黄土高原白草塬土壤水分特征及对土地利用变化的响应

林国伟，李 志，李晨曦，向 伟，林雪青
（西北农林科技大学 资源环境学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：[目的] 对黄土高原白草塬土壤水分特征及对土地利用变化的响应进行分析，为该区水资源管理和生态建设提供重要的参考依据。[方法] 测定并分析白草塬 6 种利用方式下 0—10 m 的土壤水分，并基于土壤储水量、水分亏缺量及干燥化指数等指标评价土地利用变化的影响。[结果] 6 种土地利用方式 0—10 m 平均含水量表现为：农地＞荒草地＞苜蓿地＞杏林地＞杏林柠条间作地＞杏林苜蓿间作地。土地利用变化对土壤水分的影响深度不同，苜蓿地与荒草地的影响集中在 0—5 m，而包含杏树的利用方式对土壤水分的影响向深层推进甚至可贯穿整个剖面。0—5 m 除农地外皆有重度土壤干燥化现象；5—10 m 包含杏树的利用方式干燥化程度较农地、荒草地和苜蓿地严重。[结论] 农地转变为包含杏树的利用方式后对土壤深层水分有显著的影响，造成土壤水分储水量减少和干燥化现象严重。

关键词：土壤水分；土地利用变化；深剖面；黄土塬区
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)02-0032-07 **中图分类号**：S157.2，F301

文献参数：林国伟，李志，李晨曦，等. 黄土高原白草塬土壤水分特征及对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报，2017，37(2)：32-38. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.005；Lin Guowei，Li Zhi，Li Chenxi，et al. Characteristics of Soil Water and Response to Land Use Changes on Baicao Loess Tableland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(2)：32-38. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.005

Characteristics of Soil Water and Response to Land Use Changes on Baicao Loess Tableland

LIN Guowei，LI Zhi，LI Chenxi，XIANG Wei，LIN Xueqing
（*College of Natural Resources and Environment，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi* 712100，*China*）

Abstract：[Objective] The characteristics and response of soil water to land use change(LUC) on Baicao loess tableland were demonstrated to provide information for water resources management and ecological construction. [Methods] Soil water contents in 0—10 m profile were measured under six typical land use types (farmland，grassland，alfalfa，apricot，apricot-caragana，and apricot-alfalfa land)，and soil water storage (SWS)，soil water deficit(SWD) and soil desiccation index(SDI) were calculated. [Results] The average soil water contents under the six land use types ranked as farmland＞grassland＞alfalfa＞apricot＞apricot-caragana＞apricot-alfalfa. The depth of water profiles being influenced by vegetation were different. The effects of alfalfa and grassland on water content concentrated in 0—5 m profile，while the effects of other land use types as apricot，apricot-caragana，and apricot-alfalfa were detected in the whole measured profile，it was as deepen as 10 m. Except for farmland，SDIs were very large for all land use types in 0—5 m depth. In 5—10 m profile，SDIs were comparatively small under farmland，grassland and alfalfa；and were moderate under apricot and apricot-caragana；exhibited the largest under apricot-alfalfa. [Conclusion] The conversion from farmland to other land use types with apricot greatly impacted soil water at deep soil profile. These land use types reduced SWS and deteriorated soil water condition by desiccation.

Keywords：**soil water；land use change；deep soil profile；loess tableland**

收稿日期：2016-08-31 **修回日期**：2016-09-06
资助项目：国家自然科学基金项目“基于环境同位素的黄土高塬沟壑区水循环机制研究”(51179161)；中央高校基本科研业务费(2452015105)
第一作者：林国伟(1992—)，男(汉族)，河南省林州市人，硕士研究生，研究方向为环境变化水文效应。E-mail：linguoweivip@163.com。
通讯作者：李志(1978—)，男(汉族)，山东省沂水县人，博士，教授，主要从事水文水资源方面的研究。E-mail：lizhibox@126.com。

