

DOI: 10.20103/j.stxb.202310122204

王中琦, 汤晓迪, 杜康, 周玲, 房凤如, 韩晓阳, 刘文兆, 朱元骏. 黄土塬区不同土地利用方式 10 m 剖面土壤水分年际和季节动态特征. 生态学报, 2024, 44(20): 9329-9341.

Wang Z Q, Tang X D, Du K, Zhou L, Fang F R, Han X Y, Liu W Z, Zhu Y J. Annual-seasonal dynamics of soil water content in 10 m soil profiles under different land use types in the Loess Tableland region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9329-9341.

黄土塬区不同土地利用方式 10 m 剖面土壤水分年际和季节动态特征

王中琦¹, 汤晓迪¹, 杜康¹, 周玲², 房凤如^{1,3}, 韩晓阳^{1,3,*}, 刘文兆^{1,3}, 朱元骏^{1,3}

1 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 杨凌 712100

2 承德医学院蚕业研究所, 承德 067000

3 陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站, 长武 713600

摘要:为揭示黄土高原南部塬区不同土地利用方式土壤水分时空变化特征, 2014—2022 年间采用土壤温湿度自动观测系统对苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田 0—10 m 剖面 21 层的土壤含水量进行了定位监测, 并探究了其时空变化的影响因素。结果表明: 4 种土地利用方式中, 由于多年生苜蓿地根系强吸水效应, 其平均土壤含水量显著小于其他 3 种土地利用方式; 随着土层深度的增加, 苜蓿地土壤含水量先减小后增大, 其他 3 种利用方式土壤含水量大致呈增大趋势; 在季节变化特征上, 土壤水分季节性干湿交替层分别为 0—2 m、0—1 m、0—3 m、0—1 m, 最小值和最大值分别出现在 1—2 月和 9—11 月; 年尺度上, 苜蓿地土壤含水量变异最大, 高产农田次之, 低产农田和休闲地变异性最小; 就长期动态而言, 土壤干层厚度和储水量变化与降水年际分布密切相关, 2014—2022 年各土地利用方式年均土壤储水量呈现增大趋势, 2019、2021 两丰水年份苜蓿地储水量增幅明显, 降水补给深度可达 4 m; 相关性分析表明, 土地利用方式、土层深度和黏粒含量为影响土壤含水量的关键因子。研究结果可为黄土高原深层剖面土壤水分观测和模拟提供数据支撑。

关键词: 土壤水分; 土地利用方式; 深层剖面; 土壤干燥化; 黄土高原

Annual-seasonal dynamics of soil water content in 10 m soil profiles under different land use types in the Loess Tableland region

WANG Zhongqi¹, TANG Xiaodi¹, DU Kang¹, ZHOU Ling², FANG Fengru^{1,3}, HAN Xiaoyang^{1,3,*}, LIU Wenzhao^{1,3}, ZHU Yuanjun^{1,3}

1 College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Sericultural Research Institute, Chengde Medical University, Chengde 067000, China

3 Shaanxi Changwu National Field Observation and Research Station for Farmland Ecosystem, Changwu 713600, China

Abstract: To reveal the spatial and temporal variation characteristics of soil water under different land use types in the southern tableland of the Loess Plateau, an automatic soil water observation system was used to monitor the soil water content (SWC) of 21 layers in 0—10 m profiles of alfalfa field, fallow field, fertilized cropland, and unfertilized cropland during 2014—2022. The spatial and temporal variation characteristics of the SWC and its influencing factors were explored. The results showed that the average SWC of alfalfa field was significantly lower than the other three land use types due to the strong water absorption effect of root system. With the increase of soil depth, the SWC of alfalfa field decreased first and

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007011, 41971049, 42377316); 中国科学院西部青年学者项目(XAB2018B08)

收稿日期: 2023-10-12; **网络出版日期:** 2024-06-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyhan11@nwfau.edu.cn

then increased, while the SWC of the other three land use types showed an increasing trend. For the characteristics of seasonal variation, the seasonal dry-wet alternation soil layer of soil water were 0—2 m, 0—1 m, 0—3 m and 0—1 m, respectively, with the minimum and maximum data appearing in January to February and September to November, respectively. On an annual scale, SWC variability was the largest in alfalfa field, followed by that in fertilized cropland and in unfertilized cropland, while the fallow field was the smallest. In terms of long-term dynamics, the change of soil dry layer thickness was closely related to the interannual distribution of precipitation, the average annual soil water storage (SWS) of each land use types showed an increasing trend in the past 9 years, and the SWS increased significantly in the two water-abundant years of 2019 and 2021 in alfalfa field, where the recharge depth by precipitation infiltration could reach 4 m. Correlation analysis showed that land use, soil depth and clay content were the key factors influencing the SWC. The results can provide data for the observation and simulation of soil water in the deep soil profiles of the Loess Plateau.

Key Words: soil water content; land use type; deep soil profiles; soil desiccation; the Loess Plateau

土壤水分作为陆地水资源的重要组成部分,对于农业生产、生态建设和水资源管理等方面都有着至关重要的作用。黄土塬区土层深厚,地下水较深而难以直接被植物利用,灌溉条件受限,农业生产主要依赖自然降水,土壤水分对旱地粮食产量和农业发展起着关键性作用^[1]。土壤水分因降水补给、植物利用和土壤蒸发等过程而呈现出明显的时空变化,通常土壤水分的时空变化在年内表现为:春季浅层缓慢蒸发、初夏干湿交替、雨季补给恢复及冬季相对稳定期等^[2-4]。不同地区、不同土地利用方式下,由于植被类型、土壤性状、根系分布等的差异,土壤水分分布及其运移过程也呈现不同^[5-7]。土壤水分时空动态和植被建设引起的土壤干燥化研究一直以来都是黄土高原水文生态研究的热点问题。因此,有必要对不同土地利用方式下深层土壤水分进行定位监测,以明确该地区土壤水分异质性及其干燥化过程对区域水循环的影响^[8]。

