

黄土高原沟壑区小流域雨季末期土壤 水资源状况及其空间分异

党兴东¹, 程立平², 刘文兆^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.平顶山学院,
河南 平顶山 467000; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了阐明雨季末期黄土高原沟壑区小流域土壤水分状况,以王东沟小流域为例,用烘干法测定了不同地形和利用方式组合下 6 m 深度的土壤含水量,测定时间为 2019 年 11 月上旬。结果表明:(1) 塬面不同树龄苹果园 0—2.6 m 土壤湿度较高且无显著差异,其平均值为 21.6%,2.6—6 m 土壤平均湿度随树龄增加而减小,到 26 a 时降至 15.3%。塬面 26 a 苹果园与农田 0—6 m 平均湿度分别为 17.8%,19.9%。下坡位、梁顶和上坡位的 26 a 苹果园 0—0.8 m 土壤湿度都较高,而 0.8 m 以下随深度呈现出递减趋势,0—6 m 平均土壤湿度分别为:16.7%,15.1%,14.0%。各地形刺槐林地 0—1.5 m 的土壤湿度随着深度的增加逐渐减小,塬面刺槐林地 1.5 m 以下保持在 15%左右,而下坡位、梁顶和上坡位均低于 13%。(2) 塬面和下坡位 0—6 m 土壤平均湿度表现出农田>26 a 苹果园>刺槐林地的特征,梁顶和上坡位表现出荒草地>农田>26 a 苹果园>刺槐林地的特征。研究结果对于深入认识黄土高原小流域土壤水资源的分异特征,推进农业生产和植被建设具有重要意义。

关键词:小流域;土壤水资源;雨季;空间分异;土地利用

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0052-06

Soil Water Resources and Their Spatial Differentiation in a Small Watershed on the Loess Tableland-Gully Region at the End of Rainy Season

DANG Xingdong¹, CHENG Liping², LIU Wenzhao^{1,3}

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2.*Pingdingshan University, Pingdingshan, Henan 467000, China*;
3.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: In order to clarify the soil water status in various combinations of landform and land use in the Loess Plateau at the end of rainy season, this study selected Wangdonggou watershed where located in the loess tableland-gully region, and then measured 0—6 m soil water content (SWC) by oven drying method in early November, 2019. The results showed that: (1) the SWC of 0—2.6 m soil depth was relatively high, averaged 21.6%, and there was no significant difference in orchards with different apple tree ages on the tableland; the average SWC of 2.6—6 m soil depth decreased with the increase of apple tree age, and dropped to 15.3% at orchard age of 26; the average SWC of 0—6 m depth were 17.8% and 19.9% in the apple orchard with the age of 26 and farmland on the tableland, respectively. The average SWCs of 0—6 m depth in the apple orchards with the age of 26 were 16.7%, 15.1%, 14.0% at the downslope, ridge-top and upslope, respectively, and showed a decreasing trend with depth below 0.8 m; In the forests of *Robinia pseudoacacia*, the SWC gradually decreased with the increase of depth above 1.5 m, and the SWC below 1.5 m depth was about 15% at the tableland, less than 13% at all of the downslope, ridge top and upslope; (2) the SWCs of

收稿日期:2020-11-03

修回日期:2021-01-24

资助项目:“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0501602);国家自然科学基金(41771036)

第一作者:党兴东(1994—),男,甘肃会宁人,硕士,研究方向为农业水土资源保持与利用。E-mail:dang01233@foxmail.com

通信作者:刘文兆(1960—),男,陕西乾县人,博士生导师,研究员,主要从事流域水文生态与水土保持研究。E-mail:wzliu@ms.iswc.ac.cn

0—6 m depth at the tableland and downslope decreased in the order: farmland>apple orchard with the age of 26>*Robinia pseudoacacia* forest, and the ones at the ridge top and upslope decreased in the order: grassland>farmland>apple orchard with the age of 26>*Robinia pseudoacacia* forest. These results are of great significance for understanding the differentiation characteristics of soil water resources in small watersheds of the Loess Plateau and promoting agricultural production and vegetation construction.

