

DOI: 10.5846/stxb201303060356

高宇,樊军,彭小平,王力,米美霞.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究.生态学报,2014,34(23):7038-7046.

Gao Y, Fan J, Peng X P, Wang L, Mi M X. Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the water-wind erosion crisscross region. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 7038-7046.

水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗 和补充深度对比研究

高 宇,樊 军*,彭小平,王 力,米美霞

(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,杨凌 712100)

摘要:研究了黄土高原水蚀风蚀交错区六道沟小流域 8 种植被类型条件下植物消耗土壤水分深度与降水对应的补充深度。结果表明:裸地、农地、撂荒地、人工草(灌)地(苜蓿地、柠条地、沙打旺地)、当地典型草地(荒草地、长芒草地)在平水年及干旱年,土壤水分均表现为负平衡;丰水年部分样地土壤水分得到补充。平水年以及干旱年(2010—2011 年)植物耗水深度依次为:柠条地>撂荒地>沙打旺地>苜蓿地≈长芒草地≈荒草地>农地>裸地,降水补充深度为农地>裸地>撂荒地>荒草地>长芒草地>沙打旺地>苜蓿地>柠条地。丰水年(2012 年)裸地、苜蓿地、荒草地与沙打旺地土壤水分并未显示出明显负平衡过程,但柠条地耗水深度依然达到 260 cm,其它样地依次为撂荒地>农地>长芒草地;降水入渗深度排序:农地>裸地>撂荒地=柠条地>荒草地=苜蓿地>长芒草地>沙打旺地。水蚀风蚀交错区土壤蒸发(裸地蒸发)以及降水补充深度一般为 0—120 cm 范围内,丰水年土壤水分能得到恢复。农地的土壤水分消耗与补充深度略有增加。农地撂荒后耗水深度与撂荒地植被类型有密切联系,随植被盖度与丰度的增加,耗水有进一步加深的趋势,撂荒地土壤水分补充深度小于等于消耗深度。农地退耕还草所种植的深根性植被(苜蓿、沙打旺、柠条等)不仅会迅速消耗当季降水,同时会进一步消耗土壤深层储水,致使 120 cm 以下观测土层土壤含水量较低,造成土壤水分消耗深度较浅的假象。除撂荒地外,高生物产量的人工草(灌)耗水量高,耗水深度也深,因此在退耕还林(草)过程中,应该充分考虑不同植被类型的年度水分交换深度,采取措施降低消耗深度,增加入渗深度。

关键词:水蚀风蚀交错区;土壤含水量;消耗和补充深度

Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the water-wind erosion crisscross region

GAO Yu, FAN Jun*, PENG Xiaoping, WANG Li, MI Meixia

State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest Agriculture University, Yangling 712100, China

Abstract: Depths of soil water depleted by plants and of infiltration after precipitation under eight typical vegetation types were studied in the Liudaogou watershed, which is located in the water-wind erosion crisscross region. Results showed that soil moisture under land of bare, farmed, abandoned, planted with grasses or shrubs (*alfalfa*, *Caragana korshinskii* and *Astragalus adsurgens*), or typical of indigenous grasslands (wild grasses and *Sitpa bungeana*) was reduced in all cases during the normal (2010) and dry (2011) years; soil moisture in some plots increased during the wet year (2012). In the normal and dry years, depths of soil moisture depleted by plants were in the order: *C. korshinskii* > abandoned > *A. adsurgens* > alfalfa ≈ *S. bungeana* ≈ wild grass > crop > bare, while that of the depth of infiltration was crop > bare > abandoned > wild grass > *S. bungeana* > *A. adsurgens* > alfalfa > *C. korshinskii*. The depth of soil water depletion was always deeper than that of infiltration. In the year of high rainfall (2012), the water storage balance was positive in bare soil,

基金项目:中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13);国家自然科学基金(41271239)

收稿日期:2013-03-06; **网络出版日期:**2014-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

alfalfa, wild grass and *A. adsurgens*, but soil moisture under *C. korshinskii* was depleted between the soil surface and the 260 cm depth, and to a lesser extent under the other vegetation types in the order of abandoned > crop > *S. bungeana*; depths of soil water infiltration after precipitation were: crop > bare > abandoned = *C. korshinskii* > wild grass = alfalfa > *S. bungeana* > *A. adsurgens*. The depths of soil water depletion and infiltration occurred within the studied 0—120 cm layer, and soil water was replenished in the wet year. Soil water responses to vegetation-soil interactions under farmland were similar to its behavior in bare soil, but the depths of soil water depletion and infiltration were deeper. The depths of soil water depletion and infiltration under abandoned land were determined by the vegetation; the depth of soil water depletion tended to be deeper with increases in vegetation abundance but the soil water depletion depth was less than the infiltration depth. Not only the infiltrating rainwater but also the stored soil water had been consumed rapidly during the managed land conversion from farmland to grassland or shrubland. As a result, we might get a false impression that the depths of soil water depletion were shallower from our observations of the studied soil layers because of the lowered soil water content of the layers below 120 cm. Plots with planted grasses and shrubs, which had high biomasses, also had high evapotranspiration and deeper depths of soil water depletion. Consequently, we should fully consider the annual exchange depth of soil water during the management of land conversion from farmland to grassland or shrubland, and then take measures to reduce the depths of depletion of soil water and to increase infiltration.

