

宁南山区紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 土壤 干层水分动态及草粮轮作恢复效应

刘沛松^{1,2}, 贾志宽^{1,3,*}, 李 军³, 任小龙^{1,2}, 李永平⁴, 刘世新⁴

(1. 西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 固原市农业科学研究所, 宁夏 固原 756000)

摘要:以各类作物农田水分作为对照,连续两年对宁南山区不同生长年限苜蓿深层土壤水分以及 10 年生苜蓿地耕翻后轮作不同年份作物农田的水分进行了测定。结果表明,随着苜蓿生长年限的增加,干层深度与厚度先增加后减小。3 年生苜蓿干层深度为 720cm,6 年生干层最深可达 1000cm 以下,10 年生干层深度为 920cm,3~12 年生苜蓿地 0~700cm 土层基本上均属于土壤干层范围。苜蓿地 0~800cm 土壤湿度随生长年限增加而降低,2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~700cm 土层平均含水率分别为 5.30%、5.22% 和 5.01%;2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~800cm 土层湿度分别为 6.26%、5.60% 和 5.27%;而 800~1000cm 土层湿度在一定年限后有恢复趋势。300cm 为苜蓿地降水下渗的最大临界深度,300cm 以下土壤干层一旦形成,将长期存在,7~12 年生苜蓿 300~700cm 土层湿度仅维持在 4.0% 左右。苜蓿地和农田的土壤干层厚度与湿度有较大差异,草粮轮作可使苜蓿土壤干层水分基本恢复到农田湿度,而且轮作年份越长,土壤各层次水分恢复效果越好,10 年生苜蓿轮作 18 年后土壤水分基本恢复到农田状态。

关键词:宁南山区; 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*); 土壤干层; 草粮轮作; 水分恢复

文章编号:1000-0933(2008)01-0183-09 中图分类号:Q142, Q948, S154 文献标识码:A

Moisture dynamics of soil dry layer and water-restoring effects of alfalfa (*Medicago sativa*)-grain crop rotation on soil dry layer in alfalfa farmlands in Mountainous Region of Southern Ningxia

LIU Pei-Song^{1,2}, JIA Zhi-Kuan^{1,3,*}, LI Jun³, REN Xiao-Long^{1,2}, LI Yong-Ping⁴, LIU Shi-Xin⁴

1 The Agriculture Research Center in Arid and Semiarid Areas, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China

3 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

4 Agriculture Science Institute of Guyuan City, Guyuan, Ningxia 756000 China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0183 ~ 0191.

Abstract: In two consecutive years, the study measured the soil water contents in the farmlands on which alfalfa had grown for different periods and the soil water contents in the farmland on which alfalfa had grown for ten years and then rotated

基金项目:国家“十一五”旱农支撑计划资助项目(2006BAD29B03);国家自然科学基金资助项目(40371077 和 30471024);黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室开放基金资助项目(10501-180)

收稿日期:2007-06-05; **修订日期:**2007-11-08

作者简介:刘沛松(1973~),男,陕西武功人,博士,主要从事农业生态与旱地农业研究. E-mail: peisongliu@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhikuan@tom.com

Foundation item: The project was financially supported by the Dryland Farming Support Project For the “Eleventh Five-year National Plan of China” (No. 2006BAD29B03), the National Natural Science Foundation of China (No. 40371077 and 30471024) and the Open Foundation of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Plateau (No. 10501-180)

Received date: 2007-06-05; **Accepted date:** 2007-11-08

Biography: LIU Pei-Song, Ph. D. candidate, mainly engaged in agri-ecology and dryland farming. E-mail: peisongliu@163.com

