly and Gully area, an automatic soil moisture monitoring system was employed to continuously monitor the soil moisture content in the top 10 m on one shrub-covered slope and three herbaceous slopes during six heavy rainfall events occurring in the Fangta watershed of the Ansai District, Shaanxi Province, from 2019 to 2022. The results showed that the maximum infiltration depth of the herbaceous slopes was approximately 200 cm during the heavy rainfall events, while for the shrub-covered slope, it was only 100 cm. Furthermore, the shrub-covered slope exhibited superior rainfall interception compared to the herbaceous slopes. The trapping efficiency of the herbaceous slopes improved with each successive year of “Grain for Green” project implementation. Additionally, natural shrub-covered slopes displayed a trapping efficiency of up to 60.8% during low-intensity, short-duration rainfall events, and 40.8% during high-intensity, long-duration rainfall events. Therefore, it is advisable to strategically conserve and allocate shrub-herbaceous ecosystems within the Loess Hilly and Gully area to enhance the storage and mitigation capacity of vegetation and soil in response to heavy rainfall.

**Key words:** heavy rainfall event; scrub and herbaceous; heavy rainfall interception and storage; soil infiltration; the loess hilly and gully area

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2243213; No. 42077078).