Key Words: water-wind erosion crisscross region; soil water content; soil water depletion and infiltration depth

土壤水分是黄土区植被恢复的主要限制因子^[1-2],因此土壤水分状况与植被生长的相互作用研究一直深受重视^[3-4]。多年生人工植被大量消耗土壤水分,而降水的补给深度和补给量有限,结果在多年生人工林草地出现土壤旱化现象^[5]。20 世纪 80 年代以来,黄土高原地区人工林草地普遍出现土壤干层,已发现土壤干层深达 8—10 m,土壤水分补充深度常不及消耗深度是造成干层不断加深加剧的重要原因^[6-7]。土壤出现干层后,会导致植被生长减缓甚至衰退^[8-9]。在黄土高原南部,苜蓿(*Medicago sativa*)草地年蒸散量大于年降水量,根系吸水层达 10 m 以下,多年连续种植会导致土壤形成生物性下伏干层,从而对陆地水分循环路径发生影响^[10]。在黄土高原西部半干旱梁状丘陵区,柠条(*Caragana korshinskii*)地土壤水分最大入渗深度为 1.70—2.7 m,丰水年土壤补给量剧增,但柠条林依然生长不良,储存在土壤中的水分只能等到下一年才能被植物吸收利用^[11]。程积民等对黄土丘陵区半干旱区本氏针茅(*Sitpa bungeana*)天然草地研究后发现,该区域中层和上层土壤水分大量消耗,已形成明显的土壤水分亏缺层^[4]。在陕西北部的水蚀风蚀交错区,除去高耗水植被(紫花苜蓿)后,土壤水分交换深度发生显著改变,已形成的土壤干层在自然降水的作用下恢复趋势^[12]。因此,在黄土高原不同区域,由

于植物耗水量高于降水量导致植物消耗大量土壤储水而可能出现土壤水分负平衡现象,了解厚层黄土水分消耗与补给特征是深入认识这一现象的关键。

由于之前研究较多集中在黄土高原土壤干层分布、单一植被的土壤水分消耗与补偿年限上^[13-16],对小流域代表性植物的土壤水分消耗与补充深度对比、汇总研究的较少。土壤水分消耗与补充深度反映了当地植被生存的水分运行状况,间接体现了该区域植被与自然之间的协调性,是人工植被选择与生态功能评价的重要参考。本文利用定位观测数据对比研究小流域不同土地利用类型下植被的地上生物量及土壤水分消耗与补充深度的差异,为黄土高原水蚀风蚀交错地区的植被恢复提供理论依据。

1 实验与方法

1.1 研究区概况

试验观测在陕西省神木县六道沟小流域(东经 110° 21'—110° 23', 北纬 38° 46'—38° 51', 海拔 1094—1274 m)进行。该区域植被类型由森林草原向典型干旱草原过渡,也是黄土高原向毛乌素沙漠过渡的地带,是典型的生态脆弱区^[17]。2003—2012 年平均降水量为 402 mm,其中 5—9 月份的降水约占全年降水量的 80%左右。野外观测试验于 2010—2012 年进行,其中 2010 年度降水 433 mm 接近多年

平均值,具有较好的代表性;2011 年降水 324 mm,为典型的干旱年;而 2012 年度降水 550 mm 显著高于多年平均值,为丰水年(图 1),该区 11 月至次年 4 月气温多在 10℃ 以下,不适宜植物萌发生长,降水以雪为主,并占很小比例。

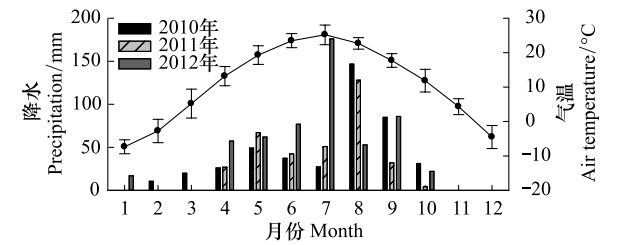


图 1 六道沟流域降水与气温月变化

Fig.1 Monthly distribution of precipitation & air temperature in Liudaogou watershed

该地区由于滥砍滥伐、过度放牧,加之严重的土壤侵蚀,天然植被破坏严重,取而代之的是近 20—30 年间建造的人工植被。人工植被主要的树(草)种有

紫花苜蓿、柠条、草木樨(*Melilotus mill*)等;天然植被中常见的建群种和优势种有长芒草(本氏针茅)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)等,草本植物在该地区生态环境中占有比较重要的地位^[18]。

1.2 试验设计

在前期对六道沟小流域主要土地利用类型实地调查的基础上,本研究共选择了 8 块样地,代表了当地比较典型的土地利用和管理方式。本研究选取的典型植被(土地利用方式)或是已经持续生长了十几年的天然、人工植被样地,或退耕还草(灌)不少于 7a 的样地(表 1)。在半干旱区,经过 7a 以上的植物生长,生态系统的水循环过程已基本稳定,各样地之间的土壤水分差异已经主要受其上生长的不同植被所影响^[19]。植被的生长与土壤水分的消耗和补充,受最初含水量的影响已经极为微弱,当季降水已成为其主要水源。

