

# 黄土丘陵沟壑区沟道造地土壤水分时空变异特征

王 晶<sup>1,2</sup>, 白清俊<sup>1</sup>, 王欢元<sup>2</sup>, 雷 娜<sup>2</sup>, 何 靖<sup>2</sup>

(1.西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048;2.陕西省土地工程建设集团有限责任公司  
陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室  
陕西省土地整治工程技术研究中心 自然资源部土地工程技术创新中心,陕西 西安 710075)

**摘 要:**基于 Van Genuchten 模型测定土壤水动力学参数,采用定点监测方法,在沟道中不同位置以及对照坡面进行土壤水分观测,分析了延安市典型治沟造地项目沟道造地土壤水分的时空变异特征,阐明治沟造地工程对沟道土壤水分的影响。结果表明:(1)土壤水力学参数在沟道土层深度为 40 cm 附近发生了显著改变,0~40 cm 土层土壤容重 1.12~1.25 g·cm<sup>-3</sup>,导水率达到 40 mm·min<sup>-1</sup> 以上,入渗能力强,同时饱和含水率较大,40 cm 以下土层土壤容重在 1.5 g·cm<sup>-3</sup> 左右,导水率在 1.25~1.41 mm·min<sup>-1</sup> 之间,入渗速率明显减小;(2)沟道土壤水分显著大于对照坡面,其季节变化稍滞后于降水的季节变化,整个生长季在 15.76%~21.91% 间波动,高出对照坡面 5% 左右,垂直分布随土层深度的增加而增加,表层最低,为 15.07%,160 cm 土层最高,为 22.84%,深层土壤含水量优势更加显著;沟道土壤水分变异系数在 0.131~0.234 之间,相比较坡面,沟道表层以下土壤水分存在较强的空间异质性,100 cm 以下土层变异系数在 0.2 左右,土壤水分变化活跃;(3)沟口土壤含水量显著高于沟头,土层深度 40 cm 以下的土壤含水量长期达到甚至超过田间持水量。通过治沟造地工程水分综合调控体系,沟道能够为作物生长提供水分充足的生境条件,提高水资源利用效率的同时改善农业生态环境。

**关键词:**治沟造地;沟道;土壤水分;时空变异;黄土丘陵沟壑区

**中图分类号:**S152.7 **文献标志码:**A

## Spatial and temporal variations of soil moisture of gully cultivated land in the loess hilly and gully region

WANG Jing<sup>1,2</sup>, BAI Qingjun<sup>1</sup>, WANG Huanyuan<sup>2</sup>, LEI Na<sup>2</sup>, HE Jing<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;  
2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd., Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural and Resources, Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** The characteristics of spatial and temporal variation of soil moisture in gully were discussed to provide scientific basis for the rational allocation, efficient utilization of water resources and agricultural management in the Loess Plateau. Soil hydrodynamic parameters were measured based on the Van Genuchten model. The fixed-point monitoring method for observing soil moisture at different positions in gully and on control slope was used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in the gully control and land consolidation project in Yan'an City and clarify the impact of the project on the soil moisture in the gully. The results showed that: (1) The soil hydraulic parameters changed significantly at the depth of around 40 cm of gully. The soil bulk density of layer 0~40 cm in the gully was 1.12~1.25 g·cm<sup>-3</sup>, and the hydraulic conductivity was more than 40

$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , indicating the characteristics of stronger infiltration capacity and higher saturated moisture content. While the soil bulk density of layer below 40 cm was about  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , the hydraulic conductivity was  $1.25 \sim 1.41 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , and the infiltration rate was significantly reduced. (2) The soil water content of the gully was significantly greater than that of the control slope. Its seasonal variation characteristics were slightly lagging behind the falling seasonal, and it was fluctuate from 15.76% to 21.91% and it was about 5% higher than control slope in the whole growing season. The vertical distribution increased with the increase of soil depth, the lowest was 15.07% in the surface layer and the highest was 22.84% in 160 cm. The advantage of deep soil water content was significant. The variation coefficient of soil moisture in gully was between 0.131 and 0.234. Compared with slopes, the soil moisture below the surface of gully had strong spatial heterogeneity and changed actively below 100 cm with the variation coefficient being about 0.2. (3) The soil water content of the exit of the gully was significantly higher than that of the head of the gully, and the soil water content below 40 cm at the entrance reached or even exceeded the field water capacity for a long time. Through the comprehensive water control system in gully control and land consolidation project, the gully cultivated land could provide sufficient water conditions for crop growth and improve utilization efficiency of water resources and at the same time, agricultural ecological environment.