Keywords: small watershed; soil water resources; rainy season; spatial differentiation; land use

在干旱缺水、雨热同期的黄土高原地区,“土壤水库”的调蓄功能在缓解降水不均引起的旱情方面具有重要作用^[1],雨季“土壤水库”内储水量显著增加^[2],到翌年旱季被植被消耗利用,成为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)等夏粮作物及其他植物生长的重要水分来源^[3-4]。土壤水资源量及其有效性直接影响到植物的生长状况^[5]和作物产量^[6-9],另一方面植被类型对土壤水分状况亦具有显著影响,紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)^[10-11]、刺槐林(*Robinia pseudoacacia* L.)^[12]、苹果(*Malus pumila* Mill.)等^[13]高耗水人工林草的种植,使得土壤剖面发生不同程度^[14]的干化^[15]。在地形起伏多变的黄土高原,立地土壤水分状况受多种因素影响,气候因素之外,植被条件和地形的影响占据主要位置^[2,16]。

深入了解雨季到旱季转换过程中土壤水分状况,发挥土壤水库的调蓄功能,在学术研究与生产实践上都有重要意义。本研究在王东沟小流域内,根据地形和利用方式的不同组合选取样地,试图分析雨季末期不同利用方式和地形的土壤水资源状况及分异特征,以期小流域土地利用布局的合理构建和水土资源的高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王东沟小流域(35°12'N,107°40'E)位于陕西省长武县以西 12 km 的秦陇交界处,总面积 6.3 km²,地貌分为塬面和沟壑两大单元,分别占土地总面积的 35%,65%。塬面平均海拔高度为 1 215~1 226 m,以 0°40'向东南倾斜。沟口最低点海拔 946 m,地势相对高差 280 m。土壤以黑垆土和黄壤土为主^[16],田间持水率和凋萎湿度分别为(21.39±0.13)%,(8.06±0.45)%^[17]。气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 578.5 mm,多集中在 7—9 月且年变率大(图 1)。地下水埋深在 60 m 以下,对土壤墒情基本没有影响^[16]。流域内北部塬面的土地利用方式主要有耕地、园地和建设用地,南部沟道以林草地为主,且近年来随着产业结构的调整,林地、园地和

建设用地面积呈增加趋势,耕地面积减少,其中园地面积变化的动态度最大^[18-19]。

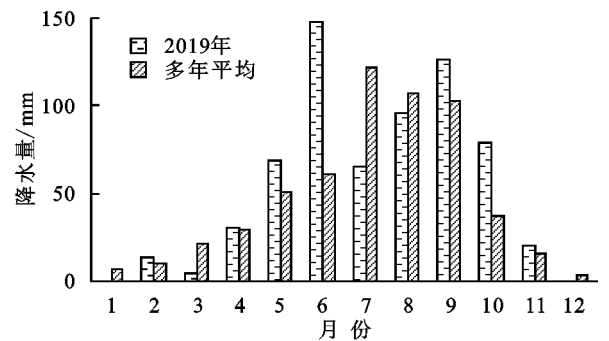


图 1 长武县逐月降水量分布

2019 年长武县年降水量达 649.5 mm,是多年平均降水量的 112%,参照一般的降水年型划分标准^[20]认定为丰水年,其中 6 月和 10 月降水量大幅增加,为同期多年平均降水量的 243%,212%,7—9 月累计降水量与同期多年平均降水量接近。

1.2 试验设计

2019 年雨季末期,11 月上旬在王东沟小流域内,分别选取不同地形地貌下(塬面、梁顶和坡地)的苹果园(树龄分别为 5,8,12,15,26 a 和废弃苹果园)、农田(2017—2019 年都种植冬小麦)、刺槐林地和荒草地{主要有狗尾巴草[*Setaria viridis* (L.) Beauv.]、茵陈蒿(*Artemisia capillaris* Thunb.)、白羊草[*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng]、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)、赖草[*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.]}(表 1),其中坡地的苹果园和农田均已修成梯田。用土钻法取 0—6 m 土层的土壤样品,其中 0—1 m 每 10 cm 取一次样,1—6 m 每 20 cm 取一次样,取回室内后用烘干法(105℃,12 h)及时测定土壤水分含量。

