

# 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究

王志强, 刘宝元, 路炳军

(北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875 )

**摘要:**黄土高原土壤干层是一个重要的生态环境问题, 研究干层土壤水分的恢复对正确指导黄土高原退耕还林还草, 实现该区土地的可持续利用具有重要意义。研究在黄土高原半干旱区的固原县, 选择了将紫花苜蓿翻耕后 3a、12a 的坡耕地, 对其土壤干层的水分恢复状况进行了分析。发现二者土壤干层水分最大恢复深度分别为 3m、4.8m, 但土壤水分含量在中效水及其之上的主要恢复层深度分别为 2m、2.2m。苜蓿翻耕 3a 和 12a 后 2m 以上土层土壤平均湿度都能恢复到易效水或极易效水的水平, 可以满足 1 年生农作物的生长需求而不会进一步恶化土壤水分生态环境。但即使苜蓿翻耕 12a 后土壤水分, 也不能满足林木和多年生豆科牧草正常生长的水分需求。

**关键词:**黄土高原; 半干旱区; 土壤干层; 紫花苜蓿; 土壤水分

## A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau

WANG Zhi-Qiang, LIU Bao-Yuan, LU Bing-Jun (1. Department of Resources and Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1944~1950.

**Abstract:** A dry soil layer is defined as any layer within the soil profile that maintains a persistent low water content, which generally results from negative evapo-transpiration equilibrium. Nearly all soils under perennial leguminous crops and re-vegetated forests on Loess Plateau contain dry soil layers, which constitutes a serious obstacle to the sustainable land-use of Loess Plateau of China. The formation, properties and distribution of dry soil layers in the Loess Plateau has been extensively studied, but little research has been conducted regarding soil water restoration in dry soil layers once the plants which have caused the dry soil layer are die or turn to annual crops.

The purpose of this study was to examine soil water restoration at 2 sites where the land use was changed from alfalfa to annual-crops for 3, and 12 years. The soil water of one site on which alfalfa had been growing for 11 years and one farmland site (row-crop) were also tested as controls. All the sites are on a slope gradient of approximately 12.5 degrees. The soil water was measured in the soil profiles to depth of 9.9 m. Soil water samples were tested at intervals of 0.1 m to a depth of 1 m, 0.2 m from 1 to 3 m, and 0.3 m at 3 and deeper. The soil samples were extracted using a subsoil probe and oven dried for

**基金项目:**国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018605);教育部高等学校骨干教师资助计划资助项目  
**收稿日期:**2002-11-12; **修订日期:**2003-05-15  
**作者简介:**王志强(1968~), 宁夏西吉人, 博士生, 主要从事植被与土壤水分生态研究。E-mail: zh. q. wang@163. net  
**Foundation item:** National Key Basic Research Special Foundation Project (No. G2000018605); Supporting Programs for Key Teachers from State Education Ministry  
**Received date:** 2002-11-12; **Accepted date:** 2003-05-15  
**Biography:** WANG Zhi-Qiang, Ph. D. candidate, research field is in ecology such as relationships between vegetation and soil moisture. E-mail: zh. q. wang @ 163. net

testing soil moisture contents. Results were reported in percent gravimetric soil water content ( $\theta_g$ ). The study area was located at the northwestern hilly part of the Loess Plateau with an annual precipitation of 433.8mm. Because of the thickness of the loess deposits of the study area, there was no relationship between soil water and groundwater. Thus, the soil water restoration of the dry soil layer was totally dependent on rainfall.

The results show that the maximum water restoration depths of the 3 years and 12 years farmland after alfalfa were 3m, 4.8m. But the main restoration depths (within which the soil content was equal or exceeds the medium available water content to plants)of the 3 years, 12 years farmland after alfalfa were 2.0m and 2.2m with average soil moisture of 13.7% and 12.5%, much higher than the soil moisture of the corresponding layers of 11-year alfalfa (9.6% and 9.2%), but close to the soil moisture of corresponding layers of continuous farmland (15.3% and 14.7%). From the view of the availability of soil water content to plants, the soil moistures of main restoration layers of both 3 years and 12 years farmland after alfalfa were reached easily available water content or the easiest available water content. Because much previous study has verified that the main water consumption layer by annual crops is within 2m but that by forest and artificial perennial leguminous plants exceed 8m in the area, the water contents of the 3 years and 12 years farmland after alfalfa can meet the needs for growing annual-crops without further deteriorating soil water ecosystems, but it can't meet the needs of planting trees or perennial leguminous plants for their normal growth even after 12 years of transferring from perennial alfalfa to annual crops.