**Keywords:** the loess hilly and gully region; gully control and land consolidation; gully; soil moisture; spatial and temporal variation

土壤水分是黄土高原地区植物生长的限制因子,也是这一地区农业耕作和植被恢复的关键<sup>[1]</sup>。黄土高原地形复杂,土壤疏松,水力侵蚀作用形成各种侵蚀沟。沟道由于地势较低,是流域水分的聚集区,土壤水分显著高于坡面<sup>[2]</sup>。治沟造地是延安市针对黄土高原丘陵沟壑区特殊地貌,集坝系建设和旧坝修复、盐碱地改造、荒沟闲置土地开发利用和生态建设为一体的沟道治理新模式<sup>[3]</sup>。治沟造地工程中,土地平整工程的实施改变了地表坡度及植被覆盖,进而影响地表径流的汇流、入渗和蒸发等过程<sup>[4]</sup>,农田水利工程建设更是人为改变了区域的水资源配置<sup>[5]</sup>,引起土壤水分的变化。

治沟造地工程实施后,一些学者对沟道水文变化做了研究。在治沟造地对径流的影响方面,娄现勇等<sup>[6]</sup>研究沟道整治工程产汇流发现,治沟造地有利于降水就地入渗,沟道整治比例越大,沟道地表径流平均流速越小;孙彭成<sup>[7]</sup>研究表明,沟道土地整治能减少地表径流中面源污染物的输出;Kang等<sup>[8]</sup>对延河流域的研究表明,治沟造地工程具有良好的减流减沙效益,对流量和输沙的影响主要集中在汛期;在治沟造地对水分循环的影响方面,雷娜等<sup>[9]</sup>、Yin等<sup>[10]</sup>、Jin等<sup>[11]</sup>的研究均表明,由于农田水利工程影响了土壤水分的自然补给和排出,对沟道地下水位抬升起到促进作用;Zhao等<sup>[12-13]</sup>通过研究 5 m 深度的土壤水分,得出与未进行治沟造地流域相比,治沟造地流域相邻季节之间土壤出水量的动态变化更小,沟道通过增加降水的渗透来存储大量土壤水分,充当土壤水库来缓解缺水问题。目前

研究多集中在治沟造地后水文环境的变化,对土壤水分的时空变化未见深入研究。因此本文以延安市宝塔区南泥湾镇九龙泉治沟造地项目沟道土壤水分研究对象,分析其水力学参数、时空变化特征及沟道不同位置土壤水分差异,讨论治沟造地工程对沟道土壤水分的影响,从而提高黄土高原地区沟道土壤水分利用效率,加强农业耕作管理及促进区域高质量发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

延安市宝塔区( $36^{\circ}11' \sim 37^{\circ}02' \text{N}$ ,  $109^{\circ}14' \sim 110^{\circ}07' \text{E}$ )位于黄土高原中部,南北长 96 km,东西宽 76 km。属半湿润半干旱大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥;多年平均降水量为 562.1 mm,70%的降水量集中在 6—9 月。全年平均气温  $9^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 179 d。研究区属于黄土丘陵沟壑区,土壤类型为黄绵土。区内地形破碎,沟壑纵横,冲沟下切强烈,坡度较大,水土流失严重。九龙泉沟位于宝塔区南部的梁峁丘陵沟壑区,属河谷川、台地貌,东北—西南走向,沟道长约 9.5 km,河道海拔自北向南由 1 170 m 降至 1 093 m,平均比降 0.78%,河谷宽一般在 250~500 m 之间,流域面积 62.63  $\text{km}^2$ 。流域坡面植被以草地和天然灌木为主。沟道土地多开垦为农田,种植前为旱地,水资源比较匮乏,无灌溉条件,粮食单产水平偏低。

治沟造地工程于 2013 年初开工建设,主体工程于 2014 年初竣工,总建设规模 360.91  $\text{hm}^2$ ,总投资

4 411.65 万元。工程利用“截水沟蓄水排渍一体”的沟道水分调控技术,通过截水沟、灌排渠相互连通形成的水分综合调控体系,达到截分流结合、聚贮流结合、供节水结合的目的。雨季发生强降雨时,水库拦蓄和存储降水,超过蓄水量时利用排洪沟泄洪,同时通过截水沟将田块内多余积水引出;旱季沟道内田块缺水时,利用排洪沟和截水沟内水位的水势差,将水库中的蓄水引入截水沟和灌排两用渠,最终进入田块,实现了“旱时灌、涝时排”。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤水动力学参数测定 在项目区沟道中游,选取典型沟道造地田块,挖取 150 cm 深土壤剖面,用环刀采集 0~120 cm 深度原装土壤样品,20 cm 为一层,测定其土壤容重和土壤水分特征曲线(表 1)。土壤容重采用烘干法测定,土壤水分特征曲线用离心机测定,土壤质地采用马尔文激光粒径分析仪(MS2000,英国)进行测定<sup>[14]</sup>。基于 Van Genuchten 模型利用 RETC 软件拟合土壤水分特征曲线,利用水分特征曲线推导不同深度处的土壤饱和导水率、残余含水率、田间持水量等土壤水动力学参数<sup>[15-16]</sup>均采用体积比。