with other crops in different years and then compared the soil water contents with those in different croplands. The study indicated that while alfalfa growth was prolonged the depth and thickness of soil dry layer firstly increased and then declined. The depth of soil dry layer was 720cm in the farmland with alfalfa growing for three years, at most 1000cm in the farmland with alfalfa growing for six years, and 920cm in the farmland with alfalfa growing for ten years and soil dry layer spanned nearly 0—700cm soil in the farmlands with alfalfa growing for 3—12 year. In alfalfa farmlands, the Average humilities declined in 0—800cm soil as the growth of alfalfa was prolonged. In 2004, the average soil water contents were measured to be 5.30%, 5.22% and 5.01% 0—700cm soil in the farmlands, with alfalfa growing for 4, 7 and 12 year, respectively; in 2005, the soil humidities were measured to be 6.26%, 5.60% and 5.27% in 0—800cm soil in farmlands with alfalfa growing for 3, 6 and 10 year, respectively; But the soil humidities tended to rebound in 800—1000cm after alfalfa grew for a certain period. 300cm is the maximum soil depth to which the rainwater could infiltrate down, and thus soil dry layer, tended to stay permanently once it formed in soil below 300 cmm deep., the soil humidity remained only 4.0% in 300—700cm soil in the farmlands with alfalfa growing for 7—12 year. the thickness and humidities of Soil dry layer differed greatly between alfalfa farmland and cropland, but alfalfa-crop rotation made the soil humidities of soil dry layer recover to those of the croplands and its such effect was intensified in different soil layers as the rotation was prolonged. . . furthermore, the 18 year alfalfa-crop rotation made the farmland with alfalfa growing for 18 years recover its soil water content to that of cropland.

Key Words: Mountainous Region ; south Ningxia; alfalfa (*Medicago sativa*); soil dry layer; alfalfa-grain crop rotation; moisture restoration

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*, 以下简称苜蓿) 是一种优良的豆科多年生草本植物, 在世界各地具有广泛的适应性^[1], 在我国已有 2000 多年的人工栽培历史, 其产量高, 品质好, 富含蛋白质^[2], 能为牛羊等提供丰富的营养, 适合发展畜牧业, 被誉为“牧草之王”。苜蓿根系具有很强的根瘤固氮作用^[3], 据估算, 当年生苜蓿固定到土壤中的氮约 35 ~ 305 kg·hm⁻², 比其他作物地和天然草地高, 在我国半干旱地区, 每公顷苜蓿一年可在土壤中固定约 270 kg 氮, 相当于 825 kg 硝酸铵^[4]。其根瘤菌和大量的须根给土壤留下的腐殖质可增加土壤有机质^[5], 改善土壤团粒结构^[6], 是一种良好的轮作倒茬和种地养地的豆科植物, 适合轮作粮食作物, 并提高其品质和产量^[7,8]。

然而, 多年生苜蓿在土壤中形成深厚的干土层将严重影响后茬作物对水分的需求和产量的提高。近年来, 苜蓿土壤干层问题引起了人们足够的重视, 并对此提出了多种解决途径: 通过灌溉补水、降低土壤蒸发耗散量、控制植物群落密度和生长年限, 以及采用与禾本科牧草浅混播等方式, 减缓和防止干土层的进一步发展^[9~14], 而对苜蓿草地干土层有限水分持续利用并具有生物恢复作用的草粮轮作措施研究报道较少。发展禾本科和豆科牧草相结合及科学合理的轮作制度, 使生态用水与蓄水相结合, 全面保护和有效利用有限的水资源, 是半干旱区人工草地建设与发展应该深入探讨的问题^[15]。本文在研究苜蓿草地土壤干层的形成和消长动态规律的基础上, 探讨草粮轮作对于土层水分的生态用水及恢复效果, 为农地资源的合理、持续利用提供科学依据。

1 试验布设与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2004 年 3 月~2005 年 10 月在西北农林科技大学宁夏海原(贾塘)宁南旱作农业试验区进行。试验区位于东经 105°82', 北纬 36°50', 海拔约 1820m, 地处黄土高原宁夏南部农牧交错雨养农业区, 属典型的半干旱偏旱丘陵沟壑区。年均太阳总辐射 566KJ/cm², 日照时数 2706h, 年均气温 8.2℃, ≥10℃年积温 2398℃, 无霜期 146d 左右。年均降水量 350mm, 年内降水分布极不平衡, 大多集中在 5~9 月份, 约占全年降水量的 80% 以上。年均蒸发量为 2200mm, 为降水量的 6.3 倍, 干燥度 2.17。土壤为黄土母质上发育的黑垆