表 1 试验样地的基本信息

Table 1 Basic information of the investigation plots

项目 Items	年限/a Land usage term	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	主要植物 Vegetations
裸地 Bare land	7	0	少量野韭 <i>Allium ramosum</i>
农地 Farm land	23	68	谷子,绿豆,大豆 <i>Setaria italica</i> , <i>Vigna radiata</i> , <i>Glycine max</i>
苜蓿地 Alfalfa land	7	78	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>
柠条地 <i>Caragana korshinskii</i> land	7	72	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>
撂荒地 Abandoned land	7	91	长芒草,硬质早熟禾,茵陈蒿 <i>Sitpa bungeana</i> , <i>Poa sphondylodes</i> , <i>Artemisia capillaris</i>
荒草地 Wild grass land	20	77	赖草,阿尔泰狗娃花,茵陈蒿 <i>Leymus secalinus</i> , <i>Heteropappus altaicus</i> , <i>A. capillaries</i>
沙打旺地 <i>Astragalus adsurgens</i> land	7	74	沙打旺,紫花苜蓿 <i>Astragalus adsurgens</i> , <i>M. sativa</i>
长芒草 <i>Sitpa bungeana</i> land	23	82	长芒草,紫花苜蓿,达乌里胡枝子 <i>Sitpa bungeana</i> , <i>M. sativa</i> , <i>Lespedezadavurica davurica</i>

土地利用年限计算截止至 2012 年试验结束

表 2 研究小区土壤剖面物理性质

Table 2 Soil physical properties of the investigation plots

层次 Soil layer	粘粒/% Clay (<0.002 mm)	粉粒/% Silt (0.05—0.002 mm)	砂粒/% Sand(>0.05 mm)
0—30 cm	15.6	44.0	40.4
30 cm 以下 Under 30cm	16.8	47.6	35.6

每块样地面积均大于 200 m²,由于样地面积较大,具有一定的代表性。样地间海拔接近,最大间距

在 1000 m 以内(采用 GPS 测定)。试验小流域土壤均为侵蚀砂壤质新成土,物理性质差异不大;同时,

考虑到坡面径流可能影响到样地之间水分入参与消耗对比分析,本研究选取 8 个样地均为流域内无坡度平坦地面,植被盖度在田间进行照相后用 ImageJ 软件进行处理与计算。样地基本信息在表 1 和表 2 中详细列出。本试验于植物生长季节进行,2010 年 5 月初开始,至 2012 年 10 月中旬结束。

1.3 观测项目和方法

(1) 土壤水分测定

在所有地块中沿长轴中心线均匀埋设 3 根铝制中子仪测管,3 点的平均值作为该小区(处理)的水分含量值,每根中子管有效测定深度均不小于 260 cm。于生长季节每隔 2 个月,采用 CNC503B 型中子水分仪对每块样地的土壤水分进行观测,测量过程中,测深在 0—100 cm 土层时测量间距为 10 cm,100—260 cm 测量间距为 20 cm。

每层土壤含水量(质量含水量)在计算时,取其算术平均值。土壤储水量的计算采用如下公式:

$$W = h \cdot \rho \cdot \theta \cdot 10^{-1} \quad (1)$$

式中, W 为土壤储水量(mm), h 为土层厚度(cm), ρ 为土壤容量(g/cm^3), θ 为土壤含水量(质量含水量,%)。

对土壤储水量消耗(Soil water depletion)/补充(Soil water infiltration)量进行计算时,采用公式:

$$W_D = W_{\text{mid}} - W_{\text{start}} \quad (2)$$

$$W_I = W_{\text{end}} - W_{\text{start}} \quad (3)$$

式中, W_D 为土壤储水量消耗量(mm), W_I 为土壤储水量补充量(mm), W_{start} 为季初土壤储水量(mm), W_{mid} 为生长季蒸散旺盛期土壤储水量(mm), W_{end} 为季末土壤储水量(mm)。

(2) 土壤水分消耗深度与补充深度确定方法

土壤水分消耗深度是指在特定的土地利用方式下,当年植物消耗土壤水分的剖面深度,确定方法是根据季初和系统蒸散旺季土壤剖面水分分布曲线,选取水分含量降低幅度最大的曲线和季初比较,两条曲线交叉点即是消耗深度,如果两条曲线无交叉点,说明消耗深度超过了测定的土层深度。土壤水分的补充深度是指在特定的土地利用方式下,当年降水所能入渗到的深度,确定方法是根据系统蒸散旺季和雨季土壤剖面水分分布曲线,选取水分含量增加最大的曲线和消耗曲线比较,两条曲线交叉点即为补充深度。

(3) 地上生物量

于 8 月中旬(本区地上生物量达到极大值),在样地中(除农地、苜蓿地、柠条地外)选择生长均匀、能代表该小区植被平均生长情况的 3 个 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 样方,割取植物地上部分。之后立即称量鲜草重,将植物样品于 80°C 烘干至恒重,称取植物样干重。3 个样区生物量的平均值作为该小区(处理)的地上生物量。

与此同时,对苜蓿进行整块地刈割,全部称重,之后抽取 3 份植物样烘干;柠条作为多年生灌木,其地上生物量测定采用平均法:于 8 月中旬在柠条林中随机选取 $5.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ 的 3 个标准地块,在标准地内对每株柠条均进行调查,调查的因子有:丛高、冠幅、基径、分枝数等,并取其平均值,每个地块选取 6 丛标准丛,每丛剪取 3 枝标准枝,测定标准枝的鲜生物量以及烘干后的干生物量,进而计算柠条的单位面积生物量。