1.2.2 土壤水分定点监测 在沟道中游,按照距坡顶距离,分别选取坡面和沟道不同空间位置的 15 个观测点,其中 1~9 分布于坡面上、中、下位置;10~12 分布于沟道已耕种农田,13~15 分布于沟底未扰动区域(图 1,见 165 页),坡面的坡向为半阳坡,每个观测点垂直埋设长度为 2 m 的土壤水分观测管,进行长期土壤水分监测,监测时段为 2017 年 5—11 月,每月测定 1 次,观测深度为 0~160 cm。采用 TRIME-HD 高精度 TDR(Time Domain Reflect),从地表开始向下,按照 10 cm 间距逐层测定,每层重复测定 3 次,每次探针方向旋转 120°,取平均值作为该测点该层次的土壤含水量,所测土壤含水量为体积含水量。

根据沟道地形地貌条件,沿沟道走向在沟头和沟口共设置 5 个固定观测点,所有观测点均为农田。

垂直埋设长度为 2 m 的土壤水分观测管进行监测。监测时间为 2019 年,每月测定 1 次,测定方法同上。

1.2.3 数据处理 研究采用经典统计分析、地统计分析相结合的方法,采用 EXCEL 进行统计分析;沟道不同位置土壤水分等值线图采用 Sigmaplot 12.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 沟道造地土壤水分参数特征

从表 1 可以看出,沟道内土层深度 0~20 cm 容重最小,为  $1.12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,20~40 cm 为  $1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,40 cm 以下容重在  $1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  左右。0~40 cm 为耕作层,受农业活动的影响,其土壤相对疏松,容重较小,而深度 40 cm 以下土层为耕作形成的犁底层,容重较大。

从土壤水分特征来看,表层(0~40 cm)土壤导水率较大,可达到  $40\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  以上,入渗能力强,同时土壤饱和含水率较大;下层(>40 cm)土壤导水率很小,仅为  $1.25\sim1.41\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,土壤饱和含水率较小。田间持水量、残余含水率呈现出表层低、下层高的特点。

土壤水力学参数反映了不同深度土壤的水力学特征。土壤性质在土层深度为 40 cm 处发生了显著改变,在土壤水分运移到该深度时,其运动状态极易发生改变,入渗速率将会明显减小,当土壤含水量积累达到田间持水水平、接近饱和时很有可能发生侧向运移,从而使侧向入渗强度增大,上层土壤水分的下行入渗补给减少。

2.2 沟道造地土壤水分的时空变化特征

2.2.1 土壤水分的季节变化 取沟道和对照坡面采样点各层次的平均值作为每月土壤含水量值,得出土壤水分季节变化(图 2)。

沟道土壤含水量在 15.76%~21.91%之间波动,5—6 月在 16%上下,7 月开始显著增加,8 月达到最高(21.91%),9 月回落至 18%,10—11 月有所上升,在 19%左右(图 2)。降水是黄土高原土壤水分最重

表 1 沟道造地土壤水力学参数

Table 1 Soil hydraulic parameters of gully cultivated land

| 土层深度/cm<br>Soil depth | 容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )<br>Bulk density | 饱和含水率/%<br>Saturated moisture content | 田间持水量/%<br>Field capacity | 残余含水率/%<br>Residual moisture content | 导水率/( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )<br>Hydraulic conductivity |
|-----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 0~20                  | 1.12                                                 | 47.8                                  | 21.5                      | 5.89                                 | 40.8                                                              |
| 20~40                 | 1.25                                                 | 46.2                                  | 21.7                      | 4.64                                 | 41.9                                                              |
| 40~60                 | 1.49                                                 | 41.5                                  | 26.8                      | 7.82                                 | 1.41                                                              |
| 60~80                 | 1.52                                                 | 43.0                                  | 26.2                      | 7.59                                 | 1.28                                                              |
| 80~100                | 1.47                                                 | 41.7                                  | 27.3                      | 7.62                                 | 1.25                                                              |
| 100~120               | 1.48                                                 | 44.3                                  | 28.1                      | 7.48                                 | 1.37                                                              |