1.3 数据处理

(1) 储水量计算。

$$W=10\sum_{i=1}^n\theta_i\times\rho_i\times h_i \quad (1)$$

式中:W 为土壤储水量(mm); θ_i 为第 i 层土壤质量含水率(g/g); h_i 为第 i 土层厚度(cm),本文中,在 0—1 m 土层深度取 10 cm;在 1—6 m 土层深度取 20 cm; ρ_i 为第 i 土层的土壤容重,本文统一取 1.3 g/cm³^[17];n 为土层数。

(2) 降水量等气象资料从陕西长武农田生态系
统国家野外科学观测研究站数据共享网站(<http://cwa.cern.ac.cn/>)获取。

(3) 用 Excel 2010 处理数据并绘图。

表 1 试验采样点基本信息

地形	样地 名称	海拔/ m	主要 植被	郁闭度/ 盖度/%	胸径/ cm	近 2 a 种植历史	株×行 (m×m)	株高/ m
塬面	5 a 苹果园	1221	苹果树	30	8	—	3×4	3.6
	8 a 苹果园	1224	苹果树	40	12	—	3×4	2.8
	12 a 苹果园	1221	苹果树	85	20	—	3×4	3.0
	15 a 苹果园	1224	苹果树	85	11	—	2.5×3	3.4
	26 a 苹果园	1226	苹果树	90	25	—	3×4	3.2
	农田	1223	冬小麦	80	—	冬小麦	—	—
	林地	1218	刺槐树	30	18	—	4×4	5.1
	30 a 苹果园(已废弃 5 a)	1212	狗尾巴草+茵陈蒿+白羊草	100	—	—	—	—
梁顶	26 a 苹果园	1176	苹果树	70	15	—	3×2	3.0
	农田	1172	冬小麦	80	—	冬小麦	—	—
	林地	1178	刺槐树	60	10	—	2×2	6.0
	荒草地	1170	狗尾巴草+茵陈蒿+白羊草	100	—	—	—	—
上坡位	26 a 苹果园	1166	苹果树	60	16	—	2.5×3	2.7
	农田	1163	冬小麦	80	—	冬小麦	—	—
	林地	1149	刺槐树	30	5	—	3×4	8.0
	荒草地	1152	铁杆蒿+茵陈蒿+白羊草+赖草	100	—	—	—	—
下坡位	26 a 苹果园	1106	苹果树	70	15	—	3×4	3.4
	农田	1112	冬小麦	80	—	冬小麦	—	—
	林地	1112	刺槐树	60	15	—	2×2	15.0
	26 a 苹果园(已废弃 8 a)	1132	铁杆蒿+茵陈蒿+白羊草+赖草	100	—	—	—	—

注:“—”表示未发现该项,下表同。

2 结果与分析

2.1 土地利用方式对土壤水资源状况的影响

2.1.1 塬面 塬面农田、26 a 苹果园、刺槐林地 0—6 m 平均湿度分别为 19.9%,17.8%,17.1%,可见农田水分状况优于 26 a 苹果园、26 a 苹果园优于刺槐林地,但是不同深度范围内土壤湿度变化并不一致。由图 2A 可知,雨季末,塬面 0—1.4 m 土层内农田、26 a 苹果园、刺槐林地的土壤含水量均到田间持水量水平,分别为 21.8%,22.0%,21.9%,储水量则分别为 398,401,398 mm,方差分析表明无显著差异。1.4 m 以下土层不同利用方式之间土壤水分出现明显差异,其中 1.4—3.6 m 深度范围内表现为 26 a 苹果园>农田>刺槐林地,平均含水量分别为 19.9%,18.7%,14.6%,该层土壤水分状况在苹果园表现最好。3.6 m 以下土层土壤水分表现为农田>刺槐林地>26 a 苹果园,平均含水量分别 19.9%,17.0%,13.8%,这表现出植被类型对深层土壤水分状况的影响,农田因作物根系深度较浅对深层土壤水分几乎没有影响,水分状况最好。