农地仅在收获后,将籽粒自然风干,统计籽粒生物量,计算单位面积产量。

2 结果分析与讨论

2.1 植物生长季 0—260 cm 土层储水量

从 5 月到 9 月份的植物生长季节,不同植被条件下的土壤水分垂直分布差异明显(图 2)。5 月—7 月是该地区典型的土壤-植被系统蒸散旺季,8—9 月体现为降水对土壤水分的补充,但由于多年降水的季节性波动,年度土壤水分的消耗与补充周期也略有不同。因此,本文选择能体现土壤水分年度消耗与补充深度的 2010 年 5、7、9 月,2011 年 5、8、9 月,2012 年 5、7、9 月数据进行分析。

多年土壤平均含水量(质量含水量)较高的样地包括:裸地、农地和撂荒地,剖面平均含水量均在 13% 左右,由表层到深层土壤含水量呈现增加趋势。苜蓿地、柠条地、荒草地、沙打旺地和长芒草地土壤平均含水量相对较低,仅有 5%—7%。

0—260 cm 土层总储水量维持在较高水平的样地排序为裸地 $\approx$ 农地 $>$ 撂荒地,农地土壤储水与裸地相差不大的主要原因是在季初对农地的翻耕以及生长季的中耕松土,一方面切断了毛管孔隙,另一方面促进了降水入渗,二者共同作用降低了土壤蒸发速率,减少了水分损失。但干旱年对土壤表层的扰动

会大大增加土壤储水的损失程度(表3)。储水量低于400 mm 的土地利用类型依次为柠条地>苜蓿地>长芒草地>荒草地>沙打旺地。

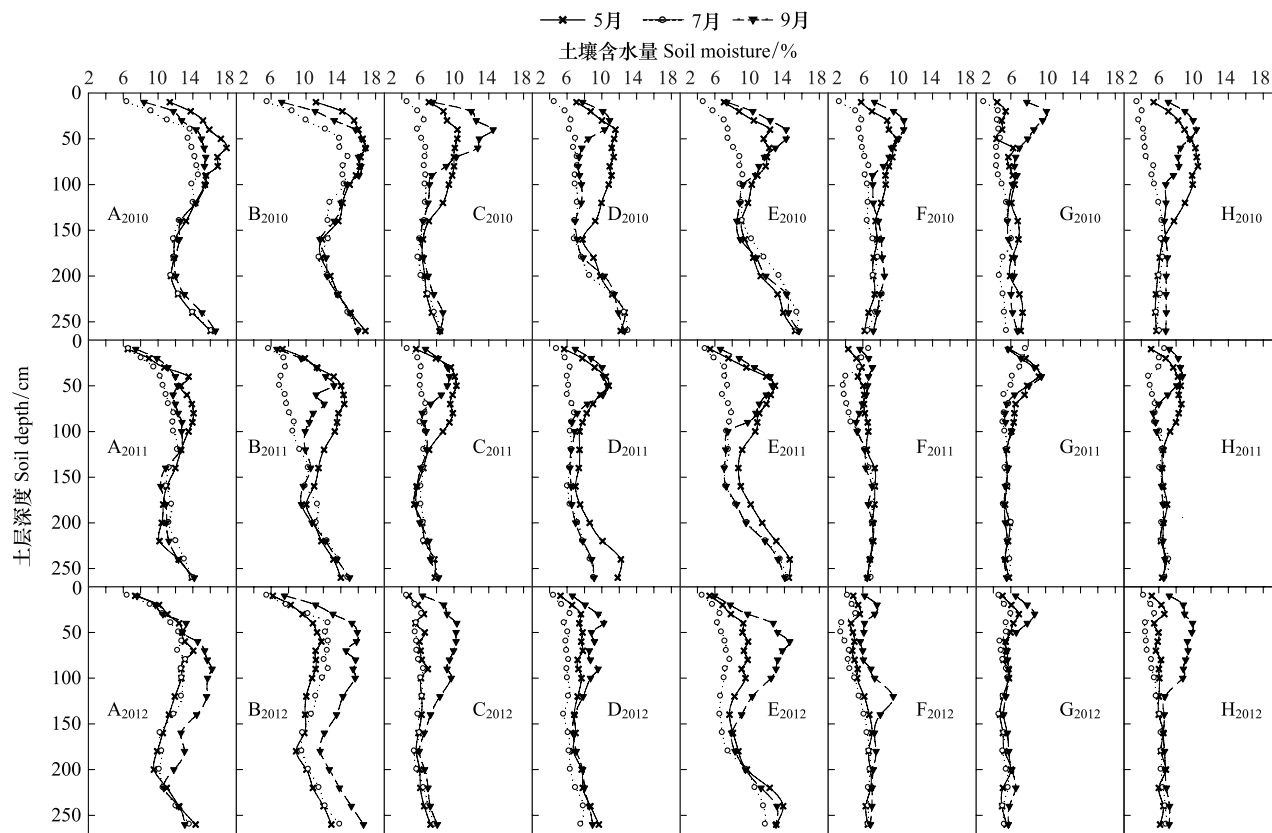


图2 不同土地利用类型土壤剖面水分分布动态

Fig.2 Soil water content in soil profiles under different land use types

A:裸地 Bare land; B:农地 Farm land; C:苜蓿地 Alfalfa land; D:柠条地 *C. Korshinkii* land; E:撂荒地 Abandoned land; F:荒草地 Wild grass land; G: 沙打旺地 *A. adsurgens* land; H:长芒草地 *S. bungeana* land