要的补给源,因此土壤水分的时间变化特征主要取决于年内降水的季节性变化<sup>[17]</sup>。沟道土壤水分的季节变化稍滞后于降水的季节变化。生长前期降水量较小,气温回升,日照逐渐强烈,加之土壤蒸发和植被蒸腾作用,土壤水分得到补给较少。7—8月进入雨季,土壤水分得到大量降雨补充,虽然作物进入快速生长期,强烈日照蒸腾使耗水量增大,但补充的水分仍然多于消耗的水分,土壤含水量增加;9月降雨较少,蒸发和蒸腾作用仍然较强,土壤水分有明显的回落过程;10月气温逐渐降低,日照强度减弱,补充土壤水分多于蒸发和蒸腾的消耗量,所以10—11月土壤含水量再次增加。

由于地形差异以及沟道内的农田水利措施,坡面和沟道对降雨的再分配和入渗规律的影响各不相同。坡面土壤水分变化规律与沟道相似,但沟道在整个生长季土壤含水量都高出对照坡面5%左右,说明沟道由于汇流作用,有利于水分的储存。

2.2.2 土壤水分的垂直分布 受降水入渗、植物蒸散、根系吸收以及地下水补充这几个过程影响,土壤剖面各层次土壤含水量存在差异。在地表以下160 cm土层中,沟道和坡面的土壤水分含量基本呈现出随土层深度的增加而增加的趋势(图3)。

沟道表层土壤含水量为15.07%,20~60 cm土层土壤含水量随土层深度增加逐渐增加,60 cm土层达到峰值(19.19%)。坡面径流由于重力作用向沟底汇聚,同时因为沟底地势较平,土壤导水率在40~60 cm土层急剧减小,水分可以有效保存,因此土壤含水量较高。60~80 cm土层土壤含水量随土层深度的增加缓慢下降,土壤容重高于表层土壤,水分向下入渗缓慢,不易得到降水和地下水补给,土壤含水量有下降趋势。80~160 cm土层土壤水分含量呈现增加趋势,在160 cm土层土壤含水量达到最大值22.84%。一方面,沟道土壤水分在下渗过程

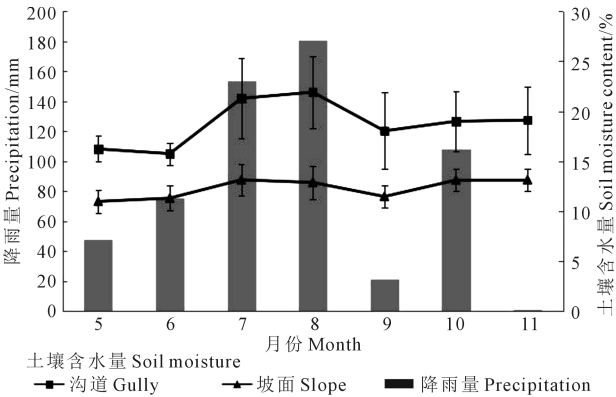


图2 沟道与坡面土壤水分季节变化

Fig.2 Seasonal variation of soil moisture in gully and slope

中损失较小,水分能一直下渗到深层,具有较好的蓄水保水能力;另一方面,由于地下水埋深浅,土壤水分能够得到沟道中浅层地下水的向上补给。

坡面土壤含水量随土层深度的变化处于较为平稳的状态。由于坡面降雨大部分随地表径流流失,土壤水分入渗少,同时半阳坡蒸发损失较大,因此表层土壤含水量较低,在10.0%左右,最高在160 cm土层达到13.31%。与坡面相比,沟道较高的土壤含水量对于作物的生长极为有利,同时100 cm以下土层较高的土壤含水量能够为作物提供深层次的水分补充。

2.2.3 土壤水分变异特征 根据监测数据,计算出沟道和坡面不同层次土壤水分时间变化的标准差和变异系数(表2)。沟道土壤水分变异系数呈现随土层深度的增加,先增大,随后减小,最后再增大的趋势。坡面则随着土层深度的增加逐渐减小。

坡面表层(0~20 cm)土壤水分变异系数较高,为0.215。土壤表层受降水、温度、风力等气象因子的作用,发生大量的物质和能量交换,因此土壤水分变化较为剧烈。随后土壤水分变异系数逐渐变小,50 cm以下土层在0.1以下,基本进入一个较为稳定的状态,直至160 cm土层变异系数降至最低。土壤深层风力、温度等外界因素作用减弱,降雨的补偿滞后,土质较上层紧实,土壤水分入渗阻力较大,补给也相对缓慢,因此变异系数较小。