黄土高原降水量小于蒸发力,降水入渗很难超过植物蒸散层深度。随着旱地农田生产力的不断提高,在提高降水利用效率的同时,也减小了降水的入渗补给深度,从而阻碍深层土壤水分的恢复,加剧土壤干层的形成。李玉山^[9]提出土壤干层是植物暂时难以吸收水分的低湿度层;邵明安等^[10]对黄土高原土壤干层的研究现状进行了评述,并指出土壤干层为隐伏在多年平均降水入渗层以下,因植被深层吸水且不能被雨季降水入渗恢复,由土壤水分负循环而导致的干燥化土层。针对不同土地利用方式土壤水分动态及土壤干层问题,许多学者进行了相关探索;王锐等^[11]对不同土地利用方式土壤水分和物理性质研究表明,剖面田间持水量和萎蔫湿度随土地利用方式表现出差异,这是植被生长情况不同的结果;在相同植被类型覆盖情况下土壤水分主要受施肥模式影响,施肥量的增加,施肥配比更加合理,作物品种改良等使农田土壤水分消耗更加严重^[12]。程立平等^[13]研究了不同土地利用方式下 15 m 深剖面土壤水分变化特征,其干湿交替层存在明显的季节特征,深层土壤水分则主要受土地利用方式影响,苜蓿地和苹果林地深层已形成稳定土壤干层,储水量随时间的变化较小,韩晓阳等^[14]的研究也证实了这一规律。还有研究表明,黄土高原深根系苹果园土壤干层形成的时间与降水量年际变化有关^[15],降水量的大小关系着土壤干燥化的推进速度,降水量高的地区形成和达到稳定土壤干层的时间较晚。上述研究说明土壤干层的形成与降水量变化和土地利用方式密切相关,干层的形成会导致土壤水库调蓄年际或季节性干旱的能力下降,并影响到区域陆地水循环过程。深层土壤水分动态特征及干层发育过程研究一直以来都是黄土高原土壤水分研究的热点问题,不同土地利用方式土壤水分连续观测对土壤干层发展研究尤为重要。由于深层土壤水分观测困难且影响因素复杂,对于黄土塬区不同土地利用方式深层剖面的连续定位观测和对比研究依然存在较多困难,不利于全面探究土壤干层及其深度随时间动态变化规律及其驱动机制。

因此,本研究于 2014 年 4 月至 2022 年 12 月针对苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田的 0—10 m 深剖面土壤水分展开定位观测,对不同深度土层的土壤含水量变化特征进行分析与讨论,探究其不同深度和时期下土壤水分的变异特征及土壤干燥化原因,为旱地农业土壤水资源可持续利用和土壤干层恢复研究提供连续观

测数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕甘交界处的陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(简称长武站,107°41'E,35°14'N,海拔 1220 m),为典型的黄土塬区(图 1)。属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年年平均气温 9.1 °C,年均潜在蒸散发 949 mm^[16],年均降水量 584 mm,降水集中在 7—9 月,占全年降水的 55%以上。该地区黄土堆积深厚,土壤类型为粘黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,剖面土质较为疏松,孔隙度在 50%左右^[17]。一年生冬小麦(*Triticum aestivum* L.)、春玉米(*Zea mays* L.)根系可伸至 2 m 以下^[14],紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)等多年生豆科草本根系达 7—8 m 以下^[18—20]。黄土剖面田间持水量和凋萎湿度分别为(21.4±1.3)%和(8.1±0.5)%^[21](质量含水量),土壤容重在 1.2—1.4 g/cm³之间^[11],按田间持水量 80%计,该地区土壤干层湿度上限为 22.3%(即 0.22,体积含水量,cm³/cm³)。

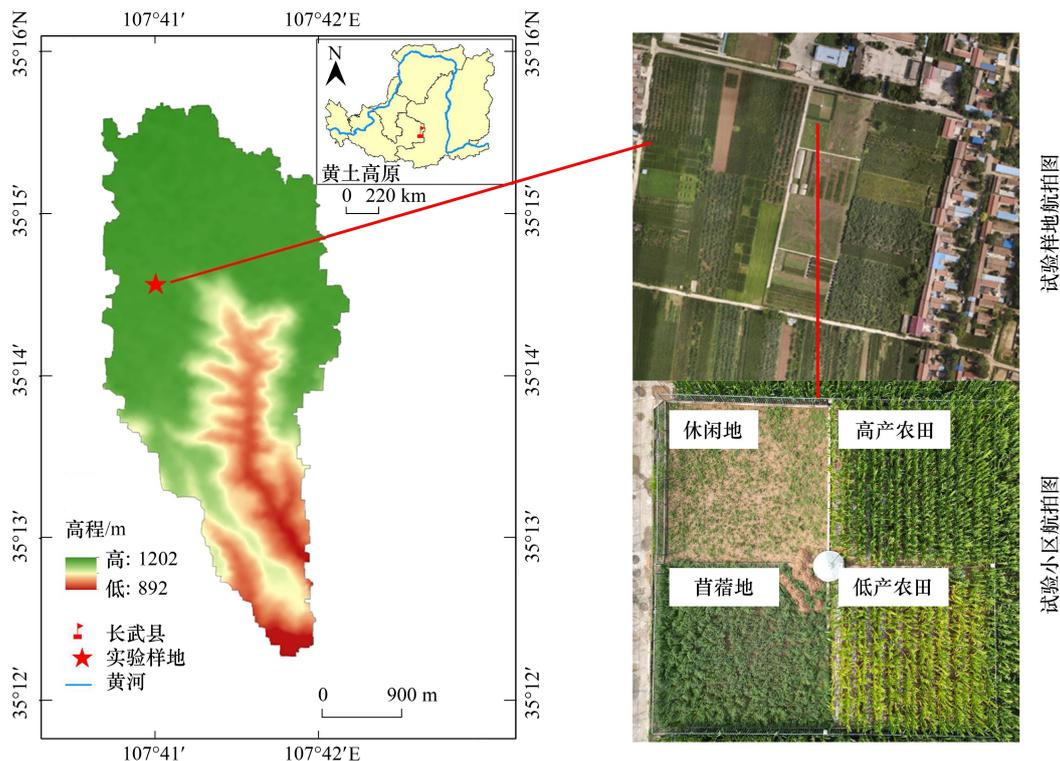


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study site

1.2 研究方法

观测地点为长武站塬面深剖面土壤水热运动观测场,该观测场建于 2005 年(建设之前为农田),共设 4 种土地利用方式,每种利用方式 1 个小区:苜蓿地、休闲地、高产农田(正常施肥)和低产农田(不施肥),其中苜蓿地为深根系高耗水草地,休闲地为对照,高产农田与低产农田为不同管理措施下的主要粮食作物小区,均为黄土塬区代表性的土地利用方式,对其水分利用特征差异的对比具有一定的实际意义。各小区面积均为 100 m²(10 m×10 m),小区之间嵌入 10 m 钢板以隔绝土壤水分和养分交换,小区轮廓在地面上砌出高于地面 20 cm 的砖墙以阻断地表径流。苜蓿每年定期收获,生长季为每年 3 月—10 月,到 2022 年已种植 17 年;农田小区种植方式为冬小麦-冬小麦-春玉米轮作,其中冬小麦的生长季为 9 月—次年 6 月,春玉米的生长季为

4月—9月,各个小区的基本信息见表1。考虑挖取10 m土壤剖面困难、破坏性大以及建设成本较高等因素,本研究未设置观测小区之间的重复,在土壤样品采集中每个小区设置了3次重复。

表1 2014—2022年苜蓿和作物产量
Table 1 Annual yield of alfalfa and crops

年份 Years	苜蓿生物量 Alfalfa biomass/(kg/hm ²)	高产农田产量 Fertilized crop yield/(kg/hm ²)	低产农田产量 Unfertilized crop yield/(kg/hm ²)	农田作物类型 Crop type
2014	9533.0	10158.6	1730.0	春玉米
2015	12647.3	4572.0	940.5	冬小麦
2016	10294.95	5703.6	933.5	冬小麦
2017	11544.6	12928.5	3542.0	春玉米
2018	8522.1	5694.0	909.0	冬小麦
2019	13479.9	—	—	冬小麦
2020	11082.1	12706.4	8584.4	春玉米
2021	10293.5	4647.0	1101.0	冬小麦
2022	16692.6	4021.5	1886.6	冬小麦