黄土高原严重的土壤侵蚀对人们赖以生存的生态环境造成严重的破坏,进而制约着区域经济发展[1-5]。为此,自 20 世纪 50 a 来以来国家开展了大量的水土保持工作,特别是 1999 年开展的退耕还林还草政策,导致土地利用方式发生了极大的变化。土地利用变化大大减少了土壤侵蚀[6],保持了土壤肥力,有效利用了土地资源[7]等。但需要注意的是,土地利用变化导致区域水循环发生了重要的变化,如径流减少[8],地下水储量减少[9]和土壤干层加剧[10]等。因此,土地利用变化的水文效应备受关注,为此,需要具体分析水文变异与土地利用的关系,从而为区域尺度上的决策提供依据。黄土高原深厚的黄土层为土壤水分的存贮提供了条件,形成了土壤水库[11],因此,土壤水分对于调节整个水文过程具有重要的意义。塬区土层更加深厚,多在 130 m 以上,理论上讲具有更加丰富的水资源,但近年来发生的地下水位下降[12]和干燥化现象[13]已经严重威胁了当地的生产生活,受到了广泛的关注,因此,探讨地下水的补给机制及其影响因素成为当前的研究热点[14-16]。由于近 50 a来黄土高原的降水有显著的降低趋势[17],因此,地下水等的变化应该主要由人类活动导致,一方面是由于地下水的抽提量加大直接导致的,另外一个重要的方面就是大范围的土地利用变化改变了土壤水文过程,如大面积农地转换为果园等经济林导致的土壤水分变化[18]。因此,通过分析不同利用方式下的土壤水分含量,可以有效分析各种水文过程的变化。同时,对于干旱区而言,土壤水分是维持植物生长的基本要素,也是衡量不同类型植物是否适合生长的重要指标。可见,分析土地利用变化与土壤水分变化的关系,对于理解水文变化和指导土地规划与生态建设等都具有重要的意义。

在半湿润区的几个典型黄土塬区,如长武塬和洛川塬等都有大量的相关研究[19-22],主要是针对农地转换为苹果园后的生态水文效应,而针对干旱气候下塬区的相应研究不多。甘肃会宁县的白草塬区,年均降水量 184.8 mm,属于典型的旱区,由于“退耕还林(草),封山绿化”政策的实施[23-26],土地利用类型发生较大变化,如农地转为杏树林和苜蓿地等。此种背景下,干旱气候下黄土塬区土地利用变化对土壤水分的影响需要研究。通过分析白草塬区塬面农田、林地、草地等不同土地利用方式下深剖面土壤水分的差异,分析黄土塬区土壤水分分布特征,评价土壤干燥化现状,探讨土地利用变化对土层土壤水分的影响,可为黄土高原合理利用土地,促进区域生态环境的可持续发展提供依据。

1　材料与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于黄土高原西部甘肃省会宁县白草塬,属东南季风气候西北部边缘区,年均降水量 184.8 mm[18],年均气温 6.4 ℃,年均日照时数 2 613 h,年均辐射量 579 MJ/m^2,年均≥10 ℃,有效积温 2 920.5 ℃。土壤主要为沙壤土和黄绵土[27-28]。由于气候干旱,塬区土地利用方式以农地为主,主要位于便于修筑水渠的塬中心进行引黄灌溉,但 1999 年以来大量农地转换为杏树林及杏树与其他灌木或草的间作地[29]。

1.2　样点选择与土壤水分测定

2015 年 7 月在白草塬面上选择具有代表性的 6 个典型土地利用方式,即农地、荒草地、苜蓿、杏林、杏林柠条间作地及杏林苜蓿间作地。其中,杏林与柠条或苜蓿的间作地选择相邻 4 棵杏树中心(树行距 3.5 m×4.0 m)以及生长密度均匀的间作柠条或苜蓿地作为采样点。经调查这些样地无灌溉历史而完全依靠天然降水,因此,其土壤水分状况可以反映农地转变为其他类型后的土壤水文效应。具体情况详见表 1。采用土钻在上述样点取 0—10 m 范围内土样,每隔 20 cm 采集 1 个土样,在 105 ℃恒温条件下连续烘干 12 h 至恒量测定土壤含水量,计算各层土壤质量含水率。