由图 2B 可以看出,不同林龄苹果园的土壤湿度

随着深度的增加差异性逐渐增大。经过雨季降水补给,5,8,12,15,26 a 的苹果园在 0—2.6 m 的平均含水量均保持在田间持水量水平,无显著差异,分别为 21.6%,21.5%,21.6%,22.0%,21.3%,储水量均在 730 mm 左右。2.6—6 m 不同林龄的苹果园的平均含水量分别为 22.9%,20.9%,20.6%,19.8%,15.3%,呈现出随着林龄增加而减少的趋势,表明其对深层土壤水分状况的影响随林龄增加而增大。

2.1.2 梁顶 梁顶荒草地、农田、26 a 苹果园、刺槐林地 0—6 m 土层平均含水量分别为 20.6%,19.9%,15.1%,12.3%,荒草地土壤平均湿度均接近田间持水量,土壤水资源总体表现出荒草地>农田>26 a 苹果园>刺槐林地的规律。由图 3 可知,在 0—0.8 m 土层内荒草地、农田、26 a 苹果园、刺槐林地的平均土壤湿度均达到田间持水量且无显著差异,分别为 21.8%,20.8%,21.2%,20.9%,储水量分别为 226,217,220,218 mm。0.8 m 以下土层不同利用方式之间土壤水分出现明显差异,其中 0.8—3.4 m 深度范围内表现为荒草地>农田>26 a 苹果园>刺槐林地的规律,平均湿度分别为 22.3%,19.4%,14.7%,10.2%,其中荒草地平均土壤含水量达到田间持水量水平,而刺槐林地土壤湿度在 1.6 m

处最小,其值为 8.1%。3.4 m 以下土层表现为农田>荒草地>26 a 苹果园>刺槐林地的特征,平均土壤湿度分

别为 20.0%,18.5%,13.7%,11.6%,各利用方式的土壤水分差异随深度增加呈减小趋势。

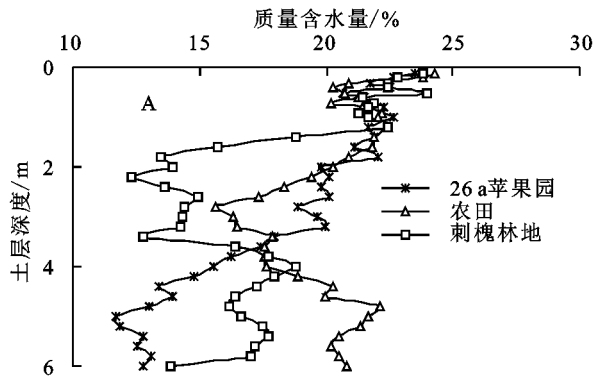


图2 塬面不同利用方式和不同林龄苹果园土壤水分剖面

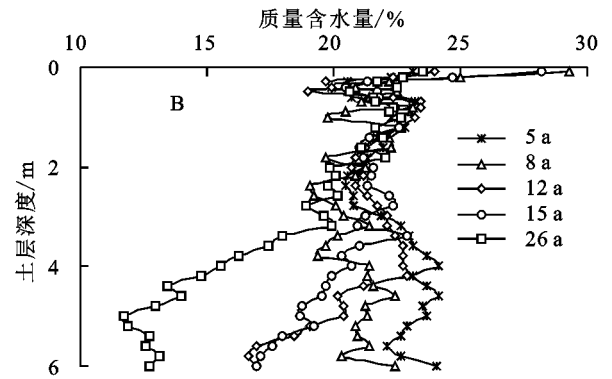


图3 梁顶不同利用方式的土壤水分剖面

2.1.3 上坡位 上坡位荒草地、农田、26 a 苹果园、刺槐林地 0—6 m 土层平均含水量分别为 20.9%, 21.3%,14.0%,12.6%,荒草地和农田的平均土壤湿度均达到田间持水量,土壤水资源总体表现出农田(梯田)>荒草地>26 a 苹果园>刺槐林地的规律,与梁顶一致。由图 4 可以看出,0—0.8 m 土层范围内荒草地、农田、26 a 苹果园、刺槐林地的平均土壤湿度分别为 23.1%,20.3%,20.7%,20.2%,均接近或超过田间持水量,储水量分别为 240,212,215,210 mm。0.8—3 m 土层表现为农田(梯田)>荒草地>26 a 苹果园>刺槐林地的规律,其平均含水量分别为 22.1%,21.7%,15.9%,11.2%,该层荒草地和农田的平均土壤湿度均达到田间持水量水平,刺槐林地和苹果园的土壤含水量急剧减少,土地利用方式是影响该层土壤水分的主要因素。3—6 m 土层不同利用方式的土壤水资源表现为农田>荒草地>刺槐林地>26 a 苹果园的特征,其平均含水量分别为 21.0%,19.8%,11.5%,10.8%,该层刺槐林地的土壤湿度有所增加,在 3 m 深度处反超苹果园,表现出苹果园 3—6 m 深度范围内发达的根系对水分的吸收消耗,使土壤水分含量保持在较低水平。