**Key words:** Loess Plateau; semi-arid area; dry soil layer; alfalfa; soil moisture

文章编号:1000-0933(2003)09-1944-07 中图分类号:S715.3 文献标识码:A

土壤干层是“位于降水渗透以下,因植物蒸散导致土壤水分负平衡,形成长期存在的干燥化土层<sup>[1]</sup>”。自 20 世纪 80 年代以来,众多学者对黄土高原土壤干层的特征、成因及其分布等一系列问题进行了研究<sup>[2~7]</sup>,几乎所有的人工乔、灌林和紫花苜蓿等多年生豆科牧草都能使土壤形成干燥化土层<sup>[8]</sup>,乡土天然林地也存在干层,但其干燥程度低于人工林<sup>[9~11]</sup>。土壤干层的形成,恶化了土壤水分生态环境,不仅对现存植被的生长极为不利<sup>[12,13]</sup>,而且也在很大程度上影响后续植被的选择和生存<sup>[14]</sup>。正因如此,研究土壤干层的水分恢复问题,不仅在生态学上具有重要的理论意义,而且对黄土高原的生产和生态环境建设有指导意义。当造成干层的植被没有衰退或没有被人工强行摧毁时,当年降雨只能下渗到很有限的深度,土壤干层不会消失。但当植被自然衰退或人为摧毁后,已经形成干层的土壤水分能否恢复,恢复的速度如何?截止目前,对这个问题的研究还很薄弱。梁一民等<sup>[15]</sup>对处于半干旱区的陕北吴旗人工沙打旺衰败后在生长天然草类植被情况下的土壤水分进行了研究,5a 内(1984~1988 年)3m 土层内的水分得到补偿,其中 2m 以内得到较好补偿。刘向东等<sup>[16]</sup>对半湿润区宜川县 25 龄油松人工林砍伐迹自 1988~1990 年的土壤水分研究表明,2.8m 以内,土壤水分恢复力强,土壤湿度恢复到稳定湿度至田间持水量水平,2.8~4.2m 之间,恢复力也较强,恢复到稳定湿度以上,4.2~5.0m 之间,水分恢复弱,3a 只增加 1.9%~3.0%。另外,李细元,陈国良<sup>[17]</sup>利用系统生态原理和计算机仿真手段,假设在年降雨量为 430~525mm 情况下,7a 生沙打旺草地翻耕休闲后,预测 3m 土层平均土壤水分恢复到 13.8%需要 7a,5m 土层平均含水量恢复到 17.9%需要 15a。这些研究对了解黄土高原土壤干层的水分恢复十分有益。但总的来说,对黄土高原土壤干层水分恢复的研究还较少,对不同气候区和不同立地条件下土壤干层恢复的速度和程度及其与土地利用的关系缺乏系统的研究。因此,土壤干层水分的恢复问题还需众多科学工作者参与做大量的研究工作。本研究选择黄土高原半干旱区固原县紫花苜蓿翻耕后,继续种植 1 年生农作物的农地为研究对象,探讨干层土壤水分的恢复状况,以期增加一份对该问题的了解。

1 研究区概况和数据方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原县东北部官厅乡的大泉村,样点区地理坐标为北纬 36°14′,东经 106°21′,平均海拔高度 1970m。研究区所在的固原县气候属中温带半干旱气候,年均温 5℃,7 月份均温 23.5℃,1 月份均温 -14℃,≥10℃ 积温 2370~2882℃,无霜期 137d。年平均降雨量 433.8mm(1970~2001 年)。地带性植被主要为以长芒草(*Stipa bungeana*)为优势种的暖温型典型草原<sup>[18]</sup>。