与坡面相比,沟道表层以下土壤水分存在较强的空间异质性。沟道变异系数在0.131~0.234之间,

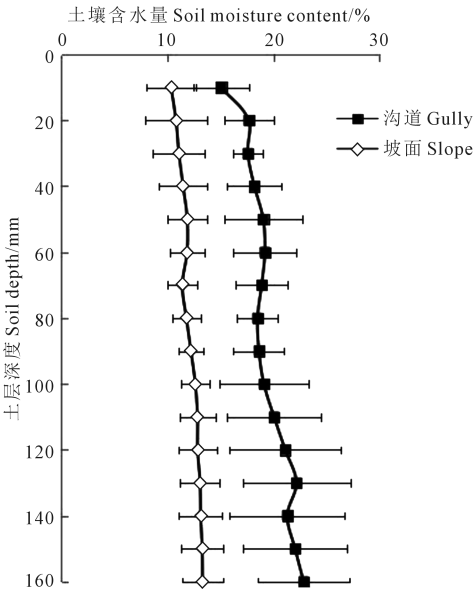


图3 沟道与坡面土壤水分垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of soil moisture in gully and slope

除了 0~20 cm 土层土壤含水量变异系数小于坡面外,其他各个层次均大于坡面。沟道由于地形的原因,不仅受降雨、入渗、产流、蒸散等因素的影响,还有坡面降水的汇集,加之沟道水利工程的影响,土壤水分动态变化比坡面更加强烈,因此变异系数更大。100 cm 以下土层土壤水分含量变异系数再次增大,说明这个土层的土壤水分含量变化活跃,经常处于水分流失和补充的不稳定状态。

2.3 沟道不同位置土壤水分差异

沟道自沟头到沟口具有明显的坡降。通过对沟道不同位置土壤水分进行测定,分析土壤水分含量的时间变化特征,绘制沟头和沟口各深度下土壤相对含水量(土壤含水量与土壤田间持水量的比值)在 1—12 月期间的等值线(图 4)。从图 4 可以

表 2 沟道与坡面土壤水分变异系数

Table 2 Variation coefficient of soil moisture in gully and slope

| 土层深度<br>Soil depth<br>/cm | 沟道 Gully                     |                                     | 坡面 Slope                     |                                     |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|                           | 标准差<br>Standard<br>deviation | 变异系数<br>Coefficient<br>of variation | 标准差<br>Standard<br>deviation | 变异系数<br>Coefficient<br>of variation |
| 10                        | 2.253                        | 0.148                               | 2.215                        | 0.215                               |
| 20                        | 2.606                        | 0.150                               | 1.924                        | 0.179                               |
| 30                        | 2.730                        | 0.158                               | 1.528                        | 0.139                               |
| 40                        | 4.236                        | 0.234                               | 1.327                        | 0.116                               |
| 50                        | 4.078                        | 0.218                               | 1.135                        | 0.096                               |
| 60                        | 3.956                        | 0.210                               | 1.001                        | 0.085                               |
| 70                        | 3.639                        | 0.195                               | 1.101                        | 0.097                               |
| 80                        | 2.943                        | 0.160                               | 1.132                        | 0.096                               |
| 90                        | 2.415                        | 0.131                               | 1.042                        | 0.086                               |
| 100                       | 2.672                        | 0.141                               | 1.012                        | 0.080                               |
| 110                       | 3.970                        | 0.195                               | 1.073                        | 0.084                               |
| 120                       | 4.069                        | 0.189                               | 1.030                        | 0.080                               |
| 130                       | 5.047                        | 0.218                               | 0.966                        | 0.074                               |
| 140                       | 5.281                        | 0.222                               | 0.993                        | 0.076                               |
| 150                       | 4.275                        | 0.184                               | 0.857                        | 0.065                               |
| 160                       | 5.129                        | 0.205                               | 0.622                        | 0.047                               |