表 1　白草塬采样点概况

编号	现土地利用方式	原土地利用方式	植被年限/a	经纬度
1	农 地	农地	—	36°11′08″N, 105°04′53″E
2	荒草地	农地	3	36°13′32″N, 105°04′17″E
3	苜蓿地-1	农地	3	36°13′55″N, 105°06′42″E
4	苜蓿地-2	农地	2	36°11′08″N, 105°04′54″E
5	杏林地-1	农地	9	36°13′35″N, 105°04′18″E
4	杏林地-2	农地	9	36°13′44″N, 105°05′07″E
7	杏林柠条间作地-1	农地	9	36°13′35″N, 105°04′18″E
8	杏林柠条间作地-2	农地	9	36°13′40″N, 105°04′49″E
9	杏林苜蓿间作地-1	农地	8	36°13′57″N, 105°06′35″E
10	杏林苜蓿间作地-2	农地	8	36°11′09″N, 105°04′52″E

1.3 数据分析

为探讨土壤水分特征及其对土地利用变化的响应,按照两个层次进行数据统计和分析。首先计算不同土地利用方式下土壤水分的统计参数,通过直接对比来初步分析土地利用变化对土壤水分的影响;其次,通过土壤储水量、水分亏缺量和干燥化程度等指标量化土地利用变化的影响。土壤储水量(SWS)、水分亏缺量(WD)及土壤干燥化指数(SDI)计算公式为:

$$SWS = SM \cdot SBD \cdot h \quad (1)$$

$$WD = W_F - SWS \quad (2)$$

$$SDI = \frac{SM - W_M}{SSM - W_M} \times 100\% \quad (3)$$

式中:SWS——土壤储水量(mm); SM——重量含水率(%); SBD——土壤容重(g/cm³); h——土层深度(cm); WD——水分亏缺量(mm); W_F——田间持水量(%); W_M——凋萎湿度(%); SSM——土壤稳定湿度(凋萎湿度与田间持水量的算术平均值)(%),反映了地区土壤保持水分能力的平均状态; SDI——土壤干燥化指数(%),可准确定量描述研究区土壤干燥化强度和干旱胁迫程度,反映土壤水分亏缺量占土壤正常有效含水量的比重。依据 SDI 值的大小,将土壤干燥化强度划分为 4 级[30]:(1) 若 SDI≥100%,为无干燥化;(2) 若 70%≤SDI <100%,为轻度干燥化;(3) 若 40%≤SDI<70%,为中度干燥化;(4) 若 SDI <40%,为重度干燥化。

2 结果与分析

2.1 土壤水分总体特征

各土地利用方式下的土壤水分含量和垂直分布有差异。6 种利用方式下整个剖面的平均土壤水分含量:农地>荒草地>苜蓿地>杏林地>杏林柠条间作地>杏林苜蓿间作地(表 2),其数值分别为10.3%,9.2%,8.9%,7.4%,7.1%和 5.7%。其中,农地、苜蓿地和荒草地的土壤水分含量约占田间持水量的 1/2,2/5,2/5,而包含杏树的利用方式(3 种:杏林、杏树与柠条间作地、杏树与苜蓿间作地)下土壤水分含量均仅占田间持水量的 3/10,明显低于农地和草地。

表 2 不同土地利用方式下 0—10 m 土壤水分统计特征 %

土地利用方式	0—5 m 土层		5—10 m 土层		0—10 m 土层	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
农 地	9.5	2.1	11.2	2.6	10.3	2.9
荒草地	7.2	1.7	11.2	1.7	9.2	4.5
苜蓿地-1	7.3	6.8	10.5	4.3	8.9	8.1
苜蓿地-2	6.9	0.9	10.8	2.2	8.8	5.4
杏林地-1	5.0	0.9	7.4	2.1	6.2	2.9
杏林地-2	8.0	2.7	9.0	5.3	8.5	4.3
杏林柠条间作地-1	5.1	1.5	7.7	4.3	6.4	4.5
杏林柠条间作地-2	5.1	0.3	10.4	5.4	7.8	10.0
杏林苜蓿间作地-1	5.1	2.9	5.7	1.3	5.4	2.1
杏林苜蓿间作地-2	5.2	1.5	6.8	1.2	6.0	2.0