1.2 研究方法

在同一向南山坡上选择了紫花苜蓿被翻耕后 3a 和翻耕后 12a 的农地、一个已经生长了 11a 且还在正常生长的紫花苜蓿地和持续种植农作物的农地,测定其土壤水分,用以分析干层的水分恢复状况。翻耕后的苜蓿土地种植正常轮作(小麦-豆类或玉米-谷类或土豆)的 1 年生农作物。各观测点的基本情况见表 1。各观测点紫花苜蓿生长和翻耕后农作物种植所对应的年代如图 1 所示。测水土样用土钻取土,用烘干法测定含水量,单位用重量含水率表示。土壤水分测定深为 9.9m。观测间距,1m 之内为 0.1m,1~3m 之间为 0.2m,3m 以下为 0.3m。土壤水分测定时间为 2002 年 6 月 17 日~18 日。

表 1 观测点基本情况  
Table 1 The conditions of sample sites

处理 Treatments	翻耕前苜蓿生长年限 Years growthed before transferring from alfalfa to crop	地貌部位 Topographical position	坡向 Aspect	坡度 Gradient (°)	当年土地利用 Landuse in sampling year
11 年生紫花苜蓿 T <sub>1</sub>	—	梁坡中部 Lower middle slope	南 South	13	苜蓿 Alfalfa
苜蓿翻耕后 3a 农地 T <sub>2</sub>	10	梁坡中部 Lower middle. slope	南 South	12	燕麦 Oat
苜蓿翻耕后 12a 农地 T <sub>3</sub>	13	梁坡中部 Middle slope	南 South	13	玉米 Corn
持续农地 T <sub>4</sub>	—	梁坡中部 Lower middle. slope	南 South	12	土豆 Potato

T<sub>1</sub> 11 years alfalfa; T<sub>2</sub> 3 years crop after alfalfa; T<sub>3</sub> 12 years crop after alfalfa; T<sub>4</sub> Continuous crop

2 结果与分析

2.1 苜蓿翻耕后土壤干层水分恢复程度的判断

首先明确三点以帮助评价土壤干层水分的恢复。第一,由于在研究区和其它黄土高原半干旱区,当紫花苜蓿地一旦形成土壤干层后,在其以后的生长期,雨季降雨入渗的临界深度为 1.2m<sup>[2,19]</sup>。在丰水年,1.2m 以上土层的水分有可能得到补偿,所以本文重点研究紫花苜蓿翻耕后 1.2m 以下土层的土壤水分恢复情况。第二,以农地和正在生长的 11 年生紫花苜蓿地土壤湿度为参照,其它紫花苜蓿翻耕地土壤湿度与此相比较,以确定不同翻耕年限和土壤干层水分恢复程度。因为研究区 1 年生农作物主要消耗 2m 以上的土壤水分<sup>[2]</sup>,而且农田土壤水分多年平均收支基本平衡<sup>[20]</sup>,其土壤水分状况是与当地气候相互适应的结果。所以农田土壤水分尤其是农作物主要吸水层 2m 以下的土壤含水量,

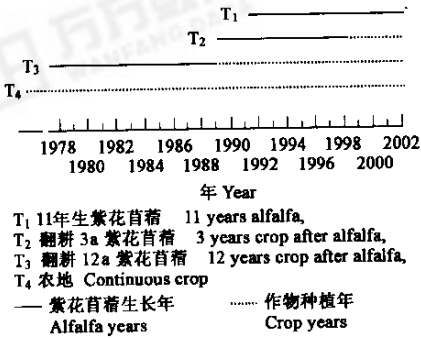


图 1 观测点苜蓿生长和翻耕后种植农作物对应年代示意图  
Fig. 1 Sketch map of the corresponding years of alfalfa and crop of the treatments