土壤含水量利用土壤水分自动观测系统进行实时定位观测,该系统主要由HydraProbe II土壤三参数传感器(Stevens, USA)和数据采集传输模块构成。HydraProbe II传感器类型为电磁土壤传感器,探针长度为12.4 cm,直径4.2 cm,感应体积(圆柱形测量区域)为40.27 cm³($R=3.0, L=5.7$),监测精度为 ± 0.03 cm³,温度测定范围为-30—65℃,传感器最大埋深为15 m。为了较好研究土壤水分随深度和降水补给的变化,本研究在整个剖面内有梯度的设置了21个监测层次,即浅层设置间隔较小,4 m以下间隔较大,分别为:10、20、30、40、50、70、100、120、160、200、220、260、300、340、400、440、500、600、700、800、1000 cm;采用CR1000数据采集器(Campbell Scientific, USA)记录土壤含水量数据(体积含水量, cm³/cm³),时间间隔为30 min,观测时间段为2014年4月10日至2022年12月31日。

气象数据来自于长武站自动气象站(图2)。其中丰水年(总降水量>619 mm)与枯水年(总降水量<536 mm)的划分参考标准为^[22]:

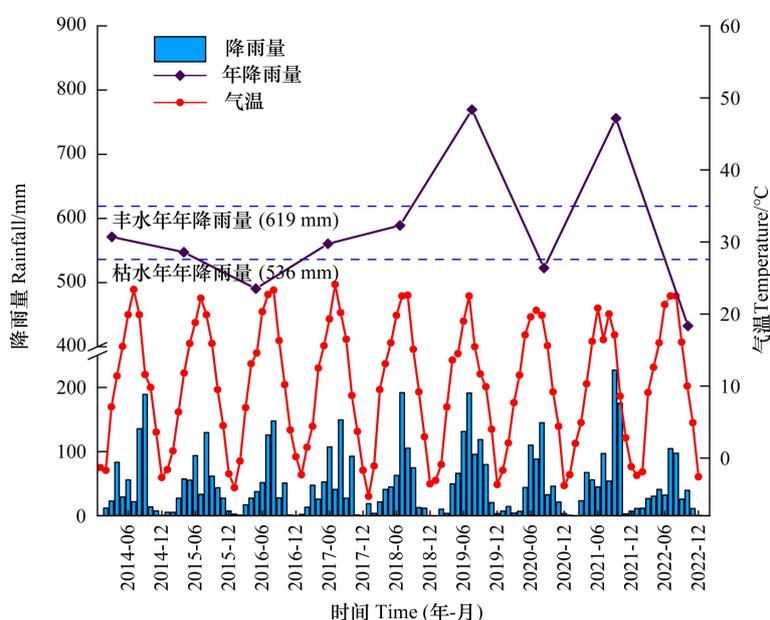


图2 2014—2022年气温与降水基本情况

Fig.2 Air temperature and rainfall during the year 2014—2022

$$\text{丰水年 } P_i > \bar{P} + 0.33\delta \tag{1}$$

$$\text{枯水年 } P_i < \bar{P} - 0.33\delta \tag{2}$$

式中, P_i 为第 i 年的降水量; \bar{P} 为多年的平均降水量(本文采用 1957—2022 年); δ 为标准差。

其他土壤物理性质数据的采集方法为土钻法, 取样深度为 10 m, 其中 0—1 m 深度内取样间隔为 10 cm, 1—10 m 内取样间隔为 20 cm。土壤颗粒组成采用马尔文激光粒度仪 Mastersizer 2000 测定, 根据国际制土壤粒级分级标准, 将土壤颗粒分为 4 个级别: 砂粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002—0.02 mm)、黏粒 (0.02—0.2 mm) 和粗砂 (>0.2 mm); 因粗砂含量几乎为 0, 故忽略不计。铵态氮与硝态氮的测定采用流动分析仪测定。有机质的测定采用重铬酸钾容量法测定。土壤储水量 (Soil water storage, SWS) 的计算公式为^[14]:

$$SWS = \sum_{i=1}^n (\theta_i \times h_i) \tag{3}$$

式中, 土壤储水量为某土层土壤储水量 (mm); h_i 为该土层厚度 (mm); θ_i 为第 i 层 (共 n 层) 土壤体积含水量 (cm^3/cm^3)。

1.3 数据处理与分析

本文采用 Microsoft Excel 2020 整理数据; 利用 SPSS 2022 软件进行统计分析, 采用 Waller-Duncan 和 LSD 分析法分析各个变量的差异显著性, Pearson 分析法分析各个环境因子的相关性; 使用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下 10 m 剖面土壤颗粒组成特征

不同土地利用方式在 0—10 m 剖面内土壤颗粒组成呈波动变化 (图 3)。苜蓿地的黏粒和粉粒含量出现先增大后减小趋势, 砂粒含量先减小后增大; 休闲地颗粒组成垂直变化不明显; 农田黏粒随着深度的增加而微

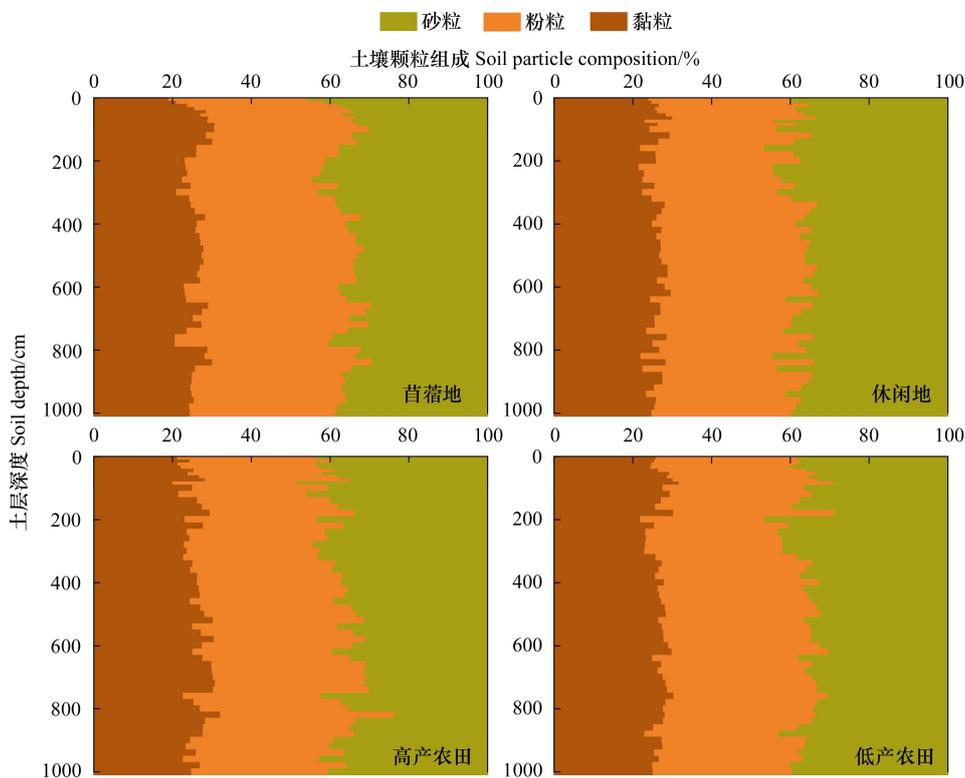


图 3 不同土地利用方式土壤颗粒组成

Fig.3 Soil particle composition of deep soil profiles in different land use types