土和黄绵土,质地轻壤,pH 为 8.23。地下水位较深,难以利用,农业生产用水主要来自降水。属典型的北温带大陆性季节气候,光热充足,雨热同季。自然条件恶劣,生态环境脆弱,植被稀少,水土流失严重。干旱少雨,风大沙多,自然灾害频繁,旱、风、雹、冻、涝五灾俱全,尤以旱灾为最,素有“十年九旱”之称。

1.2 试验布设及测定方法

试验区人工种植的各年生紫花苜蓿及轮作地面积均在 666.7m²以上,地块邻近,地势平坦。土壤类型均为黄绵土,质地轻壤。2004 年 7 月 24~26 日对试验区 4、7 年生和 12 年生苜蓿地,以及 10 年生苜蓿翻耕后分别轮作了 4、10a 和 18a 粮食作物的农田 0~700cm 深层土壤水分进行了测定,轮作 4、10a 和 18a 的当季作物或茬口依次为豌豆、糜子和胡麻,轮作期间的作物为马铃薯、春小麦、谷子、糜子、扁豆和胡麻等。2005 年 8 月 19~20 日又测定了 3、6、10 年生苜蓿地和撂荒地 0~1000cm 的深层土壤水分,同时测定几类不同作物在不同生产力下的农田 0~600cm 土壤水分。2004 年 7 月 24 日和 2005 年 8 月 19 日测定前年内降水量基本相当,分别为 128.0mm 和 124.8mm。

苜蓿地土壤剖面水分均在各年刈割第一茬时测定。刈割第一茬的 3、4 年生和 7 年生苜蓿产鲜草量分别约为 11000 kg/hm²、12000kg/hm²和 12250kg/hm²,生长较旺盛,地面覆盖度较大,6 年生苜蓿产鲜草量为 21000 kg/hm²左右,生长最旺盛,地面覆盖度最大,10、12 年生苜蓿产鲜草量分别为 4500kg/hm²和 3000 kg/hm²,地表裸露现象严重。

试验区所选样地地块集中,甚至相邻,土壤剖面土质均一致。田间持水量为 19.16%。土壤含水率测定各重复 2 次,取平均值,间距 20cm/层。常规土钻取样,烘干法测定,用重量含水率(%)表示。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿地土壤干层特征

本试验把土壤剖面含水率低于土壤稳定湿度 9.58% 且在雨季不能得到恢复的土层范围称为土壤干层。大多数研究者认为土壤干层湿度上限应低于土壤稳定湿度^[14,16~19]。土壤稳定湿度是指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下,通常旱地土壤能够长期维持的土壤湿度,其值约为田间持水量的 50%~75%^[17,18,20]。由于该试验区田间持水量为 19.16%,轻壤土的土壤稳定湿度相当于田间持水量的 49%~54%^[21],按 50% 计算,土壤稳定湿度约为 9.58%。

2.1.1 干层厚度

如图 1 和 2 所示,根据上述土壤干层划分标准,2004~2005 年测定的不同生长年限苜蓿土壤干层分布在低于含水率 9.58% 的土壤稳定湿度线左侧部分。2004 年 7 月测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿土壤干层均深达 700cm 以下,2005 年 8 月测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿土壤干层深度下限分别为 720、1000cm 以下和 940cm。由此可见,各年生苜蓿地 0~700cm 土层范围基本上均属于土壤干层,6 年生苜蓿土壤干层最深,可达 1000cm 以下。随着苜蓿生长年限的增加,干土层厚度先增加后减小。

2.1.2 干层湿度

随着苜蓿生长年限增加,0~800cm 土壤总体上干燥化加剧。2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~700cm 土层平均含水率分别为 5.30%、5.22% 和 5.01%,其中 0~200cm 分别为 6.77%、7.08% 和 7.89%,200~700cm 分别为 4.63%、4.18% 和 4.15%;2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~700cm 土层湿度分别为 5.68%、5.65% 和 5.32%,0~800cm 土层湿度分别为 6.26%、5.60% 和 5.27%,其中 0~200cm 土层湿度分别为 6.92%、8.42% 和 8.02%,200~700cm 土层湿度分别为 5.19%、4.54% 和 4.23%,200~800cm 土层湿度分别为 6.41%、4.57% 和 4.15%。6 年生以后,0~200cm 土层均保持相对较高的湿度,这为苜蓿地耕翻后轮作 1 年生浅根系作物提供了可能^[22];而 800~1000cm 土层湿度有明显恢复趋势,2005 年的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 800~1000cm 土层湿度分别为 14.73%、6.25% 和 8.09%。