表3 不同植被措施下0—260 cm 土层储水量年度变化

Table 3 Annual change of soil water storage under different land use types at 0—260 cm soil layers

项目 Items	2010 土壤季初/季末储水量, 储水量消耗/补充程度 W_{start}/W_{end} , W_D/W_I in 2011/mm	2011 土壤季初/季末储水量, 储水量消耗/补充程度 W_{start}/W_{end} , W_D/W_I in 2011/mm	2012 土壤季初/季末储水量, 储水量消耗/补充程度 W_{start}/W_{end} , W_D/W_I in 2012/mm
裸地 Bare land	558.4/550.2, -41.3/-8.3	480.0/471.7, -20.6/-8.3	468.3/518.8, -5.9/50.5
农地 Farm land	568.9/560.7, -44.8/-8.2	490.8/456.7, -72.8/-34.1	424.7/558.9, 25.6/134.3
苜蓿地 Alfalfa land	323.7/338.5, -54.2/14.8	302.5/285.4, -36.7/-17.1	250.1/318.6, -2.1/68.5
柠条地 <i>C. Korshinkii</i> land	416.0/370.0, -75.2/-45.9	362.6/313.8, -82.6/-48.8	305.6/327.5, -49.9/21.9
撂荒地 Abandoned land	442.8/467.0, -12.7/24.2	442.8/408.4, -78.7/-34.4	387.3/437.1, -55.4/49.8
荒草地 Wild grass land	298.1/324.7, -35.9/26.6	259.3/256.8, -14.8/-2.5	223.6/264.6, -15.0/40.9
沙打旺地 <i>A. adsurgens</i> land	248.1/267.3, -44.6/19.2	246.5/234.3, -21.4/-12.2	200.7/224.3, -7.3/23.6
长芒草 <i>S. bungeana</i> land	293.3/299.2, -71.7/5.8	274.9/264.4, -42.3/-10.5	233.1/282.7, -18.9/49.6

2.2 不同土地利用方式下土壤水分消耗与补给深度

2.2.1 裸地土壤水分消耗与补充深度

不同的土地利用方式将显著的影响土壤水分消耗和补给过程^[20]。裸地土壤水分只受土壤蒸发与

降水的影响,平水年以及偏干旱年土壤水分消耗深度达到120 cm,8—9月,裸地0—120 cm 水分得到了部分补充,但土壤深层储水量并未显著提高,裸地土壤储水量在2010—2011 试验期呈现了轻微的负增

长(图 2:A_{2010—2011})。由于 2012 年度降水充沛,裸地储水未出现明显的消耗,0—220 cm 土层土壤水分得到了补充(图 2:A₂₀₁₂)。证明在完全依靠天然降雨条件下,裸地蒸发量极有可能大于同期降雨量,导致土壤水分循环负平衡。陈洪松等研究结论类似,认为在偏干旱年,土壤储水量出现负补偿的深度范围更大,能达到 0—300 cm 深度土层^[21]。王力等也认为,这种“低降水高蒸发”造成的耗水量大于补充量是黄土高原区普遍现象,这种亏缺不是生物利用引起的,而是黄土高原的土壤条件和气象因素共同决定的^[22]。

2.2.2 农地与农地撂荒土壤水分消耗与补充深度

不同植被覆盖的样地除了受到土壤蒸发与降水影响以外,主要受植物根系吸水的影响。但农地土壤含水量与剖面水分分布在季末时多与裸地相同(图 2:B_{2010—2012}),农地水分消耗深度比撂荒地浅(图 2:E_{2010—2012}),可能与农地作物产量(农地绿豆、大豆多年平均生物产量仅有 41 g/m²)和农地种植初期翻耕有关。翻耕有助于降水的及时入渗,减少蒸发损失,且由于农地种植密度低,管理粗放,农地植被密度与生物产量小于撂荒地,因此,农地撂荒不能增加降水入渗深度,但也不会造成土壤干层加剧。

农地撂荒后耗水深度与撂荒地植被类型有密切联系^[23],虽然农地撂荒后土壤水分的恢复不明显,但较农地弃耕种植其他深根性、高耗水的人工草地,撂荒在获得较高生物产量的同时(干生物量达到 305—448 g/m²,不低于苜蓿地、柠条地、沙打旺地(图 3)),对黄土高原水蚀风蚀交错区土壤水分恢复具有一定的积极意义。

2.2.3 退耕还草对土壤水分消耗与补充深度的影响

高耗水深度和高耗水量样地也具有较高的生物产量(图 2:C_{2010—2012}、D_{2010—2012}、G_{2010—2012},图 3)。5 月—7 月下旬是苜蓿、柠条与沙打旺这类深根性植物耗水的高峰期。7、8 月这 3 块样地全土层土壤含水量均较低,基本在 6% 左右,其中干燥化程度最严重的是沙打旺样地,含水量 4%—6%,平均储水量仅有 236 mm,但其年耗水深度较浅,可能是沙打旺地 120—260 cm 土壤含水量已接近萎蔫含水量,土壤剖面已无有效水分可被利用。因此,沙打旺地 3a 地上生物量波动(186—436 g/m²)较苜蓿地(328—395 g/m²)受降水影响最为强烈。