弱增加,砂粒含量先减小后增大,而粉粒含量相对稳定。苜蓿地、休闲地、高产与低产农田的平均黏粒含量分别为 25.8%、25.9%、26.0%和 26.9%;平均粉粒含量分别为 38.3%、36.0%、36.4%和 36.9%;平均砂粒含量分别为 35.9%、37.9%、37.4%和 36.1%。其中平均黏粒含量最高出现在低产农田,平均粉粒含量最高出现在苜蓿地,平均砂粒含量最高表现在休闲地。4 种土地利用方式下黏粒含量之间不存在显著性差异($P>0.05$),苜蓿地粉粒含量与其他三种土地利用方式存在显著性差异($P<0.05$),而砂粒含量仅在苜蓿地与休闲地表现出显著性差异($P<0.05$)。

2.2 深剖面土壤水分概况

2.2.1 不同土地利用方式土壤水分差异

2014—2022 年苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田 0—10 m 剖面平均土壤含水量差异明显(图 4),由小到大依次是苜蓿地<高产农田<休闲地<低产农田,其平均值变化范围分别为 0.19—0.24、0.28—0.31、0.25—0.29、0.29—0.32,对应的平均值分别为 0.21、0.30、0.27、0.31。苜蓿地平均土壤含水量显著低于其他土地利用方式($P<0.05$),休闲地与低产农田平均土壤含水量之间无显著性差异,但均显著高于高产农田($P<0.05$)。

2.2.2 土壤水分垂直分布特征

不同土地利用方式土壤含水量及其分层特征之间各有差异(图 5)。随着土层深度的增加,苜蓿地土壤含水量波动较大,呈先减小后增大的趋势:0—5 m 土层从 0.24 减小至 0.18,而在 6—10 m 深度内又增大至 0.23,最小值出现在 4—5 m 土层,为 0.18;7—10 m 以下平均土壤含水量接近 0.22(图 5)。休闲地、高产农田和低产农田的平均土壤含水量随深度增加大致呈增大趋势,除 4—6 m 土层外,高产农田各层平均土壤含水量均显著小于休闲地和低产农田($P<0.05$);休闲地 0—4 m 平均土壤含水量显著小于($P<0.05$)或接近低产农田。苜蓿地各土层平均含水量均显著低于其他 3 种利用方式($P<0.05$,图 5)。

2.3 深剖面土壤水分季节和年际变化

2.3.1 季节变化

不同土地利用方式土壤含水量随着季节交替表现出不同的变异性(图 6)。浅层土壤含水量的变异性明显大于深层,苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田土壤含水量季节性变异明显的土层分别集中在 0—2 m、0—1 m、0—3 m、0—1 m(图 6),其平均土壤含水量分别为 0.23、0.27、0.25、0.29,季节波动范围分别为 0.17—0.30、0.14—0.33、0.11—0.31、0.18—0.36,上述土层可视为各土地利用方式土壤水分的干湿交替层。

苜蓿地土壤干层起始深度也随季节呈现出明显的变化,5—8 月土壤干层起始深度可提高至 0.4 m,而在 9 月至次年 4 月间则一直保持在 2 m(图 6)。其他利用方式仅在表层出现干燥化现象,土壤含水量最小值出现在 1—2 月,最大值均集中在 9—11 月雨季后期。降水的季节分布和植物生长周期共同作用,可引起土壤含水量的呈现出显著的季节差异。

2.3.2 年际变化

2014—2022 年 4 种土地利用方式下 10 m 剖面土壤含水量展现出不同年际变异性(图 7)。苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田 0—10 m 土壤含水量年均值波动范围依次为 0.19—0.24、0.28—0.31、0.26—0.29、0.29—0.32,对应的变异系数平均值分别为 10%、4%、7%、4%,苜蓿地土壤含水量变异性最大,高产农田次之,低产农田和休闲地变异性最小。结合图 2 降水量年际变化情况来看,2019 年和 2021 年丰水年份降水入渗补

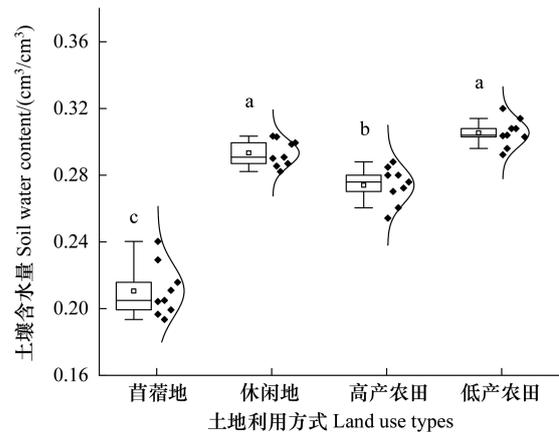


图 4 不同土地利用方式平均土壤含水量概况

Fig. 4 General information of average soil water content (SWC) in deep soil profiles

图中不同土地利用方式土壤含水量为年均值,是通过日均值、月均值逐步计算得到,不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$)

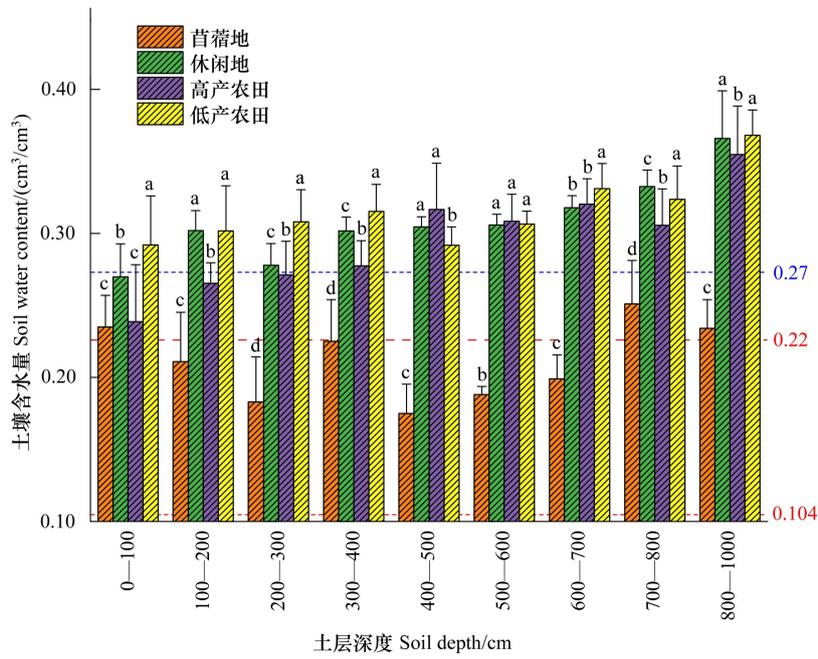


图 5 不同土地利用方式下剖面平均土壤含水量

Fig.5 Average SWC in deep soil profiles of different land use types

图中各土层土壤含水量数据为年均值的平均,不同小写字母表示不同土地利用方式间差异性显著 ($P < 0.05$),其中 0.10 代表萎焉湿度,0.22 代表干层湿度上限,0.27 代表田间持水量