2.2 苜蓿土壤各层次水分时空动态规律

苜蓿地 0~100cm 表土层由于受降水的直接作用,局部土层湿度高于 9.58%,保持了较高的湿度,总体平

均湿度低于土壤稳定湿度,仍属于干层湿度范围。2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿 0~100cm 土层平均含水率分别为 8.11%、8.04% 和 8.69%;2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿 0~100cm 土层平均含水率分别为 8.40%、9.10% 和 7.86%。

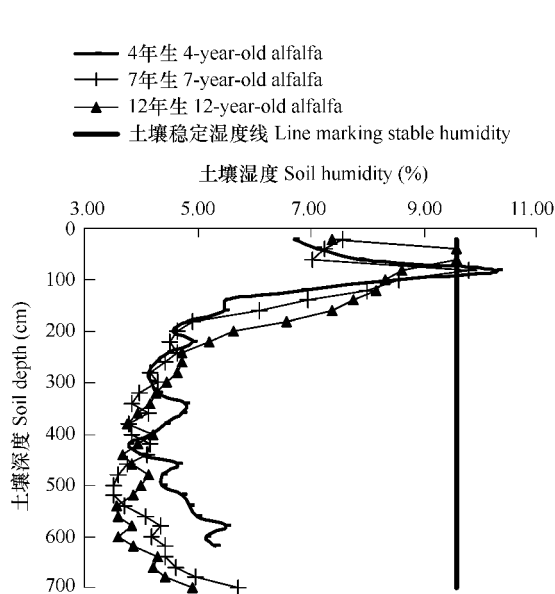


图 1 不同生长年限苜蓿 0~700cm 土壤剖面水分分布

Fig. 1 Soil water distribution along 0—700cm soil profile in farmlands with alfalfa growing for different periods

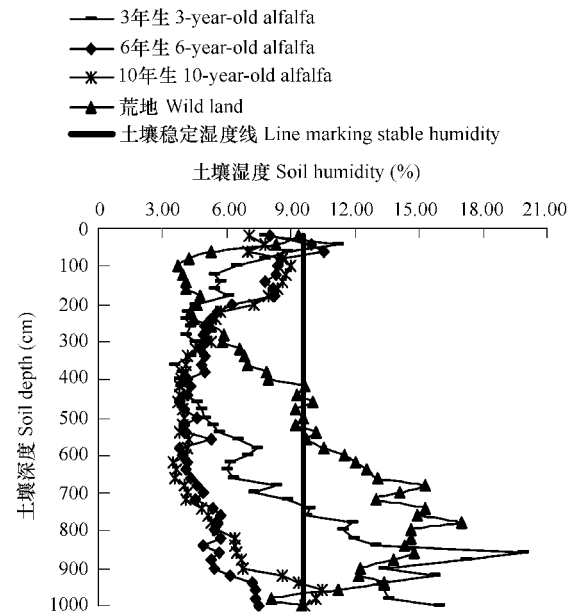


图 2 不同生长年限苜蓿 0~1000cm 土壤剖面水分分布

Fig. 2 Soil water distribution along 0—1000cm soil profile in farmlands with alfalfa growing for different periods

随着苜蓿生长年限的增加,100cm 以下干层水分均具有一定的动态变化规律。

100~300cm 土层水分有增加趋势。2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.92%、5.26% 和 5.92%,2005 年测定的 3、6 和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.83%、6.43% 和 6.77%。