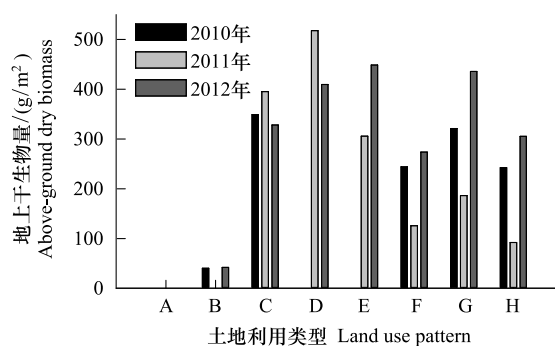


图 3 2010—2012 年度不同土地利用类型地上干生物量

Fig.3 Above-ground dry biomass under different land use patterns in 2010—2012

A: 裸地 Bare land, B: 农地 Farm land, C: 苜蓿地 Alfalfa land, D: 柠条地 *C. Korshinkii* land, E: 撂荒地 Abandoned land, F: 荒草地 Wild grass land, G: 沙打旺地 *A. adsurgens* land, H: 长芒草地 *S. bungeana* land

在平水年与干旱年生长季末,3 块样地土壤水分补充深度均在 70—90 cm(图 2:C_{2010—2011},D_{2010—2011},G_{2010—2011})。丰水年,三类样地补充深度柠条地>苜蓿地>沙打旺地,但柠条地土壤储水量增加量最少,说明相同生长年限的柠条林地耗水速率虽不及苜蓿地、沙打旺地,但随着生长年限的增加,柠条植株叶面积加大,耗水速率加速上升,且降水对柠条地土壤储水的补充能力不及苜蓿地和沙打旺地,柠条林地最终也将形成土壤干层。

李玉山研究认为苜蓿从开始种植到种植后 13a 土壤湿度逐年降低。本文的研究也表明在土壤湿度降低的过程中消耗深度也在逐渐加深,苜蓿根系直接吸水土层可以超过 10 m 深度^[10]。李裕元等研究得出,黄土高原北部紫花苜蓿草地地上生物量普遍偏低,生长盛期持续时间较为短暂,最多不超过 6a^[24]。本研究苜蓿地平均地上干生物量与王建国等在 2009 年对该区域研究^[25]相比,在其生长 6a 后并未明显的降低,可能是紫花苜蓿在本区只能在低生产力水平上波动。

杨永辉等研究认为随着植物(柠条)利用土壤水分的深度增加,土层含水量下降,土壤入渗能力提高^[26],本试验结果与其不尽相同:丰水年度,土壤储水量较低的样地,入渗深度不及水分条件较好的裸地、撂荒地,与农地差距更加明显。与米脂地区陡坡柠条林地的最大入渗深度(120 cm)相比^[27],黄土高原水蚀风蚀交错区柠条对土壤水分消耗深度下移了 40—60 cm,补充深度并未出现明显的加深。在相似

的条件下,当地柠条产量低于苜蓿,相同土层厚度的耗水量高于苜蓿,单从生物产量来讲,当地种植苜蓿能获得更好的经济效益。

梁一民等研究认为,5年生沙打旺草地4.5 m处含水量已降到4%,5 m处水分已被利用^[28]。程积民等对黄土高原西部丘陵沟壑区种植的沙打旺研究后得出,沙打旺在该区生长年限为6—7a,生物量形成的高峰期在第3—4年,之后土壤水分大量亏缺,生物量逐年下降。6年生沙打旺的根系分布深度可达7.6 m以上,土壤水分的消耗深度与根系的分布相一致^[16, 29],结合本文研究结果可见沙打旺耗水量大,可迅速耗竭土壤水分。

2.2.4 本土自然演替植被(长芒草地、荒草地)土壤水分消耗与补充深度

在平水年与干旱年度,长芒草地与苜蓿地土壤水分消耗深度一致,在120—160 cm左右,补充深度稍浅;在丰水年,土壤水分补充深度仅有120 cm,不及苜蓿地,且在160 cm土层以下,土壤含水量变化已经不明显,基本保持在6.0%左右(图2: $H_{2010-2012}$)。本区长芒草地多由人工苜蓿地退化演替而来,前期苜蓿生长耗竭了土壤水分,加之苜蓿根系对土壤产生的挤压,地表出现板结现象,如果没有人工干预,土壤深层干燥化现象将在一段时期内存在。荒草地水分交换深度与长芒草地水分交换深度接近(图2: $F_{2010-2012}$),地上生物量(126—274 g/m²)也与长芒草地(92—305 g/m²)接近。

有研究指出本土植被与人工种植的深根性植物相比,更有利于土壤水分的补给^[30],但本区典型的

长芒草地与荒草地却并未体现出这一现象。本区长芒草与其他地区相比,耗水深度较深。以往对长芒草的研究表明,0—60 cm土层为长芒草主要耗水范围^[4, 31],但本试验与上述结论不相符,说明随着年降水量的进一步减少,长芒草根系主要耗水深度由常规的20—50 cm不断加深,并造成土壤水分亏缺。长芒草-退化苜蓿地在自然演替状态下土壤紧实度增加,孔隙度减小,不利于土壤水分的恢复,在黄土高原水蚀风蚀交错区苜蓿地退化20—30a后,土壤储水仍得不到有效的补充。王美艳等研究认为,苜蓿生长一定年限后需要及时翻耕,实行粮草轮作,才能增加降水就地入渗、缓解土壤干燥化强度、恢复干层的土壤水分^[32]。陕北黄土丘陵沟壑区的安塞县境内不同生长年限的长芒草群落地上生物量多年平均值为119.5 g/m²^[33],可见长芒草生物量一般较低。本试验小流域长芒草地和荒草地土壤侵蚀并不严重,如果不加以改造利用,可能会降低干生物量的积累且不利于土壤水分的恢复。