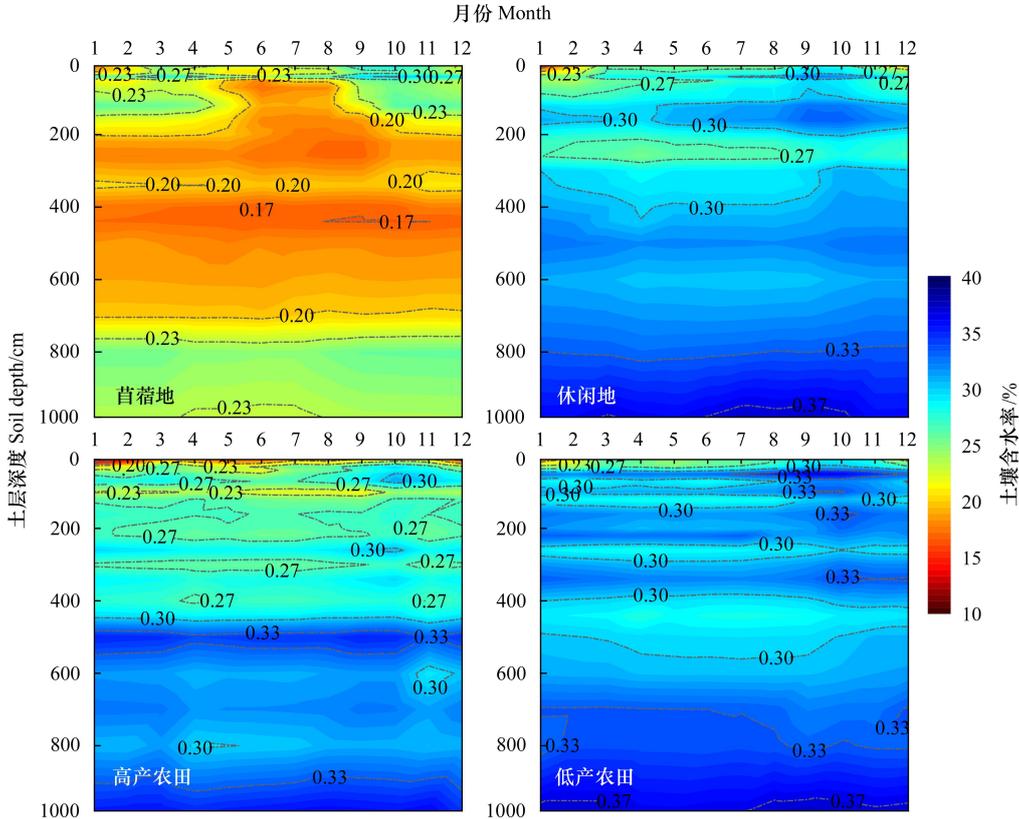


图 6 不同土地利用方式下土壤含水量季节变化

Fig.6 Seasonal variation of SWC in different land use types

土壤含水量数据为 2014—2022 年间各月均值的平均

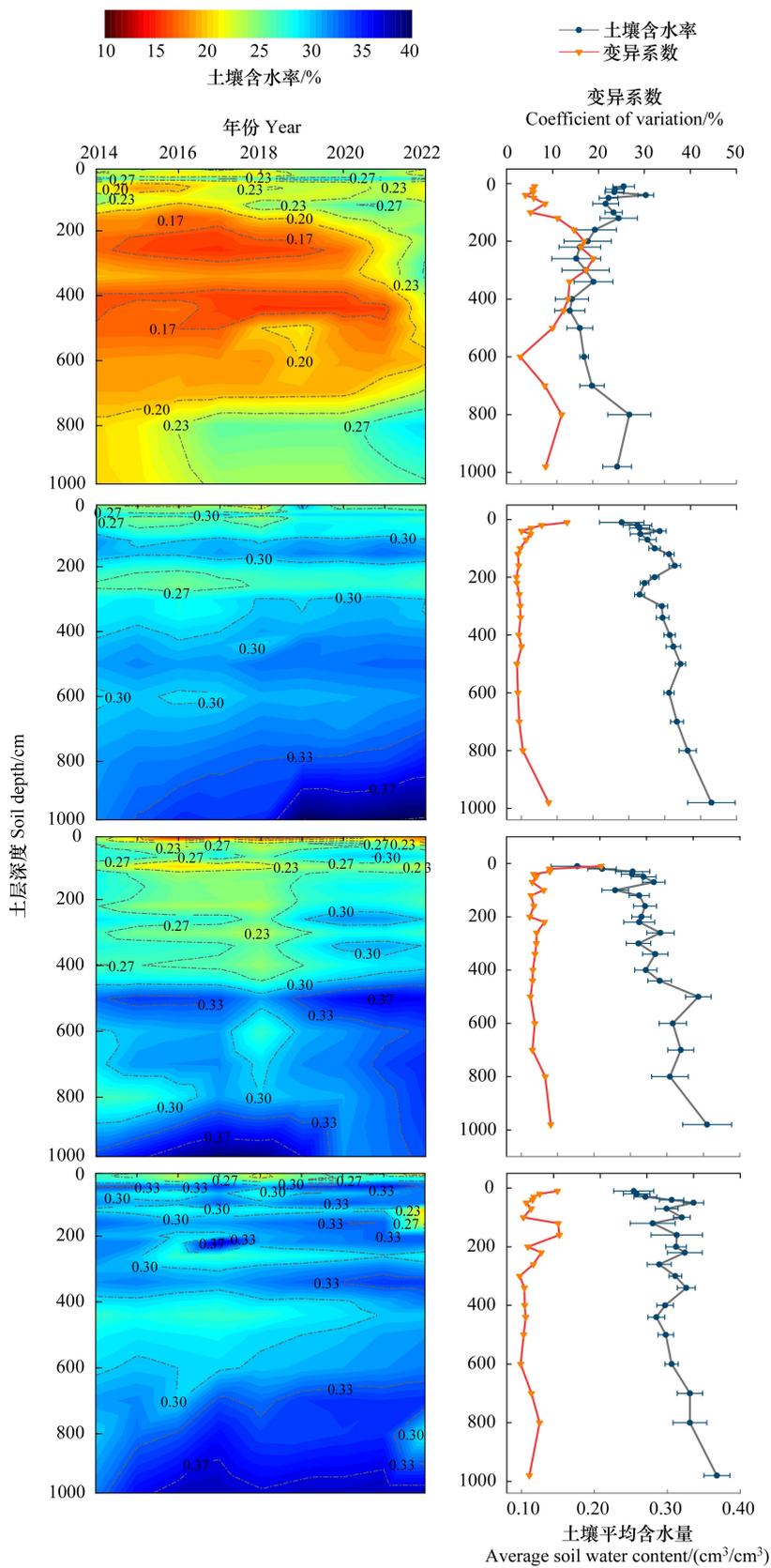


图 7 不同土地利用方式下土壤含水量年际变化

Fig.7 Annual variation of SWC in different land use

等高线图土壤含水量数据为 2014—2022 年间连续月均值,折线图土壤含水量数据为年均值的平均

给导致苜蓿地土壤干层上限深度由 2 m 下降至 4 m, 2—10 m 土层平均含水量也由 0.19 增加至 0.25 (2022 年), 表明极端降水能使多年生苜蓿地土壤干层上限深度由 2 m 变至 4 m, 可见土壤干层厚度的变化与降水年际分布密切相关。

不同土地利用方式下土壤含水量变异性最强的土层深度不一: 苜蓿地除 6 m 土层外, 2—10 m 土层年际间变异系数均大于 10%; 高产农田作物生长引起 0—4 m 土层平均含水量呈现出明显的年际变化, 且在某些年份接近干层湿度上限, 但在丰水年份会得到恢复; 低产农田在 0—2 m 土层平均含水量有明显的年际波动, 而休闲地仅在土壤表层 0—1 m 表现出明显的变异性 (图 7)。

2.3.3 土壤储水量年际变化

苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田 10 m 土层的年平均储水量分别为 2039.6 mm、3076.5 mm、2947.9 mm、3127.4 mm (表 2), 其中苜蓿地显著低于其他三种利用方式 ($P < 0.05$), 休闲地与低产农田间无显著性差异 ($P > 0.05$), 且显著大于高产农田 ($P < 0.05$)。整体而言, 4 种土地利用方式土壤年均储水量都呈现增大趋势, 苜蓿地、休闲地、高产农田、低产农田储水量年增长率分别为 56.2、36.3、17.3、26.0 mm/a (表 2)。结合表 1、图 2 和表 2, 土壤储水量变化与年降水量密切相关, 如 2019、2021 年丰水年份后, 4 种土地利用方式储水量均有所增加, 且在苜蓿地和高产农田增加幅度尤为明显。

表 2 4 种土地利用方式年储水量及显著性差异分析

Table 2 Analysis of annual soil water storage and significant difference among four study areas

年份 Year	苜蓿地 Alfalfa field	休闲地 Fallow field	高产农田 Fertilized cropland	低产农田 Unfertilized cropland