随土层深度增加,苜蓿地和荒草地土壤含水量在 1 m 下剖面逐渐提高(图 1),其他 4 种利用方式土壤水分 0—5 m 逐渐减少而 5—10 m 呈增加趋势。0—5 m 土层,杏树与柠条或苜蓿的间作地含水量接近萎蔫湿度,可见其对浅层土壤水分有较严重的影响。各土地利用方式在 5—10 m 土层内土壤水分有增加趋势,8—10 m 出现相对的高含水层。这些垂直分布的差异表明植被对土壤水分的影响程度和深度不同。

2.2 土地利用变化对土壤水分的影响

表 2 和图 1 初步表明 6 种土地利用方式下土壤水分形成稳定差异的深度为 5 m。为分析土地利用变化对土壤水分的影响,将 6 种利用方式分类给出垂直分布图,并与农地进行对比(图 1)。较农地的土壤水分储量,0—5 m 剖面荒草地和苜蓿地减少了 155 mm(占田间持水量的 33.9%),而包含杏树的利用方式减少了 301 mm(占田间持水量 65.8%);5—10 m 剖面,农地、荒草地和苜蓿地差异不大,但包含杏树的利用方式减少了 198 mm(占田间持水量的 37.4%),但均未达到萎蔫湿度(4%);杏林地较农地减少,其中一块杏林已经达到萎蔫湿度(图 1);杏林柠条间作地和杏林苜蓿间作地土壤水分较农地严重减少(图 1),且均已接近或达到萎蔫湿度,形成了明显的、深厚的土壤干层。可见,杏树的种植对深层土壤水分有显著影响。5—10 m 土层,荒草地与苜蓿地的土壤水分随土层深度加深而增加并与农地接近;杏林地(图 1)、杏林柠条间作地和杏林苜蓿间作地(图 1)的土壤水

分随土层深度的加深而缓慢增加,且是 6 种样地的最低值。植物集中耗水层一般是土层所含水分最低值[31],与无杏树利用方式相比,可能是杏树根部的吸水作用使 5 m 以下土壤水分曲线较农地出现向左偏移。可见,土地利用变化对深层土壤水分有重要的影响。