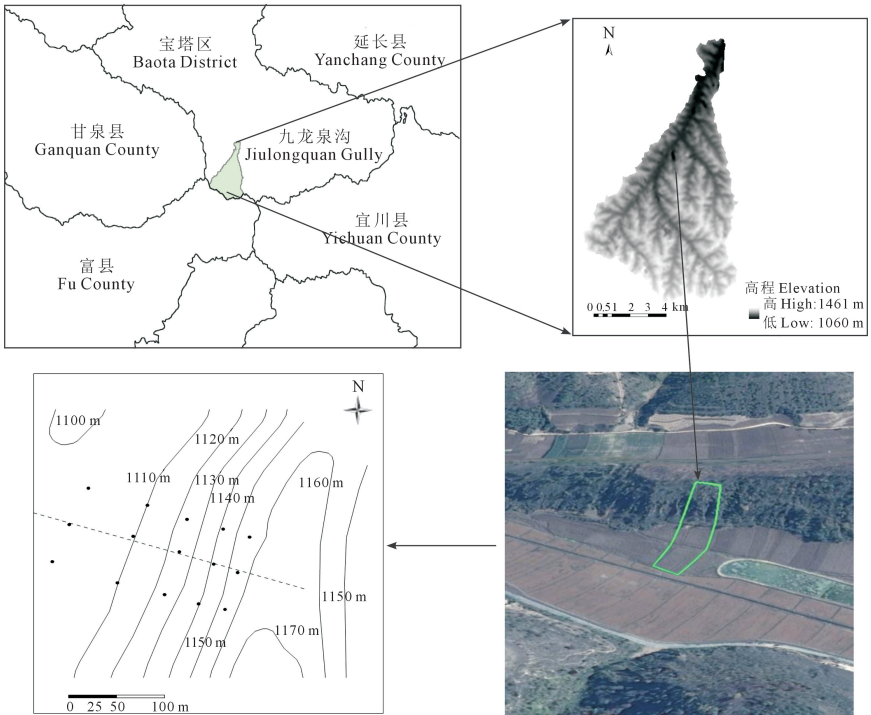


图 1 研究区位置及土壤水分定位监测点示意图

Fig.1 Location of study area and monitoring points for positioning of soil moisture

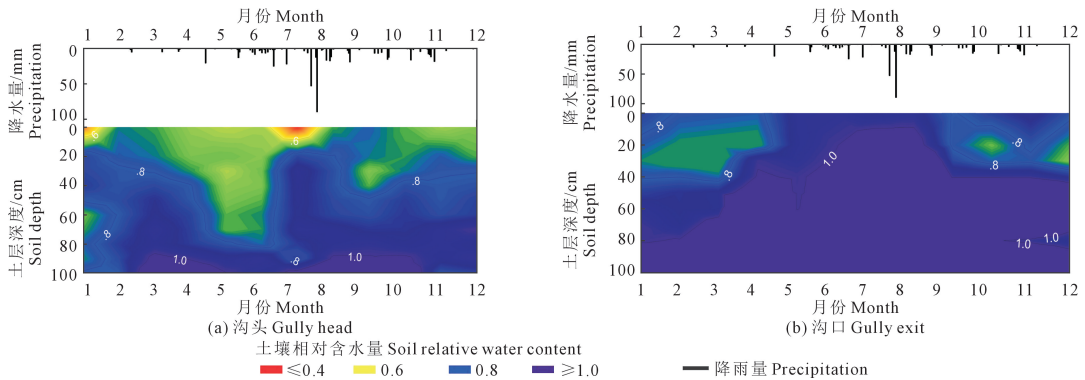


图 4 沟头和沟口土壤相对含水量动态变化

Fig.4 Dynamic change of soil relative water content at gully head (a) and gully exit (b)

看出,沟口的土壤相对含水量显著高于沟头,沟头 7—12 月 60 cm 以下土层土壤含水量达到并超过田间持水量,5、6 月干旱时 100 cm 土层土壤含水量均达不到田间持水量。沟口处雨季 20 cm 以下土层即可达到田间持水量,全年 40 cm 以下土层长期处于或超过田间持水量水平。由于坡降以及土壤厚度较小<sup>[9]</sup>的原因,沟口比沟头位置更易储存水分,也更易获得地下水的补给,因此土壤含水量更大。

### 3 讨 论

土地整治项目会压实土壤,研究表明整治后土壤容重增大,孔隙度减小,土壤含水量低,紧实度极高,渗水率极低<sup>[18]</sup>。但是治沟造地项目在经过一段时间的耕作后,表层土壤容重较小,导水率较大,入渗能力强,保证了土壤水分的储存和下渗。于洋等<sup>[19]</sup>对黄土丘陵区整地后的土壤水分含量研究表明,对比坡面,工程措施长期开展后表层土壤水分明显改善。

在延安地区,水资源问题是限制农业耕作和生态农业可持续发展的最突出因素,而提高深层土壤水分利用率是解决干旱缺水的有效措施<sup>[20]</sup>。根据以往研究,土地利用方式、坡度及其交互作用对土壤水分有显著影响<sup>[21]</sup>。沟道本身就有水分的聚集作用,一方面获得上部坡面的径流补充汇集大量降水,另一方面是降雨的直接补给,治沟造地工程充分利用了沟道良好的水分条件,同时改变了沟道中的微地形地貌,使耕地更加平整,增加了水分的存留时间,因此土壤含水量显著优于对照坡面,且在 100 cm 以下土层仍然保持较高的水平,即使在干旱季节,作物的根系层仍能得到较深层次的水分补给,有为作物提供大量水分供给的潜力。