综上所述,除裸地、每年翻耕的农地、丰水年的撂荒地和长芒草地,试验年度其他各样地的最大入渗深度均未超过消耗深度,平水年和偏干旱年度生长季,所有样地水分均出现了负增长。

2.3 土壤水分消耗与补充特征分类

结合以上水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度分析(表4),将研究结果进一步归纳为3种植被-土壤水分作用深度类型,其对黄土高原水蚀风蚀交错区不同土地利用类型的植被配置与管理具有更明确的指导意义。

表4 不同植被措施下耗水深度与补充深度比较

Table 4 Comparison of soil water consumption and compensation depths under different land use types

项目 Items	2010 消耗/补充深度/cm Depletion/ infiltration depth	2011 消耗/补充深度/cm Depletion/ infiltration depth	2012 消耗/补充深度/cm Depletion/ infiltration depth
裸地 Bare land	120/120	120/120	—/220
农地 Farm land	140/140	140/140	140/260
苜蓿地 Alfalfa land	160/90	120/70	—/160
柠条地 <i>C. Korshinkii</i> land	160/70	260/70	260/180
撂荒地 Abandoned land	140/100	260/100	180/180
荒草地 Wild grass land	160/90	160/90	—/160
沙打旺地 <i>A. adsurgens</i> land	260/120	120/70	—/60
长芒草 <i>S. bungeana</i> land	160/140	120/70	120/120

—: 无显著消耗深度

类型(I): 裸地、农田、撂荒地土壤水分平衡是

在较高的土壤含水量水平(观测土层土壤平均含水

量 $\geq 10\%$),丰水年三类样地土壤储水能得到一定的补充,其中撂荒地可能会向类型(Ⅱ)发展(向荒草地靠近)。

类型(Ⅱ):土壤水分出现亏缺的是苜蓿、柠条、荒草地,土壤储水量逐渐减少,丰水年也不能完全补充恢复($5\% < \text{观测土层土壤平均含水量} < 10\%$),如果继续发展,苜蓿、柠条可能会变成类型(Ⅲ)的情况;而荒草年限较长,土壤水分消耗和补充深度可能会较长时间内维持现状。

类型(Ⅲ):在低土壤含水量下(观测土层土壤平均含水量 $\leq 5\%$)消耗与补充基本平衡的是沙打旺地、长芒草地,两类样地土壤储水没有降低或降低很少,是由于沙打旺生物量大,耗水多、长芒草属于苜蓿草地退化演替的终极阶段且生长年限长,因而两类样地长期在低土壤含水量水平下平衡。

3 结论与建议

3.1 主要结论

(1)裸地平水年与干旱年土壤水分消耗和补充深度均为 120 cm,可见水蚀风蚀交错区土壤蒸发以及降水补充深度一般为 0—120 cm 范围内,丰水年土壤水分能得到恢复。农地植被-土壤作用模式与裸地类似,土壤水分消耗与补充深度略有增加。

(2)农地撂荒后耗水深度与撂荒地植被类型有密切联系,随植被丰度的增加,耗水有进一步加深的趋势,撂荒地土壤水分补充深度小于等于消耗深度。农地退耕还草所种植的深根性植被(苜蓿、沙打旺、柠条等)不仅会迅速消耗当季降水,同时会进一步消耗土壤深层储水,120 cm 以下观测土层土壤含水量较低,从而造成土壤水分消耗深度较浅的假象。

3.2 相关建议

按照植物耗水和降水补充深度的类型,在退耕还林(草)过程中,应该充分考虑不同植被类型的年度水分交换深度,尤其在采用类型(Ⅱ)和类型(Ⅲ)向类型(Ⅲ)转变的土地利用方式时,要予以谨慎考虑,并随时监测土壤水分消耗情况,采取措施降低消耗深度,增加入渗深度,防止或减缓黄土高原水蚀风蚀交错区土壤干层的发生或加剧。

References:

[1] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.

[2] Liu Z Q, Zhu Q K, Qin W, Zhao Y, Kuang G M, Wang J. Soil water consumption and supply of typical forest lands in the Semiarid Loess Region. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(3): 36-40.

[3] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427-432.

[4] Cheng J M, Wan H E, Wang J, Yong S P. Soil water regulation of the natural grassland of Semi-Arid Loess hilly region. *Acta Agrestis Sinica*, 2003, 11(4): 296-300.

[5] Guo Z S. Using depth of soil water and water consumption by littleleaf peashrub in the semiarid area of loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 69-72.

[6] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433-438.

[7] Mu X M, Xu X X, Wang W L, Wen Z M, Du F. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 210-217.

[8] Jin T T, Fu B J, Liu G H, Wang Z. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China. *Hydrology Earth System Sciences*, 2011, 15: 2519-2530.