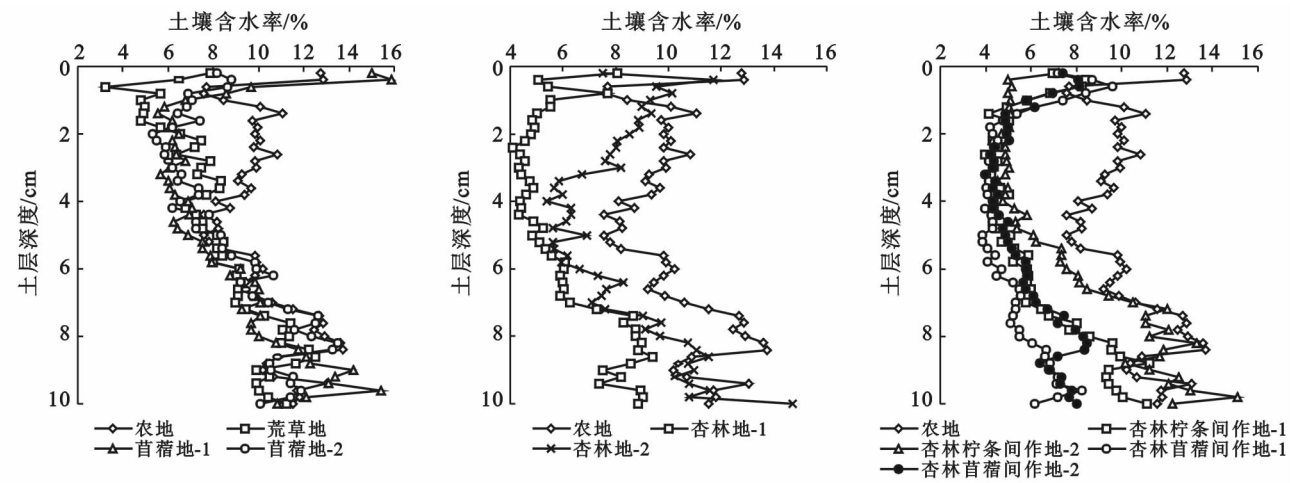


图 1　不同土地利用方式下土壤水分含量的垂直分布

2.3　土地利用变化对土壤储水量的影响

土壤储水量(SWS)能够综合反映植被根系对土壤剖面结构的影响,是进行植被恢复和重建工程的理论依据[21],为此,此部分使用土壤储水量和水分亏缺量来量化土地利用变化的影响(表 3)。0—5 m 农地、草地和苜蓿地储水量分别为 618,468,460 mm(均值,下同),占田间持水量(WF)的 45.1%,34.1% 和 33.8%,水分亏缺较为严重;包含杏树的利用方式间土壤储水量差异较小,分别为 422,332 和 336 mm,占田间持水量 30.9%,24.4% 和 24.6%,水分亏缺严重,远低于田间持水量。5—10 m,农地、草地和苜蓿地储水量基本持平,为 665 mm 左右;但包含杏树的利用方式间差异大,分别为 494,546 和 375 mm,远低于田间持水量。0—10 m 整个剖面各利用方式都存在水分亏缺现象,但包含杏树的利用方式远大于其他利用方式。

表 3　各样地不同土层储水量状况

土地利用方式	储水量/mm			占田间持水量比例/%			水分亏缺量/mm		
	0—5 m	5—10 m	0—10 m	0—5 m	5—10 m	0—10 m	0—5 m	5—10 m	0—10 m
农 地	618	669	1 287	45.1	53.5	49.3	642	585	1 227
荒草地	468	675	1 143	34.1	53.1	43.6	828	659	1 487
苜蓿地-1	473	652	1 125	34.7	50.1	42.4	787	628	1 415
苜蓿地-2	447	648	1 095	32.8	51.5	42.1	813	612	1 425
杏林地-1	326	445	771	23.9	35.4	29.6	934	815	1 749
杏林地-2	518	542	1 060	37.9	43.1	40.5	742	718	1 460
杏林柠条间作地-1	331	465	796	24.3	36.8	30.5	929	797	1 726
杏林柠条间作地-2	333	626	959	24.4	49.7	37.0	927	634	1 561
杏林苜蓿间作地-1	336	342	678	24.6	27.1	25.9	924	918	1 842
杏林苜蓿间作地-2	336	407	743	24.6	32.3	28.5	924	853	1 777

深层土壤水分含量与土地利用方式和种植年限相关。农地转化为荒草地和人工苜蓿地后深层储水量变化不明显,但包含杏树的利用方式的深层土壤水分严重亏缺。这些差异一方面是由于农地转化为草地的时间较短,另一个方面则是杏树根系的作用深度大导致土壤水分长期处于负补偿而发生水分亏缺造成的。相同的利用方式存在一定差异,可能与植被生长状况导致需水量不同相关[32-35]。

2.4　土地利用方式变化对土壤干燥化程度的影响

土壤干燥化指数可定量描述研究区土壤干燥化强度和干旱胁迫程度[19,36],反映土壤水分亏缺量占土壤正常有效含水量的比重(表 4)。0—10 m 剖面,农

地、荒草和苜蓿地土壤干燥化指数的平均值为 63%，以中度干燥化为主；而包含杏树的利用方式的土壤干燥化指数平均取值 32%，以重度干燥化为主。0—5 m，土壤干燥化指数平均为 42%，除了农地和一块杏林地属中度干燥化外，其他利用方式下均为重度干燥化；5—10 m 不同利用方式间存在显著差异，农地、草地和苜蓿地属轻度干燥化，而包含杏树的利用方式属中度或者重度干燥化。同时，5—10 m 杏林、杏树与柠条间作地属中轻度干燥化，而杏树与苜蓿间作地属重度干燥化，可见，苜蓿的土壤水分消耗量大于其他植被[37]。