研究发现,黄土高原地区土壤水分变异系数一般随土层深度增加而逐渐减小,100 cm 以下土层基本为稳定层<sup>[22-23]</sup>。本研究中坡面的变化规律如此,但是沟道土壤水分存在较强的空间异质性,变异系数高于坡面,这与 Gao 等<sup>[2,24]</sup>的研究结果一致。治沟造地工程通过灌排工程的调控措施,实现对沟道地表水、土壤水和地下水资源的调控与利用,使土壤水分变化更加活跃,尤其是地下水参与土壤水分的活动更加频繁。通过截水沟、灌排渠相互连通形成的水分综合调控体系,雨季减弱水流的侵蚀力,减小水土流失,降低滑坡、崩塌等自然灾害的发生,保护农田不被洪水冲毁;旱季通过灌溉缓解旱情,实现了从田面表层到土壤深层、从旱季到雨季对沟道水资源的时空调控,提高深层土壤水分的利用效率,增加作物产量,保证粮食安全。

黄土高原切沟中,通常沟口土壤含水量明显高于沟头,且地下水更为丰富<sup>[25-26]</sup>,部分地区由于特殊的地质地形环境,河谷新造耕地的地下水位抬升,沟道中水分过剩,甚至出现了明显的盐渍化问题<sup>[27]</sup>。本研究也发现,沟道下游、尤其是沟口位置,40 cm 以下土层土壤水分即超过田间持水量。由于地下水位高,降水后地下水位进一步上升,土壤内长期存在积水,易造成农田盐渍化且不利于作物根系生长。治沟造地工程应注意利用农田水利措施,及时将田块内多余的土壤水分排出,降低地下水位,减小淹水对作物生长的影响,防范盐渍化风险。同时根据沟道造地土壤水分的空间分布和变化特征,可在沟道不同位置有区别地配置作物类型,比如上游种植玉米或小麦,下游种植水稻,实现黄土高原沟道旱区农业的水田化,不仅提高沟道水资源利用效率,且形成黄土高原沟道旱—水结合的生态农业景观。

### 4 结 论

1) 土壤水力学参数反映沟道土壤性质在土层深度为 40 cm 附近发生了显著改变,0~40 cm 土层土壤容重较小,导水率较大,入渗能力强,同时饱和含水率较大,田间持水量、残余含水率小;40 cm 以下土层容重较大,导水率较小,入渗速率明显减小,土壤饱和含水率较小,田间持水量、残余含水率较大。

2) 沟道土壤水分显著大于对照坡面,其季节变化稍滞后于降雨的季节变化,整个生长季土壤含水量在 15.76%~21.91%之间波动,高出对照坡面 5%左右;垂直分布随土层深度的增加而增加,深层土壤含水量优势更加显著;沟道土壤水分变异系数在 0.131~0.234 之间,相比较坡面,沟道表层以下土壤水分存在较强的空间异质性,100 cm 以下土层土壤水分变化活跃。

3) 沟口土壤含水量显著高于沟头,沟口土层深度 40 cm 以下土壤含水量长期处于或超过田间持水量,雨季在土层深度为 20 cm 以下即可达到田间持水量。治沟造地工程应注意利用农田水利措施降低地下水位,防范盐渍化风险。

#### 参 考 文 献:

[1] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J].水科学进展,2006,17(1):74-81.  
HU W, SHAO M A, WANG Q J. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 74-81.  
[2] 高晓东,吴普特,张宝庆,等.黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征[J].土壤学报,2015,52(1):57-67.  
GAO X D, WU P T, ZHANG B Q, et al. Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 57-67.