2014	1895.5	2948.2	2880.1	3006.3
2015	1878.1	2982.7	2899.0	3062.0
2016	1905.4	2971.5	2913.1	3056.7
2017	1965.0	3016.4	2977.4	3038.1
2018	2010.3	3048.0	2825.9	3043.7
2019	2043.2	3169.7	2976.7	3186.3
2020	2055.3	3152.0	2934.3	3224.0
2021	2206.4	3198.4	3054.2	3273.9
2022	2397.3	3202.1	3070.3	3255.5
平均 Average	2039.6c	3076.5a	2947.9b	3127.4a

不同小写字母表示不同土地利用方式间差异性显著 ($P < 0.05$)

2.4 土壤水分与各因子的相关性

本研究中多年平均土壤含水量与其他各指标相关性关系如图 8 所示。土壤含水量与土地利用方式、土层深度和黏粒含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.67、0.33 和 0.32; 土壤含水量与与铵-硝态氮相关系数分别为 0.018、0.054, 这可能与采样次数有关; 土壤含水量与土壤温度和粉粒含量呈弱负相关 (相关系数仅为 -0.098 和 -0.038), 与有机质和砂粒含量呈负相关, 相关系数为 -0.16 和 -0.173。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤水分剖面分布的影响

土壤含水量在不同土地利用方式和土层深度下表现出不同的特征, 该分层特征是由不同植被根系耗水及蒸散发引起的。高产农田因作物的生长对水分的需求高, 其水分消耗能力超出降水补给, Lin 等^[23]的研究表明长武高产农田土壤含水量在 3 m 深度仍有波动, 休闲地土壤含水量因无植物参与而变化较小, 因而出现浅层土壤含水量小于休闲地的情况; 而同一深度下低产农田土壤含水量高于休闲地的原因在于植被覆盖影响了土壤蒸散发能力, 浅层土壤水分蒸发能力变弱, 这与植被的叶面积指数有关 (王靖等^[24]研究表明了相对蒸散与表层土壤含水量和叶面积指数存在指数关系, 相关系数达 0.9), 这说明植被覆盖与根系共同影响土壤含水

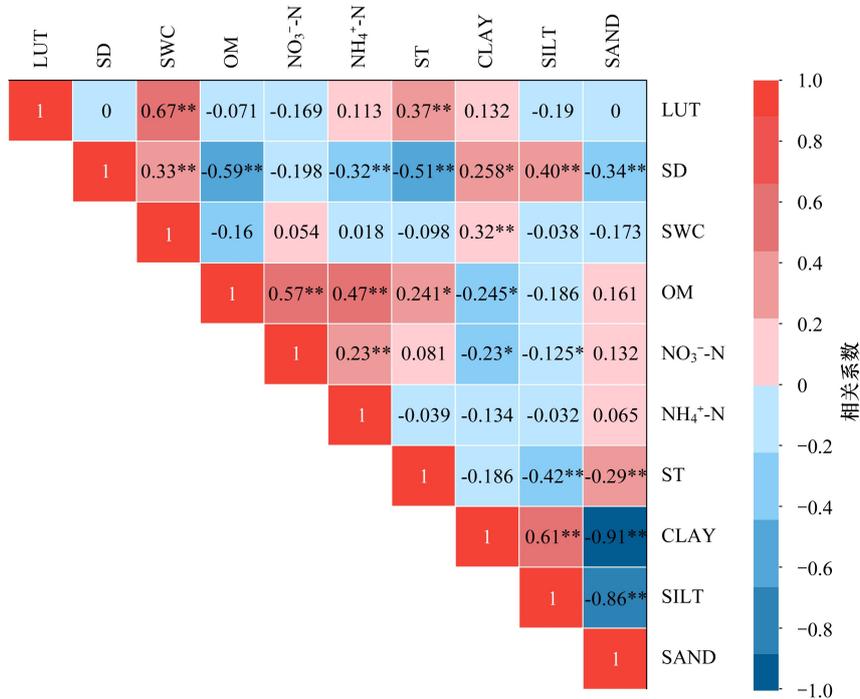


图8 土壤含水量与各因子相关系数热图

Fig.8 Correlation coefficient heat map for SWC and its influencing factors

SD: 土层深度; OM: 有机质; ST: 土壤温度; LUT: 土地利用方式; CLAY: 黏粒; SILT: 粉粒; SAND: 沙粒; 其中 * 代表通过 0.05 显著性水平检验; ** 代表通过 0.01 显著性水平检验