2.1.4 下坡位 由图 5 看出,下坡位农田在测定深

度内的水分含量剖面变化不大,且其平均土壤湿度达到田间持水量水平,而苹果园、刺槐林地上下层的水分含量变化剧烈,3 种利用类型 0—6 m 土层的平均土壤湿度依次分别为 22.2%,16.7%,13.3%,表现为农田>苹果园>刺槐林地的特征。0—0.6 m 范围内农田、苹果园、刺槐林地的平均土壤含水量分别为 21.4%,23.3%,21.0%,该层各利用方式的土壤湿度较高。0.6—2.6 m 土层苹果园、刺槐林地的土壤水分随深度增加急剧减小,农田则无显著变化。2.6—6 m 范围内农田、苹果园、刺槐林地的平均土壤含水量分别为 21.7%,14.0%,11.9%,各利用方式土壤湿度较上层有明显减小。刺槐林地从 0.8 m 以下深度的含水量即急剧减少到较低水平,至 6 m 均无大幅变化。

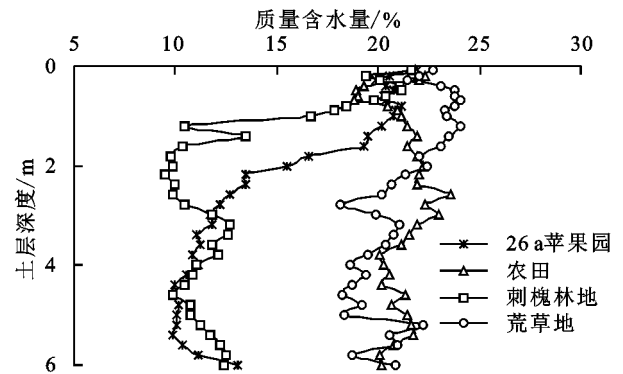


图4 上坡位不同利用方式的土壤水分剖面

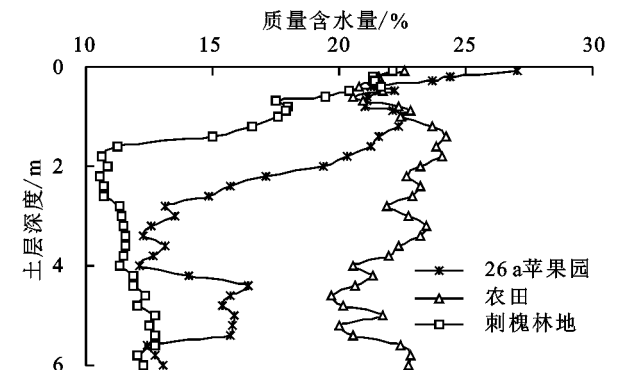


图5 下坡位不同利用方式的土壤水分剖面

2.2 地形对土壤水资源状况的影响

地形是土壤水分状况的重要影响因素之一,不同地形条件下同一土地利用方式土壤水分剖面分布具有一定的相似性,但土壤水分含量具有明显差异(图 6)。农田 0—6 m 通层含水量都较高,平均土壤湿度表现出下坡位>上坡位>塬面>梁顶的规律(图 6A),塬面和梁顶因有较好的管理措施,农作物产量较高导致水分消耗较多,加之梁顶有地表径流损失,因而土壤水分含量较低。