300~800cm 土层呈明显干燥化趋势。2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地 300~700cm 土层平均含水率分别为 4.83%、4.13% 和 4.00%,2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 300~800cm 土层含水率分别为 6.41%、4.57% 和 4.15%,其中 300~700cm 土层平均含水率分别为 5.43%、4.39% 和 3.95%,700~800cm 土层平均含水率分别为 10.34%、5.32% 和 4.95%。可见,随着苜蓿的生长,300~800cm 土层湿度逐年下降。尤其在苜蓿衰退的 7~12 年生,300~700cm 干层湿度仅维持在 4.00% 左右的极低状态。

820~1000cm 土层水分先下降,到一定年限后又有明显反弹,干层水分可恢复到 0~100cm 表土层的湿度水平。2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 14.73%、6.25% 和 8.09%,说明 6~10 年生期间水分有所回升。由于降水垂直入渗是地下水补给的惟一来源,而干层隔断了土壤深层水分的补给路径^[18],这种恢复不可能来源于降水。况且黄土高原的地下水位多在地表下 60~100m^[18],埋藏较深,800cm 以下土壤湿度不受地下水的影响。因此,土壤深层 800~1000cm 范围的这部分恢复水,只能来源于深层“土壤水库”的深层储水向上的补充调节,但是这种调节达到一定深度时由于受重力抵消而终止。这只是水分在土壤系统内的运移过程,不是来自土壤系统外的水分,所以不能算作真正意义上的恢复。

2.3 草粮轮作对苜蓿土壤干层水分的恢复效应

2.3.1 以农田土壤湿度作为苜蓿土壤干层水分恢复标准

对照的作物农田也同样存在着土壤干层。经测定,试验区低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田、和高产春小麦收获地 0~600cm 土壤湿度分别为 10.11%、9.37%、9.07%、9.13% 和 8.76%,平

均 9.29%。0~600cm 土层剖面最低含水率分别为 6.10%、6.23%、6.36%、6.83% 和 6.36%，基本趋近于 6.10%，所以农田的土壤干层分布在 6.10%~9.58% 的含水率线之间。不同种类作物不同生产力下农田的 0~600cm 土壤水分分布如图 3 所示。

各类农作物耗水深度主要在 0~200cm^[16,23]，且耗水强度远低于苜蓿，能够积蓄降水，因而农田 200cm 以上土层基本上不存在干层。图 3 中低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地 0~200cm 土壤湿度依次由高到低分别为 15.27%、12.50%、11.72%、10.21% 和 10.18%，平均 11.97%，均高于土壤稳定湿度 9.58%。且同一种类作物产量越高，0~200cm 土层湿度越低。

各类农田土壤干层均分布在 200cm 以下，除中产马铃薯田和高产春小麦收获地干层深度下限分别在 500cm 和 520cm 深度外，其他农田干层深度均超过 600cm。而且作物种类不同，田间干层厚度不同。低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地土壤干层范围分别在 220cm 以下（含 220cm，以下同）、160cm 以下、200cm 以下、180~500cm 和 80~520cm。同一作物产量越低，200~600cm 土层湿度也越低。低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地各类农田 200~600cm 土壤平均湿度分别为 7.53%、7.81%、7.74%、8.59% 和 8.05%。

与农田相比，具有极强蒸腾耗水能力的苜蓿降低了土壤湿度，扩大了土壤干层的深度与厚度。由图 1、图 2 和图 3 比较可知，在农田种植苜蓿后，土壤水分被强烈消耗，土壤干层的湿度范围由原先的 6.10%~9.58% 扩大到 3.50~9.58%，相应地扩大了土壤干层的深度与厚度。各类农田 0~600cm 土层平均湿度在 8.76%~10.11% 范围，而 2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~600cm 平均湿度分别为 5.28%、5.04% 和 5.36%，2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~600cm 平均湿度分别为 5.50%、5.82% 和 5.57%。因此，农田土壤湿度可作为草粮轮作对苜蓿干层水分的恢复指标。