量的变化。本研究中高产农田和低产农田 0—4 m 深度平均含水量差异较大,而 4 m 以下含水量无明显差异,表明小麦、玉米等农作物的耗水深度在 4 m 左右。苜蓿地在 0—10 m 内均有耗水迹象,这说明多年生苜蓿地根系耗水深度已达到 10 m,这与蔡雪梅等^[25]的研究结果一致。紫花苜蓿作为深根系植物,土壤水分分布显著影响苜蓿根系的生长,供水不足会刺激紫花苜蓿根系发育和伸长^[26],因此苜蓿根系延伸到更深土层形成严重的土壤干层^[27]。苜蓿地通过地表植被蒸散与土壤蒸发共同消耗浅层土壤储水^[28],降水很难补给至深层,故土壤平均含水量低于其他土地利用方式。

此外,李荣磊等^[29]研究了土壤质地对植被根系附近土壤水分变化影响;赵思腾等^[30]研究了地下水埋深-土壤水分-植被特征三者关系;Penna 等^[31]研究了土壤水分与地形地貌之间的联系。因此,土壤水分变化还与土壤质地、植被特征、地形要素等因素有关,应在后续研究中加以考虑。

3.2 土壤水分时空动态及其驱动因素

在影响土壤含水量的诸多因素中,土地利用方式、土层深度和黏粒含量为关键因子(图 8),是土壤水分时空动态的主要驱动因素。不同土地利用方式土壤水分在极端降水年份内可能表现出相同的动态变化(图 7),降水的入渗会在土壤剖面内形成一个湿润锋,不同土地利用方式的湿润锋出现的深度不同,这与 Wang 等^[32]的研究结果一致,本研究苜蓿地降水入渗深度可达 4 m。同时,不同土地利用类型的植被覆盖直接影响土壤水分的补给与利用过程,尤其是输入过程,直接关系到黄土高原半干旱地区有限的降水转化为可利用土壤水的比例^[32]。潜在蒸散量与实际降水量的差值虽是土壤水分表现出变异的原因,但深层土壤水分的动态主要由植被类型决定^[33]。

不同土地利用方式下土壤水分干湿交替层深度及对季节的响应程度不同,降水的季节性分布以及蒸散发的季节差异是造成深剖面土壤水分季节变化的主要原因。土壤剖面水分显示出不同的季节模式^[34]:1 月和 2 月由于冻融交替^[35]、降水补偿不足以及土壤蒸发作用等因素的影响,4 种土地利用方式干湿交替层土壤含水

量急速下降,导致土壤水分呈负平衡状态,形成短暂的土壤干层,为土壤水分干湿交替层冬季典型特征,并且该特征在平均含水量越高的土地利用方式下越显著。夏季地表和根区土壤水分亏缺且存在滞后性,这与 Gao 等^[34]的研究一致。9 月至 11 月雨季后干湿交替层土壤水分蓄积,这一时期可称为蓄水期,不同土地利用方式下蓄水期的时段相差不大但失水期略有不同。除干湿交替层外,深层土壤水分的季节和年际波动并不明显,因而表现出相对稳定的特征。然而,上述特征在极端年份会发生改变:2019 年和 2021 年降水量分别为 769 和 756 mm,为极端丰水年,苜蓿地 0—2 m 土壤含水量呈增大趋势,且干层起始深度由 2 m 逐年下降至 2022 年的 4 m(图 7),且 8—10 m 土层平均含水量也呈现出增大的趋势。另外,不同土地利用方式下植被类型和生长环境的差异导致的根系耗水能力不同,也是深层土壤水分时空动态的驱动因素之一。有研究表明深根系植物对土壤水分消耗量大导致该土层含水量变异系数小^[36],李玉山^[37]研究表明苜蓿的根系吸水能力达 10 m 以下,本研究 and 近几年的其他研究^[38]均得到了类似的结论;高产农作物的根系耗水深度集中在 0—3 m 土层,不施肥的同种作物根系耗水深度则仅集中在 0—1 m 土层,因而导致上述土层平均含水量呈现出季节和年际差异。

土壤储水量的时间变化可以一定程度上反应土壤剖面水分盈亏情况,以此来分析植被的耗水能力与土壤水库的关系。土壤储水量动态变化也是降水、土壤蒸发和植物蒸腾共同作用的结果^[39]。对于无作物生长的休闲地来说,因其没有根系参与,剖面土壤水分相对稳定而呈现出较小的时间动态。本研究中,休闲地年均土壤储水量低于低产农田,可能的原因在于休闲地长期没有植被覆盖,其土壤水分蒸发量大于有植被覆盖的农田。同时,耕作农田土壤水分入渗也较大,从而导致土壤储水量增加。Unger 等^[40]研究表明耕作后土壤水分流失与土壤表面粗糙度的增大有关,这降低了反照率并允许更多水分入渗,这与本研究的结果一致。另外,植被类型及其生长季差异对于土壤储水量的变化也有较大影响。苜蓿生长对前一年的储水量响应较大,枯水年份苜蓿为了维持稳定年生物量可从深层土壤储水调节^[37]。玉米生育期与雨季重合,土壤可以得到更多水分补给,而冬小麦生长季则在降水匮乏的冬春季,造成春玉米生长季储水量高于种植前后的冬小麦^[41]。另有研究认为春玉米,冬小麦的产量与储水量成正相关^[42—43],但李玉山等^[44]研究表明黄土高原地区仅有 47% 小麦产量受种植时储水量影响。轮作系统内休耕期为土壤水分恢复的最佳时期,Moret 等^[45]的研究表明收获到晚秋的阶段一般是储水量恢复最有效的阶段,且休耕期内无植被耗水,土壤水分流失仅依靠土壤蒸发,使得更多的水分得以储存。

3.3 研究限制及展望

研究对黄土塬区不同土地利用方式的 10 m 剖面土壤水分进行了长期定位观测与分析,在观测时间和土层深度上具有一定的独特性,能够揭示该地区典型深根系牧草和浅根系粮食作物土壤水分分布差异及动态特征。上述分析结果仅是监测数据的基础性描述,季节和年际平均值可能无法揭示不同降水年型间土壤水分的响应特征,有关不同土地利用方式土壤水量平衡特征、降水入渗规律及干层发展过程等还需按降水年型进一步分析。传感器测定的土壤含水量数据受土壤质地、土壤容重和植被类型等多种因素影响,仪器布设的位置代表性也十分重要,后续研究中需要结合烘干法对传感器观测值进行验证,同时增加重复数,以准确把握不同土地利用方式土壤水分的消耗、补给过程。基于连续定位监测的土壤水分数值模拟与验证有助于丰富区域水文循环过程模拟研究内容。