表 4 各利用方式下不同深度土层的土壤干燥化指数(SDI)

深度利用类型	0—5 m 土层		5—10 m 土层		0—10 m 土层	
	SDI/%	干燥度	SDI/%	干燥度	SDI/%	干燥度
农 地	64	中度	85	轻度	75	轻度
荒草地	31	重度	71	轻度	61	中度
苜蓿地-1	39	重度	77	轻度	58	中度
苜蓿地-2	34	重度	80	轻度	57	中度
杏林地-1	12	重度	40	中度	26	重度
杏林地-2	47	中度	59	中度	53	中度
杏林柠条间作地-1	13	重度	44	中度	28	重度
杏林柠条间作地-2	13	重度	76	轻度	44	中度
杏林苜蓿间作地-1	14	重度	20	重度	17	重度
杏林苜蓿间作地-2	14	重度	33	重度	23	重度

3 讨 论

白草塬降雨量少，大部分区域无灌溉条件而地下水位较深，植被变化显著影响土壤水分状况。通过分析 6 种利用方式土壤水分状况，发现无杏树样地深层土壤含水量 10.9%，土壤水分亏缺量少，干燥化程度较小(中度干燥化)；而包含杏树的利用方式深层土壤水分含量仅为 7.8%，亏缺量为 789±156 mm，约占田间持水量的 37.4%。此种变化程度远较地处半湿润区的塬区严重，长武塬 20 a 苹果园的深层土壤水分含量为 17.3%，储水量减少 30%[38-39]。可见，土地利用变化改变了陆地水分循环路径，削弱降雨转化为地表径流的比率。这必然更加严重地降低土壤水分入渗能力，进而影响地下水补给，而这可能也是白草塬地下水资源严重短缺的重要原因之一。

重力下渗和吸力下渗是黄土高原土壤水分下渗的 2 种主要机制[18]。降水入渗量超过土壤水分的亏缺量且入渗超过作用层深度才发生重力下渗。白草塬年降水量 158 mm，干燥化程度最低的农地 0—5 m 土层水分亏缺 642 mm，除丰水年或较大规模集中连续降水情况外，降水量难以超过土壤水分亏缺量；图 1 也显示出植被根系作用较深且存在土壤干层，重力下渗深度有限。塬区土壤水分上干下湿，故不存在吸力下渗。因此，白草塬降水入渗通常只发生在干湿交替层，土壤深层水分难以得到补给，将使作为干旱半干旱地区植物生长耗水主要来源的土壤水库受到影响，加重土壤干燥化。对于白草塬开展的退耕还林还草政策是否能达到“涵养水源”功能和保护生态系统，尚存在一定争议需要深入研究。

人工林植被虽然能够使长期未被利用的深层土壤水资源得以利用，但不合理的利用将会以深层土壤水分为代价，造成黄土高原植被系统的不稳定。资料表明[9,40-42]：长武和洛川塬区果园深层土壤水分均出现不同程度亏缺现象，甚至长武塬 20 a 果园的深层土壤已发生稳定干燥化；侯庆春[43]调查延安 7 个乡后结果表明人工植被条件下的大部分区域出现土壤实际含水量接近凋萎湿度的土壤水分亏缺层。穆兴民[44]认为在黄土高原干旱半干旱气候背景下，人工林植被的耗水可使 3～8 m 剖面土壤含水量降低到长期接近或低于凋萎湿度，形成难以恢复的深厚土壤干层。李军[13]研究了黄土高原北部半干旱偏旱区林地、草地和农田土壤水分情况，其干燥化程度分别属于严重干燥化、严重干燥化和轻度燥化强度，林草地土壤干层厚度可达 8 m，甚至部分林地出现极度干燥化。本研究中 6 种利用方式所出现的不同程度土壤干燥化及干层现象与穆兴民和李军研究结论基本相符。因此，土地利用对黄土塬区土壤水分已成为不可忽视的影响因素需要加以重视，应采取有效的管理措施防止区域生态环境遭到破坏。