不同地形下苹果园和刺槐林地的土壤水分在

0—6 m 深度范围内均随深度增加而减小(图 6B—C),其原因在于苹果和刺槐均为深根乔木,虽然在雨季末浅层土壤水分得到一定程度的恢复,但深层土壤依然处于干燥化状态。苹果园 0—6 m 土层平均湿度表现出塬面>下坡位>梁顶>上坡位的规律,刺槐林地则表现为塬面>下坡位>上坡位>梁顶。塬面地形平坦,土层深厚,降水可全部入渗补充土壤水,而坡地和梁顶有径流产生,损失部分降水量,因此塬面苹果园和刺槐林地土壤水分状况较好。

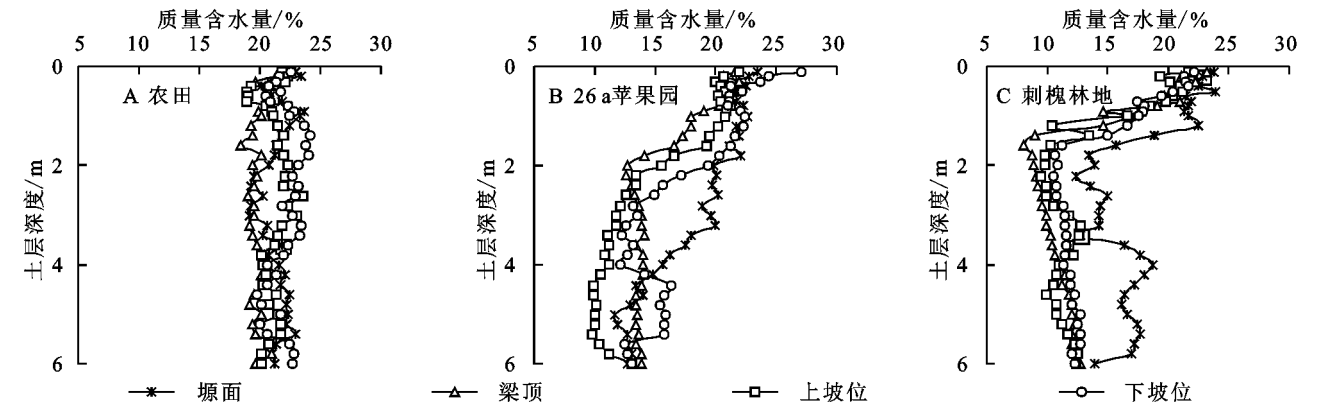


图 6 不同地形的农田、26 a 苹果园和刺槐林地土壤水分剖面

3 讨论

土壤水分状况受降水、地形、植被类型等多重因素的影响,处于动态变化之中。经过雨季降水的补给,小流域内土壤水资源均有所增加。不同土地利用方式下,塬面、梁顶、上坡位、下坡位土壤湿度增加至田间持水量的深度最浅的均是刺槐林地,其深度分别为 1.4,0.8,0.8,0.6 m;最深的分别为 5 a 苹果园、农田、荒草地、农田,其深度依次为 6,3,2.2,3.8 m,可见雨季末期塬面土壤水分的恢复程度最好,梁顶、上坡位次之,下坡位土壤含水量的恢复程度最低^[21],主要原因在于不同地形对于降水拦蓄程度不同,塬面地形平坦土层深厚,雨季降水能够全部就地入渗,梁顶坡地易产生径流损失^[22],这也是苹果园在 0—6 m 土层的储水量呈现出塬面>梁顶>上坡位的原因(表 2)。

表 2 雨季末小流域 0—6 m 土层的土壤储水量

土地利用方式	mm			
	塬面	梁顶	上坡位	下坡位
荒草地	—	1604	1634	—
农田	1550	1551	1659	1728
26 a 苹果园	1385	1180	1089	1306
刺槐林地	1335	958	979	1036

植被类型对土壤水分的影响,更多地通过植物根系深度分布以及吸水能力的差别上反映出来。比如

荒草主要影响 1 m 以内深度范围的土壤水分^[20],小麦根系可达 3 m,影响到 0—3 m 左右深度的土壤水分^[23],而苹果园的土壤水分波动深度可达 10 m 以下^[24]。表 2 可知,同一地形下不同利用方式的土壤水资源总体表现为荒草地>农田>26 a 苹果园>刺槐林地的特征。苹果园深层土壤水分随着苹果林龄的增加逐年减少^[25],但是经过雨季降水补给,雨季末期不同林龄苹果园在一定深度范围内土壤水分并无差异,这与雨季降水量的多少相关^[26-27]。