量,是苜蓿翻耕地干层土壤水分恢复的上限;11 年生紫花苜蓿地的土壤湿度可以作为苜蓿翻耕地干层土壤水分恢复的起点湿度。原因有两点:一是已有的研究表明<sup>[19]</sup>,该区紫花苜蓿在生长 5a 以后,1m 土层以下可以形成深至 7m 的土壤干层,干层平均土壤湿度 7.3%,本次所测 11a 紫花苜蓿 1~7m 平均土壤湿度

7.5%,二者很接近。这是由于当土壤干层一旦形成,干层土壤湿度具有一定稳定性<sup>[19]</sup>。二是苜蓿翻耕后3a、12a的农地在苜蓿翻耕前,紫花苜蓿分别生长了10a(1989~1998年)和13a(1977~1989),与对照11年生(1991~2001年)紫花苜蓿的生长年限接近,而且3个时间段年均降雨量分别为445.4mm、452.1mm和417.5mm,6~9月份降雨量分别为315.1mm、328.3mm和308.2mm,相差不大。所以从降雨的角度考虑,苜蓿所形成土壤干层的干燥程度也应该接近。因此将正在生长的11年生紫花苜蓿地的土壤水分作为不同翻耕年限苜蓿地干层恢复的基准是可行的;第三,用苜蓿翻耕后土壤水分含量占田间持水量的百分比(相对湿度)和土壤水分有效性级别来辅助分析水分恢复程度。相对湿度可以反应土壤水分恢复的程度,土壤水分的有效性可以反映土壤水分对植物利用的易难程度,具有一定的应用价值。固原土壤质地属中壤<sup>[2]</sup>,土壤水分有效性分级标准采用杨文治等的研究成果<sup>[21]</sup>。计算土壤相对湿度时,田间持水量取20.0%<sup>[22]</sup>。

需要指出的是,土壤干层水分的恢复与年降雨量及其季节分配有关,本文重点评价研究区多年平均降雨条件下,苜蓿翻耕后不同年限内土壤干层水分的恢复程度。表2为研究区所在的固原县1970~2001年的多年平均降雨量,以及与苜蓿翻耕后干层恢复年限相对应时间段的月均降雨量和年均降雨量。1970~2001年之间的多年平均降雨量为433.8mm,苜蓿翻耕后恢复12a(1990~2001年)期间的年均降雨量与多年平均降雨量非常接近,翻耕后恢复3a(1999~2001年)的年均降雨量虽然低于1970~2001年的多年平均降雨量,但只低30多mm,仍然在平水年的范围内,而且季节变化也很接近。所以,观测点苜蓿翻耕后其土壤干层水分恢复状况基本代表研究区多年平均降雨条件下的情况,而且苜蓿翻耕后不同年限土壤干层恢复程度的差异,主要取决于恢复年限而与降雨量的关系不大。

表2 1970~2001年多年平均降雨量和干层恢复期间的降雨量

Table 2 Average rainfall from 1970~2001 and average rainfall after alfalfa of the different treatments to 2001														
处理 Treatment	时间 Duration	月均降雨量 Average month rainfall (mm)												年均雨量 Annuual (mm)
		月份 Month												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
T <sub>2</sub>	1999~2001	2.5	3.3	7.7	28.9	37.9	70.3	75.1	79.5	57.2	29.6	3.2	0.4	395.4
T <sub>3</sub>	1990~2001	3.0	4.5	12.8	24.7	37.6	64.6	99.8	101.4	42.7	31.2	5.2	1.3	428.7
Long term	1970~2001	2.9	4.1	11.4	25.1	42.8	61.1	86.8	103.7	58.8	28.5	6.6	2.0	433.8

T<sub>2</sub> 苜蓿翻耕后3a农地 3 years after alfalfa; T<sub>3</sub> 苜蓿翻耕后12a农地 12years after alfalfa; \* 降雨资料来自中国气象局 The rainfall data was issued by National weather bureau