土壤水分变化反过来又可能影响植被生长状况。蒲金涌[45]分析了陇西地区严重干旱土壤含水量界限值为 9%，低于此值后植被生长将受到水分制约，最终引起植物枯死。而采样区中也发现了部分杏树的衰败现象。农地和草地对深层土壤水分影响较小，因

此,需要考虑种植适宜本地区的植物,进一步加强土地利用规划和管理。可见,在生态建设取得一定成效的前提下,如何进行水资源的可持续利用已成为一个重要的议题。

4 结 论

通过测定白草塬区 6 种土地利用方式(农地、荒草地、苜蓿地、杏林地、杏林柠条间作地,杏林苜蓿间作地)10 m 剖面的土壤水分,分析了土地利用方式变化对土壤水分的影响,初步探讨了可能形成的水文效应。

不同利用方式对土壤水分的影响程度和深度不同。6 种利用方式下 10 m 剖面土壤水分含量不同,表现为:农地>荒草地>苜蓿地>杏林地>杏林柠条间作地>杏林苜蓿间作地趋势。随土层深度增加,苜蓿地和荒草地土壤水分含量在 1 m 以下逐渐增大,其他 4 种类型的土壤水分含量在 0—5 m 逐渐减少而在 5—10 m 增加。

农地转变为其他利用方式后对深层土壤水分产生了影响。6 种利用方式下 5—10 m 土壤水分形成稳定差异,包含杏树的利用方式的土壤水分含量比农地少 30%左右,达到重度干燥化,转变为荒草和苜蓿地深层土壤水分差别不大。

塬区地形平坦,径流系数小,降水进入土壤后主要用于植物利用和入渗补给地下水。白草塬气候干旱,降水量少,本身提供的可用水资源量少,而土地利用变化导致的土壤水分亏缺将严重影响土壤水文过程。因此,白草塬土地利用变化的水文效应要较洛川塬和长武塬等更加严重,需要引起足够的重视。

[参 考 文 献]

[1] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.

[2] 王育红,蔡典雄,姚宇卿,等.保护性耕作对豫西黄土坡耕地降水产流、土壤水分入渗及分配的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):29-31.

[3] 李志,刘文兆,杨勤科,等.黄土高塬沟壑区小流域土地利用变化及其生态效应分析[J].应用生态学报,2007,18(6):1299-1304.

[4] Li Zhi, Liu WenZhao, Zheng FenLi. Land use change in Heihe catchment on loess tableland based on CA-Markov model.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1):346-352(7).

[5] Hiroshi Yasuda, Berndtsson, Osamu Hinokidani, et al. The impact of plant water uptake and recharge on groundwater level at a site in the Loess Plateau of China [J]. Hydrology Research, 2013,44(1):106-116.

[6] 黄明斌,杨新民,李玉山.黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究[J].中国生态农业学报,2003,11(3):113-116.

[7] 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.

[8] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.

[9] 王锐,刘文兆,李丽霞.土地利用类型对黄土塬区深层土壤含水量的影响:以长武塬区为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):127-132.

[10] 李玉山.旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J].土壤学报,2001,38(3):353-356.

[11] 朱显谟.试论黄土高原的生态环境与"土壤水库":重塑黄土地的理论论据[J].第四纪研究,2000,20(6):514-520.

[12] 王锐,孙权,李建设,等.不同灌溉方式对宁南黄土丘陵区设施辣椒生长发育及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):171-175.

[13] 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.

[14] Chen Liding, Wang Jiping, Wei Wei, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China [J]. Forest Ecology and Management. 2010,259(7):1291-1298.

[15] Wang Shuai, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013,101(3):122-128.

[16] 程立平,刘文兆.黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J].农业工程学报,2011,27(9):203-207.

[17] 李志,赵西宁.1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].自然资源学报,2013,28(2):287-299.

[18] 李玉山,黄明斌,杨新民.黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J].地理学报,2001,56(1):7-13.

[19] 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.