4 结论

(1) 4 种土地利用方式平均土壤含水量由小到大依次为苜蓿地 < 高产农田 < 休闲地 < 低产农田;随着土层深度的增加,苜蓿地土壤含水量呈先减小后增大的趋势,其他利用方式则大致呈增大趋势。

(2) 不同土地利用方式土壤干湿交替层出现深度不同,苜蓿地土壤含水量年际变异性最大,高产农田次之,低产农田和休闲地变异性最小;高产农田作物生长季周期性干层在雨季后可得到恢复;多年生苜蓿地在丰水年份降水入渗深度可达 4 m,该深度以下已形成稳定性干层。

(3) 土壤储水量年际变化趋势与年降水量密切相关, 丰水年份后苜蓿地和高产农田储水量增加幅度大于休闲地和低产农田, 玉米-小麦轮作休闲措施更有利于土壤水分的贮存。

(4) 黄土塬区降水补给土壤水的程度和深度问题仍是制约该区农业生产的关键问题之一, 为缓解苜蓿等多年生深根系植物利用形成的土壤干层, 苜蓿-农作物轮作可能为该区土地利用和水管理方面的参考措施, 然而, 后续具体实施方式还需基于连续定位观测数据对相关过程进行试验和模拟。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Y J, Jia X X, Shao M A. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(4): 715-727.
- [2] 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分特征及其补给地下水过程研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [3] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1853-1857.
- [4] 杨文治, 赵沛伦, 张启元. 不同湿度条件下土壤水分的蒸发性能和移动规律. *土壤学报*, 1981, 18(1): 24-37.
- [5] 亢晨波, 郭汉清, 张焱, 刘洋. 复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素. *中国水土保持科学: 中英文*, 2023, 21(5): 71-80.
- [6] 陈强, 秦富仓, 岳永杰. 东北农牧交错带小流域土地利用与土壤性状耦合关系研究. *水土保持研究*, 2010, 17(2): 186-189, 194.
- [7] 高元亢, 李婧, 汪星, 吕雯, 于晓燕, 王雁超, 王永强. 黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 168-176.
- [8] Wu G L, Zhang Z N, Wang D, Shi Z H, Zhu Y J. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1362-1367.
- [9] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- [10] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 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.
- [11] 王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10m 深剖面土壤物理性质研究. *土壤学报*, 2008, 45(3): 550-554.
- [12] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱原农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 61-64.
- [13] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征. *生态学报*, 2014, 34(8): 1975-1983.
- [14] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 430-438.
- [15] 温慧娟, 赵西宁, 高飞. 黄土高原不同降水量区苹果园土壤干化效应及生产水足迹模拟. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1927-1936.
- [16] Han X Y, Liu W Z, Lin W. Spatiotemporal analysis of potential evapotranspiration in the Changwu tableland from 1957 to 2012. *Meteorological Applications*, 2015, 22(3): 586-591.
- [17] 程立平, 刘文兆, 李志, 韩晓阳. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响. *水科学进展*, 2016, 27(5): 670-678.
- [18] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对棉花产量效应的研究. *土壤学报*, 1981, 18(4): 383-388.
- [19] 李玉山, 喻宝屏. 土壤深层储水对小麦产量效应的研究. *土壤学报*, 1980, 17(1): 43-54.
- [20] 曹淑定, 李代琼, 梁一民, 从心海, 何增运. 吴旗飞播区沙打旺根系的研究. *水土保持通报*, 1982, 2(3): 57-62.
- [21] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 651-658.
- [22] 陈杰, 刘文兆, 王文龙, 李志. 长武黄土高原沟壑区降水及侵蚀性降雨特征. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 27-31, 56.
- [23] Lin W, Liu W Z, Xue Q W. Spring maize yield, soil water use and water use efficiency under plastic film and straw mulches in the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38995.
- [24] 王靖, 李湘阁, 刘恩民, 于强. 华北平原冬小麦相对蒸散与叶面积指数及表层土壤含水量的关系. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 38-40.
- [25] 蔡雪梅, 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 蔡立群, 谢军红, 张耀全, 马欣, 潘占东. 黄土高原旱作农田土壤水分对苜蓿种植年限和后茬春小麦的响应. *草业科学*, 2020, 37(9): 1833-1844.
- [26] Bai W M, Li L H. Effect of irrigation methods and quota on root water uptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China. *Agricultural Water Management*, 2003, 62(2): 139-148.
- [27] 王力, 邵明安, 侯庆春. 延安试区土壤干层现状分析. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 35-37.
- [28] 樊军, 邵明安, 王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复. *草地学报*, 2006, 14(3): 261-264.
- [29] 李荣磊, 黄来明, 裴艳武, 邵明安, 张应龙. 毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳水分利用来源研究. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 122-130.
- [30] 赵思腾, 赵学勇, 李玉霖, 毛伟, 王宁, 陈云, 卢建男, 陈雪萍, 王瑞雄, 杨小菊. 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述. *生态学报*, 2022, 42(23): 9898-9908.
- [31] Penna D, Borga M, Norbiato D, Dalla Fontana G. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. *Journal of Hydrology*, 2009,

- 364(3/4): 311-327.
- [32] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2013, 101: 122-128.
- [33] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 523-531.
- [34] Gao X, Wu P, Zhao X, Wang J, Shi Y. Effects of land use on soil moisture variations in a semi-arid catchment: implications for land and agricultural water management. *Land Degradation & Development*, 2014, 25(2): 163-172.
- [35] 崔娟娟, 信忠保, 黄艳章. 2003—2020 年青藏高原冻融侵蚀时空变化特征. *生态学报*, 2023, 43(11): 4515-4526.
- [36] 韩新生, 刘广全, 许浩, 于艺鹏, 郭永忠, 万海霞, 安钰, 王月玲, 董立国. 宁夏南部半干旱黄土区 3 种土地利用类型的土壤水分时空变化特征. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 250-259.
- [37] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. *土壤学报*, 2002, 39(3): 404-411.
- [38] 王雁超, 吕雯, 汪星, 王永强, 王维宝, 杨兴成, 咸福平. 宁南山区雨养苜蓿地土壤水分、养分及根系分布特征. *中国草地学报*, 2022, 44(8): 37-45.
- [39] 徐露, 张丹, 向宇国, 陈凡, 陈玉蓝, 黄田钊. 季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分对降雨的响应. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 37-45.
- [40] Unger P W, Doren D M, Whisler F D, Skidmore E L. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes: Proceedings of a symposium. Madison: American Society of Agronomy, 1982: Special Publication No 44: 105-115.
- [41] 王美艳, 李军, 孙剑, 王学春, 方新宇, 任晶晶. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应. *生态学报*, 2009, 29(8): 4526-4534.
- [42] 罗帅, 冯浩, 李成, 舒方瑜, 董勤各. 旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 259-266.
- [43] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 221-227.
- [44] 李玉山, 韩仕峰, 史竹叶. 渭北塬区农田水分供需特征和低定额灌溉研究. *中国农业科学*, 1985, 18(4): 42-48.
- [45] Moret D, Arrúe J L, López M V, Gracia R. Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain). *Agricultural Water Management*, 2006, 82(1/2): 161-176.