另外,对土壤水分的研究,一般需要较长时间序列的观测资料。但本文主要通过比较苜蓿翻不同年限农地土壤干层的水分恢复问题,是一种以空间代替时间的分析方法。另外,不同样点处于同一个山坡,降雨条件相同,而且主要分析土壤剖面1.2m以下干层的水分恢复。1.2m以下干层土壤水分在紫花苜蓿生长期间难以得到补偿,即便是农地,1.2~2m土层水分含量在年内变化较小,属于相对稳定层<sup>[2]</sup>。所以,用一次水分观测资料分析苜蓿翻耕地土壤水分的恢复是可行的。

2.2 苜蓿翻耕后土壤干层水分恢复的最大深度

图2为苜蓿翻耕后3a、12a农地,正在生长的11年生紫花苜蓿地和持续农地土壤湿度的垂直分布图。可以直观地看出,土壤水分的垂直分布总体上有两个突出特点:一是苜蓿翻耕后的农地和正在生长的11年生紫花苜蓿地土壤水分均低于持续农地,说明苜蓿翻耕后土壤水分的恢复程度不够高。二是在土壤剖面约5m左右以上,正在生长的11年生紫花苜蓿地土壤湿度最低,但在5m以下与苜蓿翻耕后3a和12a的农地土壤湿度接近,翻耕12a的湿度还略低于正在生长的11年生苜蓿地。这说明,5m以下,即便是苜蓿翻耕12a后,土壤水分也没有得到补偿,而大约5m以上,得到了不同程度的补偿。

苜蓿翻耕后3a和12a的农地与11年生紫花苜蓿地的土壤湿度曲线,在约5m以上随着深度的增加越来越接近,因为随着深度的增加,苜蓿翻耕地降雨下渗的越少。翻耕后3a和12a的土壤湿度曲线在1.2m以下,分别与11年生苜蓿地土壤湿度曲线最接近或相交处对应的土层深度,可以被认为是苜蓿翻耕地土

壤干层水分恢复的最大深度。原因是已经将正在生长的 11 年生紫花苜蓿地的土壤湿度作为苜蓿翻耕地土壤水分恢复的起点。高于起点,就说明水分得到了一定程度的补偿,等于或低于起点就说明水分没有得到补偿。这样,苜蓿翻耕后 3a 农地土壤湿度恢复的最大深度在 3m 处,翻耕后 12a 的最大恢复深度为 4.8m。至于翻耕后 3a 农地土壤湿度在 3m 以下还出现略微高于 11 年生紫花苜蓿地的情况,是由于其在翻耕前土壤水分就比正在生长的 11 年生苜蓿地的稍高一些,因为土壤上层水分不可能超过与 11 年生苜蓿地湿度最接时的低值层而去补偿其下层水分较高的土壤。

这里所说土壤水分恢复的最大深度,是指降雨入渗对干层水分补偿的深度,并不意味着恢复层内的土壤干层已经消逝或湿度恢复到与持续农地一样的水平。

2.3 苜蓿翻耕地土壤水分恢复程度

紫花苜蓿翻耕后 3a 和 12a 的农地,在其土壤干层水分恢复层中的土壤湿度与 11 年生紫花苜蓿地对应层的土壤湿度相比,有明显的提高,但恢复程度并不高。二者恢复层中(翻耕后 3a 恢复层 1.2~3m,翻耕后 12a 恢复层 1.2~4.8m)平均土壤湿度依次为 7.4% 和 8.2%,分别比 11 年生紫花苜蓿地相应层高 13.8% 和 26.2%,恢复到农地应层的 63.8% 和 75.9%。用相对湿度表示,苜蓿翻耕后 3a 的与 12a 的农地土壤水分恢复层中的土壤含水量分别占田间持水量的 37.0% 和 41.0%,而持续农地与二者恢复层对应土层的平均相对湿度分别为 58.0% 和 54.0%,正在生长的 11 年生苜蓿地与二者恢复层对应土层的相对湿度分别为 32.5% 和 32.6%。可见,持续农地对应层土壤相对湿度接近黄土高原田间稳定湿度<sup>[22]</sup>60% 的水平,而苜蓿翻耕后 3a 和 12a 农地水分恢复层中,土壤相对湿度虽然较 11 年生苜蓿地为高,但离田间稳定湿度还有较大距离,说明恢复的程度还不高。