4 结论

(1) 小流域内的土壤水资源状况,在气候因素之外,主要受地形与土地利用方式共同影响。塬面不同林龄苹果园的土壤湿度在 2.6 m 以下深度出现明显差异,且对深层土壤水分状况的影响随林龄增加而增大,梁顶和上、下坡位的 26 a 苹果园在 0—0.8 m 的土壤含水量均较高,而 0.8 m 以下呈递减趋势;梁顶和上、下坡位刺槐林地的土壤水分含量在 1.5 m 左右深度达到最低值,0—6 m 平均土壤湿度分别为 12.3%,12.6%,13.3%;塬面农田在 1.4—2.6 m 深度的土壤含水量处于较低水平,0—6 m 的平均土壤含水量为 19.9%,梁顶和坡地农田的土壤含水率在测定深度内无明显差异。

(2) 相同地形下不同土地利用方式土壤湿度的差别,塬面表现出农田>26 a 苹果园>刺槐林地的特征,梁顶和上坡位表现为荒草地>农田>26 a 苹果园>刺槐林地,下坡位表现为农田>26 a 苹果园>刺槐林地;而在利用方式相同时,地形对土壤含水量的影响,苹果园表现为塬面>下坡位>梁顶>上坡位的特征,刺槐林地表现为塬面>下坡位>上坡位>梁顶,农田则表现为下坡位>上坡位>塬面>梁顶。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [2] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].水土保持通报,2002,22(4):6-9.
- [3] 张瑞,李鹏展,王力.黄土旱塬区土壤水分状况与作物生长、降水的关系[J].应用生态学报,2019,30(2):359-369.
- [4] 孟春红,夏军.“土壤水库”储水量的研究[J].节水灌溉,2004(4):8-10.
- [5] 单长卷,梁宗锁,郝文芳,等.黄土高原不同立地条件下刺槐生长与水分关系研究[J].西北林学院学报,2004,19(2):9-14.
- [6] Wang X C, Qadir M, Rasul F, et al. Response of soil water and wheat yield to rainfall and temperature change on the Loess Plateau, China[J]. Agronomy,2018,8(7). DOI:10.3390/agronomy8070101.
- [7] 李玉山,郭明航,董大学,等.渭北旱塬旱作水分产量潜势与水—肥—产量关系[C]//李玉山,苏陕民.长武王东沟高效生态经济系统综合研究.北京:科学技术文献出版社,1991.
- [8] 梁增基.渭北高原小麦水分生产潜力的分析[J].干旱地区农业研究,1990,8(2):12-17.
- [9] 李玉山,张孝中,郭民航.长武塬区旱作水分产量潜势的田间研究[J].陕西农业科学,1988,34(2):15-17.
- [10] 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.
- [11] 张春霞,郝明德,魏孝荣,等.黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):604-607.
- [12] 王力,邵明安,张青峰.陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J].应用生态学报,2004,15(3):436-442.
- [13] Huang M B, He F H, Yang X M, et al. Effect of apple production base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001,11(2):239-243.
- [14] 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):1-9.
- [15] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [16] 李玉山,史竹叶,张孝中,等.长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征[J].水土保持通报,1990,10(6):1-6.
- [17] 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.
- [18] 张志强,陈鹏飞,申维.长武县土地利用/覆被演变规律及其影响下生态服务价值变化研究[J].水土保持研究,2017,24(4):219-226,233.
- [19] 俱战省,郑粉莉,刘文兆.黄土高原南部小流域土壤水分时程变化的分层特征及其驱动机制[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):28-33.
- [20] 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.
- [21] 张瑞,曹华,王云强,等.黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J].水土保持研究,2012,19(5):52-58.
- [22] 马建业,李占斌,马波,等.黄土区小流域植被类型对沟坡地土壤水分循环的影响[J].生态学报,2020,40(8):1-9.
- [23] 李鹏展,王力,王棣.黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态[J].应用生态学报,2017,28(11):3653-3662.
- [24] 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[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [25] 曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [26] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2008,28(4):1429-1445.
- [27] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(8):1133-1138.