[9] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.

[10] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 404-411.

[11] Guo Z S, Shao M A. Dynamics of soil water supply and consumption in artificial *Caragana Shrub* land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 119-123.

[12] Fan J, Shao M A, Wang Q J. Soil water restoration of alfalfa land in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau. *Acta Agrestis Sinica*, 2006, 14(3): 261-264.

[13] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4): 242-251.

[14] Li W, Hao M D, Wang X C. Depletion and restoration of soil water in different cultivating systems in Gully Region of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 99-105.

[15] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, Han Y F. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 77-83.

[16] Cheng J M, Wan H E, Wang J, Yong S P. Over depletion and recovery of soil moisture on *Astragalus adsurgens* grasslands in the Loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2979-2981.

[17] Yu G R, Xie G D, Wang Q F, Niu D. Considerations to some issues on vegetation rehabilitation in western China. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 216-220.

[18] Tang K L, Hou Q C, Wang B K, Zhang P C. The environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and shenmu experimental area on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 1993, 18(2): 1-15.

[19] Fan J, Shao M A, Wang Q J, Jones S B, Reichardt K, Cheng X R, Fu X L. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 93-100.

- [20] 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 are-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2013, 101: 122-128.
- [21] Chen H S, Shao M A, Wang K L. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1853-1857.
- [22] Wang L, Shao M A, Wang Q J, Jia Z K, Li J. Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 27-31.
- [23] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, Ouyang Z, Li Z, Wang J, Wang R, Gao C Q. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [24] Li Y Y, Shao M A, Shangguan Z P, Fan J, Wang L M. Study on the degrading process and vegetation succession of *Medicago sativa* grassland in North Loess Plateau, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(2): 85-92.
- [25] Wang J G, Fan J, Wang Q J, Wang L. Vegetation above-ground biomass and its affecting factors in water/wind erosion crisscross region on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 556-564.
- [26] Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, Liu H. Soil infiltration capacity under different vegetations in southern Ningxia loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1040-1045.
- [27] Zhang Z X, Wang Y P. Rain transformation and soil water carrying capacity of *Caragana Microphylla* forest in steep slope on Loess Region in Northern Shaanxi Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(5): 80-85.
- [28] Liang Y M, Li D Q, Cong X H. Study on the characteristics of soil water and productivity of *Astragalus adsurgens* in Wuqi. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 10(6): 113-119.
- [29] February E C, Higgins S I. The distribution of tree and grass roots in savannas in relation to soil nitrogen and water. *South African Journal of Botany*, 2010, 76(3): 517-523.
- [30] Yang L, Wei W, Chen L D, Mo B R. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [31] Han F P, Dong L N, Luo W L, Zhang X C. Effects of *Stipa bungeana* on soil water contents and nutrients of sloping lands in Loess Plateau of China. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(4): 403-407.
- [32] Wang M Y, Li J, Sun J, Wang X J, Fang X Y, Ren J J. Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4526-4534.
- [33] Zhang T, Chen Y M, Wu C H. Change of underground biomass and soil fertility with restoration stages of *Artemisia gmelinii* and *Stipa bungeana* in Loess Hilly Region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 91-97.
- 参考文献:
- [2] 刘中奇, 朱清科, 秦伟, 赵荟, 邝高明, 王晶. 半干旱黄土区典型林地土壤水分消耗与补给动态研究. *灌溉排水学报*, 2010, 29(3): 36-40.
- [3] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427-432.
- [4] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究. *草地学报*, 2003, 11(4): 296-300.
- [5] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 69-72.
- [6] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433-438.
- [7] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 温仲明, 杜峰. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. *土壤学报*, 2003, 40(2): 210-217.
- [10] 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.
- [11] 郭忠升, 邵明安. 人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 119-123.
- [12] 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.
- [14] 李巍, 郝明德, 王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 99-105.
- [15] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 韩艳锋. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 77-83.
- [16] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复. *生态学报*, 2004, 24(12): 2979-2981.
- [17] 于贵瑞, 谢高地, 王秋凤, 牛栋. 西部地区植被恢复重建中几个问题的思考. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 216-220.
- [18] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 张平仓. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1993, 18(2): 1-15.
- [21] 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.
- [22] 王力, 邵明安, 王全九, 贾志宽, 李军. 黄土区土壤干化研究进展. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 27-31.
- [24] 李裕元, 邵明安, 上官周平, 樊军, 王丽梅. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究. *草业学报*, 2006, 15(2): 85-92.
- [25] 王建国, 樊军, 王全九, 王力. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被地上生物量及其影响因素. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 556-564.
- [26] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 刘汗. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1040-1045.
- [27] 张占雄, 王延平. 陕北黄土区陡坡柠条林地雨水转化及土壤水分承载力. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 80-85.
- [28] 梁一民, 李代琼, 从心海. 吴旗沙打旺草地土壤水分及生产力特征的研究. *水土保持通报*, 1999, 10(6): 113-119.
- [31] 韩凤朋, 董丽娜, 罗文林, 张兴昌. 黄土高原侵蚀区长芒草对坡地土壤水分养分的影响. *草地学报*, 2008, 16(4): 403-407.
- [32] 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.
- [33] 张婷, 陈云明, 武春华. 黄土丘陵区铁杆蒿群落和长芒草群落地上生物量及土壤养分效应. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 91-97.