在未恢复层中,苜蓿翻耕后 3a 的农地与 11 年生紫花苜蓿地接近,翻耕 12a 后的土壤水分含量还略低于 11 年生苜蓿地。

在干层水分恢复层中,上层水分恢复的程度比下层好。把恢复层中土壤水分按水分的有效性进行分层,将中效水及其以上(绝对湿度大于 7%,相对湿度大于 35%)的土层看作主要恢复层。翻耕 3a 的苜蓿地 1.2~2.0m 土层的水分恢复到 8% 以上,平均 8.6%,相对湿度 42.9%,为中效水。平均湿度恢复到持续农地相应层的 76.5%。而 11 年生紫花苜蓿对应层平均湿度只有 6.6%,相对湿度 33.0%,为难效-无效水;2.0~3.0m 的平均土壤湿度只有 6.4%,相对湿度 32.0%,属于难效-无效水层,只恢复到持续农地的 56.1%,比 11 年生紫花苜蓿地相应层平均湿度高 5.6%。

苜蓿翻耕后 12a 的农地,在 1.2~2.2m 之间,土壤湿度均大于 7%,平均 10.2%,相对湿度 51.2%,为中效水偏上水平,恢复深度和程度均高于苜蓿翻耕 3a 后的农地。该层土壤湿度与持续农地相应层相比,恢复到 90.5%,比 11 年生紫花苜蓿地相应层高 45%,为主要恢复层。2.2~4.8m 之间,平均湿度 7.3%,相对湿度 36.7%,恢复到持续农地相应层的 69.8%,只比 11 年生紫花苜蓿地高 6%。虽然 2.2~4.8m 之间的平均含水量达到中效水平,但属于中效水偏下水平。

由此可见,坡地紫花苜蓿翻耕 3a 和 12a 后,分别在 2m 和 2.2m 以上干层的土壤湿度得到了较好恢复,土壤水分恢复到中效水,接近对照持续农地的土壤水分含量。

在以上分析土壤干层水分恢复时,没有考虑 1.2m 以上土层土壤的水分状况。如果将这层土壤水分考虑在内,那么苜蓿翻耕 3a、12a 的农地,0~2m 土层的平均土壤湿度分别为 13.7% 和 12.5%,相对湿度分别为 68.5% 和 62.5%,皆为易效水,分别恢复到持续农地的 82% 和 89%。而正在生长的 11 年生紫花苜蓿地

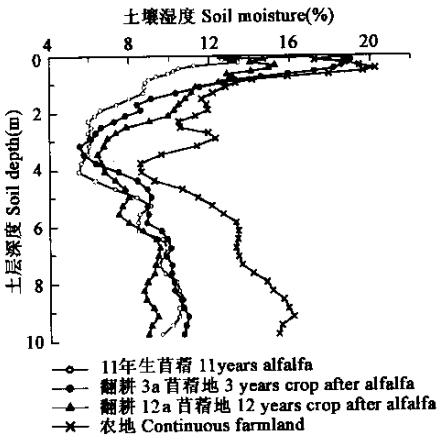


图 2 11 年生苜蓿地、翻耕 3a、12a 苜蓿地和农地土壤湿度垂直分布曲线

Fig. 2 Curves of soil moisture distribution on soil profiles of 11 years alfalfa, 3 years crop after alfalfa, 12 years crop after alfalfa and continuous crop



0~2m 平均土壤湿度只有 9.6%,相对湿度只有 48.0%。由于 1 年生农作物 90%的用水量来自 2m 以上的土层<sup>[3]</sup>,在紫花苜蓿翻耕后种植 1 年生农作物的情况下水分还可得到一定的恢复,说明引起土壤干燥化的植被停止生长后,种植 1 年生农作物或牧草,不会导致土壤水分生态环境的进一步恶化。但是,苜蓿翻耕 12 后土壤水分最大恢复深度才 4.8m,且 2~4.8m 之间的平均土壤湿度 7.3%,只恢复到其田间持水量的 36.5%。而多数乔灌木及多年生牧草的用水深度超过 8m<sup>[3,23]</sup>,所以即使苜蓿翻耕 12a 后,也不能造林和种植多年生豆科牧草,否则会使土壤水分条件进一步恶化或林木不能成活。