- [3] 贺春雄.延安在治沟造地基础上如何发展现代农业[J].延安大学学报(社会科学版),2013,35(3):60-63.  
HE C X. How does Yanan develop modern agriculture on the basis of gully control and land consolidation[J]. Journal of Yanan University(Social Science Edition), 2013, 35(3): 60-63.
- [4] 高海东.黄土高原丘陵沟壑区沟道治理工程的生态水文效应研究[D].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),2013.  
GAO H D. Hydro-ecological impact of the gully erosion control works in loess hilly-gully region[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences(Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2013.
- [5] 张正峰,赵伟.土地整理的生态环境效应分析[J].农业工程学报,2007,23(8):281-285.  
ZHANG Z F, ZHAO W. Effects of land consolidation on ecological environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(8): 281-285.
- [6] 娄现勇,高建恩,韩赛奇,等.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程对流域产汇流的影响[J].水电能源科学,2016,34(10):23-27.  
LOU X Y, GAO J E, HAN S Q, et al. Influence of land consolidation engineering of gully channel on watershed runoff yield and concentration in loess hilly and gully region[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 23-27.
- [7] 孙彭成.典型沟道土地整治工程对降水转化影响的模拟试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.  
SUN P C. The simulation of the effects of gully land consolidation on precipitation transformation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [8] KANG Y C, GAO J E, SHAO H, et al. Evaluating the flow and sediment effects of gully land consolidation on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126535.
- [9] 雷娜,韩隽昌,高红贝,等.延安治沟造地工程水资源调控与利用分析[J].中国农村水利水电,2017,(5):26-30.  
LEI N, HAN J C, GAO H B, et al. An analysis of regulation and utilization of water resources of gully control and land reclamation in Yanan[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017,(5): 26-30.
- [10] YIN X X, CHEN L W, HE J D, et al. Characteristics of groundwater flow field after land creation engineering in the hilly and gully area of the Loess Plateau[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(14): 646.
- [11] JIN Z, GUO L, WANG Y Q, et al. Valley reshaping and damming induce water table rise and soil salinization on the Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2019, 339: 115-125.
- [12] ZHAO Y L, WANG Y Q, WANG L, et al. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales[J]. Catena, 2019, 172: 387-396.
- [13] ZHAO Y L, WANG Y Q, SUN H, et al. Intensive land restoration profoundly alters the spatial and seasonal patterns of deep soil water storage at watershed scales[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 280: 129-141.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.  
LU R K. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] VAN GENUCHTEN M T, LEIJ F J, YATES S R, et al. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils: EPA/600/2-91/065 [R]. Oklahoma: U. S. Environmental Protection Agency, 1992.
- [16] 王小华,贾克力,刘景辉,等. Van Genuchten 模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):179-183,188.  
WANG X H, JIA K L, LIU J H, et al. Application of Van Genuchten model to analysis of soil moisture characteristic curve[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 179-183, 188.
- [17] 张北赢,徐学选,刘文兆,等.黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1234-1240.  
ZHANG B Y, XU X X, LIU W Z, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234-1240.
- [18] 孟会生,王静,郭建奎,等.黄土区土地整理压实土壤物理性状的初步研究[J].中国农学通报,2009,25(24):549-552.  
MENG H S, WANG J, GUO J K, et al. Preliminary study on physical properties of soil compact in land consolidation in Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 549-552.
- [19] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J].生态学报,2018,38(18):6511-6520.  
YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Simulation of a soil water retention curve of typical soil and water conservation engineering measures in the loess hilly watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6511-6520.
- [20] 王晶,朱清科,赵荟,等.陕北黄土区阳坡微地形土壤水分特征研究[J].水土保持通报,2011,31(4):16-21.  
WANG J, ZHU Q K, ZHAO H, et al. Soil moisture characteristics of micro-topography in south slope of loess region in northern Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 16-21.
- [21] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学,2021,19(3):72-80.  
QIU D X, ZHAO B L, YIN D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 72-80.
- [22] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报,2018,38(10):3471-3481.  
MA J Y, JIA N F, CHENG M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3471-3481.
- [23] 张静,王力,韩雪,等.黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素[J].土壤学报,2016,53(6):1421-1432.  
ZHANG J, WANG L, HAN X, et al. Evapotranspiration of farmland on loess tableland and its major influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1421-1432.
- [24] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2011, 87(3): 357-367.
- [25] 陈明玉,邵明安,李同川,等.黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2021,58(2):381-390.  
CHEN M Y, SHAO M A, LI T C, et al. Characteristics and influencing factors of spatiotemporal distribution of soil moisture in typical gully of the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 381-390.
- [26] 袁鸿猷,樊军,金沐,等.黄土高原淤地坝土壤水分和浅层地下水时空分布特征解析[J].灌溉排水学报,2020,39(10):50-56.  
YUAN H Y, FAN J, JIN M, et al. Spatiotemporal distribution of soil water and shallow groundwater in check dams in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 50-56.
- [27] 陈淑敏,金钊,张晶,等.陕北不同沟道土地盐碱化现状及影响因素[J].地球环境学报,2020,11(1):81-89.  
CHEN S M, JIN Z, ZHANG J, et al. Situation and impact factors of soil salinization in different dammed farmlands in the valley area of the northern Shaanxi Province[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 81-89.