[20] Cheng Liping, Liu Wenzhao, Li Zhi, et al. Study of Soil Water Movement and Groundwater Recharge for the Loess Tableland Using Environmental Tracers[J]. Transactions of the ASABE, 2014,57(1):23-30.

[21] Liu Xiaoyan, Yang Shengtian, Dang Suzhen, et al. Response of sediment yield to vegetation restoration at a large spatial scale in the Loess Plateau[J]. Science China Technological Sciences, 2014,57(8):1482-1489.

[22] Gao Zhaoliang, Zhang Lu, Cheng Lei, et al. Groundwater storage trends in the Loess Plateau of China esti-

mated from streamflow records[J]. Journal of Hydrology,2015,530:281-290.
[23] 顾泮作.白银市林业发展的思考[J].甘肃林业科技,2000,25(3):61-64.
[24] 路民生.甘肃省退耕还林还草调查报告[J].甘肃农业,2002(9):14-15.
[25] 韩承鼎.甘肃省白银市水土保持可持续发展探讨[J].亚热带水土保持,2011,23(1):39-41.
[26] 王红霞,王雪松,王兵,等.甘肃省退耕还林工程生态效益评估[J].西北师范大学学报:自然科学版,2015(3):112-118.
[27] 路炳军,温美丽,路文学.黄土高原西部雨养农业区集雨水窖的主要类型及其效益分析:以甘肃会宁为例[J].干旱区资源与环境,2004,18(2):71-75.
[28] 高伟东.甘肃会宁硝沟剖面全新世孢粉分析及环境变化[D].甘肃 兰州:兰州大学,2007.
[29] 蒲金涌,冯建英,姚晓红,等.甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):205-209.
[30] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
[31] 王永东,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林带土壤水分动态研究[J].科学通报,2008(S2):91-97.
[32] 李玉山,韩仕峰,汪正华.黄土高原土壤水分性质及其分区[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集),1985(2):1-17.
[33] 张社红,李军,王学春,等.渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟[J].生态学报.2011,31(13):3767-3777.
[34] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2015,9(1):38-41.
[35] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J].农业工程学报,2006,22(12):65-71.
[36] 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J].林业科学,2005, 41(4):155-161.
[37] 李玉山.苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J].土壤学报,2002,39(3):404-411.
[38] 向伟,林雪青,张志强,等.黄土塬区土地利用变化对深剖面土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):12-17.
[39] 林雪青,向伟,李志,等.黄土塬区土地利用变化对硝态氮累积和淋溶的影响[J].环境科学研究,2015,28(12):1939-1946.
[40] Huang Tianming, Pang Zhonghe. Groundwater recharge and dynamics in Northern China: Implications for sustainable utilization of groundwater[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2013,7:369-372.
[41] 曹裕,居玛汗·卡斯木,范鹏,等.陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J].应用生态学报,2013,24(2):388-396.
[42] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China[J]. Pedosphere, 2015,25(4):546-554.
[43] 侯庆春,韩蕊莲,李宏平.关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究(Ⅰ):土壤水分状况及植被建设区划[J].水土保持研究,2000,7(2):102-110.
[44] 穆兴民,徐学选,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(2):210-217.
[45] 蒲金涌,姚小英,贾海源,等.甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J].土壤通报,2005,36(4):483-486.

(上接第31页)

[26] 冉大川,刘斌.双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J].人民黄河,1996(6):24-25.
[27] 林和平,刘丁慧,鲍乃源.灰色相关分析及其应用研究[J].吉林大学学报:信息科学版,2007,25(1):84-90.
[28] 赵阳,余新晓.黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J].北京林业大学学报,2013,35(3):39-45.
[29] 申希平,丁建生,李娟生,等.在SPSS中利用均数和标准差做两独立样本t检验[J].现代预防医学,2007,34(21):4066-4067.
[30] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J].水土保持通报,1983,2(4):7-13.
[31] 周佩华,豆葆璋,孙清芳,等.降雨能量的试验研究初报[J].水土保持通报,1981,1(1):51-61.
[32] 蔡进军,李生宝,蒋齐,等.宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J].水土保持通报,2010,30(1):22-26.