### 3 结论

本文对地处黄土高原半干旱区固原县坡地苜蓿翻耕后 3a、12a 农地土壤干层水分的恢复状况进行了分析,主要结论有以下几点:

(1)苜蓿翻耕后,在继续种植 1 年生农作物的情况下,其土壤干层的水分得到了一定程度的恢复。12~13°坡地上苜蓿翻耕 3a、12a 后水分恢复的最大深度分别为 3m、4.8m,但土壤水分含量在中效水及其之上的主要恢复层分别为 2m 和 2.2m。二者 2m 以上的土层平均湿度分别为 13.7%和 12.5%,恢复到田间持水量的 68.5%和 62.5%,恢复到持续农地的 89.5%和 81.7%。

(2)干层土壤水分恢复的深度和程度随翻耕年限的增加而增大。

(3)研究区当形成土壤干层的植被一旦终止其存活后,可以种植 1 年生农作物,土壤水分不会因此继续恶化,而且土壤干层的水分还会有一定恢复。但即使翻耕 12a 后,也不适宜造林或种植多年生深根豆科牧草。

### References:

- [1] Li Y. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5):427~432.
- [2] Yang W Z, Yu C Z, eds. *The regional management and evaluation*. Beijing: Science Press, 1992. 241~343.
- [3] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, **3**(2):91~101.
- [4] Yang W Z, Han S F. Soil water ecological environment on the artificial wood land and grassland in Loess hilly region. *Memoir of NISWC, Academia Sinica*, 1985, **2**:18~28.
- [5] Li Y Y, Shao M A. Climatic change, vegetation evolution and low moisture layer of soil on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, **15**(1):72~77.
- [6] Yang X M, Yang W Z. Study on the water balance in Shrub Land. *SWCC*, 1998, **5**(1):109~118.
- [7] Wei T X, Yu X X, Zhu J Z. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in Loess area of western Shanxi Province. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2001, **12**(2):185~189.
- [8] Hou Q H, Han R L, Han S F. The preliminary study of "Soil dry layer" of artificial forest and grass in Loess Plateau. *SWCC*, 1999, (5):11~14.
- [9] Hou Q C, Han R L, Li H P. On problems of vegetation reconstruction in yan'an experimental area Ⅲ. Significance of native trees in plantation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, **7**(2):119~123.
- [10] Wang L, Shao M A, Hou Q C. Status of dried soil layer in the Yan'an experimental area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20**(3):35~37.
- [11] Wang G L, LIU G B, CHANG X, et al. A study on the effect of soil water on vegetation rehabilitation in watershed of Loess hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(3):339~344.
- [12] Hou Q C, Huang X, Han S F, et al. The status of soil moistures and nutrients in small-old-tree stands and impacts on the tree growth. *Acta Conservationis Soil Et Aquae Sinica*, 1991, **5**(2):75~83.
- [13] Wang Z Q, Liu B Y, Xu C D, et al. Survival capability analysis of four kinds of artificial forests in Loess Plateau. *Acta Conservationis Soil Et Aquae Sinica*, 2002, **16**(4):25~29.
- [14] Guan X Q, Zou H Y, Lu Z Y, et al. Study on the sustainable development of the grassland production in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, **1**(3):56~60.
- [15] Liang Y M, Li D Q, Cong X H. The biomass and water use of astragalus adsurgens grassland on the semiarid Loess Plateau. *Acta Conservationis Soil Et Aquae Sinica*, 1990, **4**(3):71~78.
- [16] Liu X D, Wu Q X, Zhao H Y. Studies on soil moisture characteristics in flantation of chinese pine in Loess hilly

region. *Memoir of NISWC, Academia Sinica*, 1991, **14**: 71~78.

[17] Li X Y, Chen G L. The systematic dynamic model of soil moisture and it, sover-exhausted recovering forecast in artificial grassland. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, **3**(1): 166~178.

[18] The beaurou of Ninxia natural Reservatoin. *A collection works on scientific investication and management in Ningxia Yun Wushan reservation*. Ying Chuan; Ningxia peopule's Press, 2001. 1~12.

[19] Liu Z M, Shan L, Den X P, *et al.* Study on grass-grain crop rotation in south Ningxia hilly area II. field water balance under different crop rotation systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, **7**(4): 67~71.

[20] Han S F, Shi Z Y, Xu J R. The evaluation on water recovery in different topography in southern Ningxia semi-arid area. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, **3**(1): 22~26.

[21] Yang W Z, Shao M A, eds. *Soil water study of Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2000. 49~115.

[22] Han S F, Li Y S, Shi Y J, *et al.* The soil water properties of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, **10**(1): 36~43.

[23] Wang Z Q, Liu B Y, Hai C X, *et al.* Analysis of different vegetation types on soil water in the northwest of Shanxi Province. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, **16**(4): 53~58.

参考文献:

[1] 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.

[2] 韩仕峰. 黄土高原农田水量平衡. 见: 杨文治, 余存祖主编. *区域治理与评价*. 北京: 科学出版社, 1992. 241~343.

[3] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水循环的影响. *生态学报*, 1983, **3**(2): 91~101.

[4] 杨文治, 韩仕峰. 黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境. *中国科学院西北水土保持研究所季刊*, 1985, **2**: 18~28.

[5] 李裕元, 李玉山. 黄土高原气候变迁、植被演替与土壤干层的形成. *干旱区资源与环境*, 2001, **15**(1): 72~77.

[6] 杨新民, 杨文治. 灌木林地的水分平衡研究. *水土保持研究*. 1998, **5**(1): 109~118.

[7] 魏天兴, 余新晓, 朱金兆, 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究. *应用生态学报*, 2001, **12**(2): 185~189.

[8] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999(5): 11~14.

[9] 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. *水土保持研究*, 2000, **7**(2): 119~123.

[10] 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.

[11] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应. *自然资源学报*, 2002, **17**(3): 339~344.

[12] 侯庆春, 黄旭, 韩士峰. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径研究(土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系). *水土保持学报*, 1991, **5**(2): 75~83.

[13] 王志强, 刘宝元, 徐春达, 等. 连续干旱条件下黄土高原几种人工林存活能力分析. *水土保持学报*, 2002, **16**(4): 25~29.

[14] 关秀琦, 邹厚远, 鲁子瑜. 黄土高原草地生产持续发展研究, *水土保持研究*, 1994, **1**(3): 56~60.

[15] 梁一民, 李代琼, 从心海. 沙打旺草地产草量动态及水分利用研究. *水土保持学报*, 1990, **4**(3): 71~78.

[16] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土丘陵区人工油松林土壤水分特征的研究. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1991, **14**: 71~78.

[17] 李细元, 陈国良. 人工草地土壤水系统动力学模型与过耗恢复预测. *水土保持研究*, 1996, **3**(1): 166~178.

[18] 宁夏云雾山自然保护区自然概况. 见: 宁夏云雾山自然保护管理局编, 宁夏云雾山自然保护区科学考察与管理文献汇编. 银川: 宁夏人民出版社, 2001. 1~12.

[19] 刘忠民, 山仑, 邓西平. 宁南山区草田轮作研究(不同耕作制度下的农田水分平衡). *水土保持学报*, 1993, **7**(4): 67~71.

[20] 韩士峰, 史竹叶, 徐建荣. 宁南半干旱区不同立地农田水分恢复评价. *水土保持研究*, 1996, **3**(1): 22~26.

[21] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分有效性. 见: 杨文治, 邵明安主编. *黄土高原土壤水分研究*. 北京: 科学出版社, 2000. 49~115.

[22] 韩士峰, 李玉山, 石玉杰. 黄土高原土壤水分特性. *水土保持通报*, 1990, **10**(1): 36~43.

[23] 王志强, 刘宝元, 海春兴. 晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析. *干旱区资源与环境*, 2002, **16**(4): 53~58.