2.3.2 草粮轮作对土壤干层修复效果

草粮轮作能够缓解苜蓿干层干燥化加剧的状态，并能有效恢复苜蓿干层水分。图 4 为 10 年生苜蓿地及其轮作 4、10a 和 18a 后的 0~700cm 农田土壤剖面水分分布。10 年生苜蓿地 0~600cm 土壤湿度为 5.57%，其中 0~200cm 土层湿度为 8.02%，200~600cm 土层湿度为 4.35%。轮作 4、10a 和 18a 粮食作物后的 0~600cm 土壤湿度分别为 5.58%、6.88% 和 9.19%，其中 0~200cm 土层湿度分别为 8.39%、11.01% 和 11.90%，200~600cm 土层湿度分别为 4.17%、4.81% 和

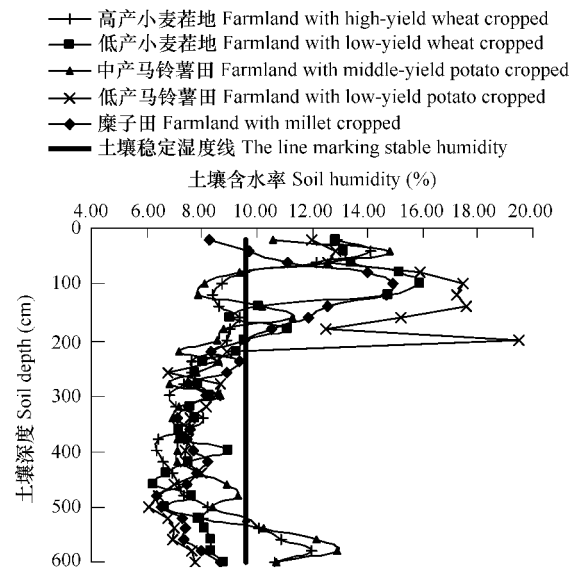


图 3 不同作物农田 0~600cm 土壤水分分布

Fig. 3 Soil water distributions in 0—600cm in farmlands with different crops planted

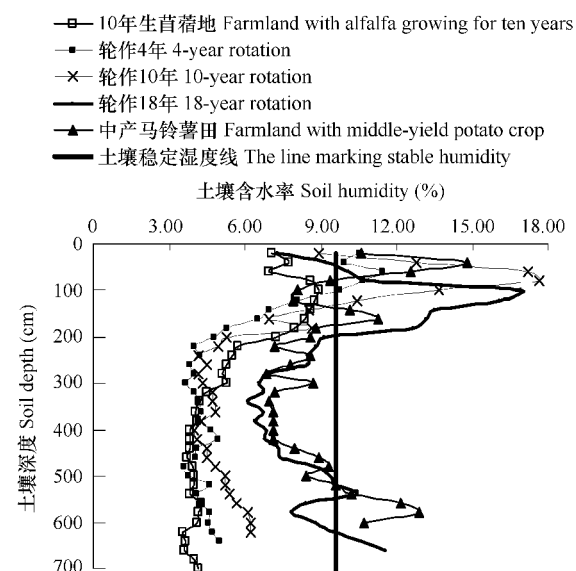


图 4 10 年生苜蓿轮作不同年份作物后土壤水分动态分布

Fig. 4 Dynamic soil water distributions in the farmland on alfalfa had grown for ten years and then been rotated with other crops in different years

7.84%。说明草粮轮作使土壤水分自上而下得到恢复,作物轮作年份越长,土壤水分恢复效果越好。

轮作 18a 时 0~600cm 土壤湿度均高于糜子田(9.07%)、中产马铃薯田(9.13%)和高产小麦茬地同土层湿度(8.76%),接近于低产小麦茬地同层湿度(9.37%),低于低产马铃薯田同土层湿度(10.11%)。其中 0~200cm 土层湿度高于同土层的糜子田(11.72%)、中产马铃薯田(10.21%)和高产小麦茬地湿度(10.18%);200~600cm 土层湿度均高于低产马铃薯田(7.53%)、糜子田(7.74%)和低产小麦茬地同土层湿度(7.81%),低于中产马铃薯田(8.59%)和高产小麦茬地同土层湿度(8.05%)。且剖面内各土壤测点湿度均高于农田最低含水率 6.10%,说明经过草粮轮作 18a 后,苜蓿生长期间形成干燥化土层的湿度已基本恢复到农田水平。

草粮轮作使苜蓿地干层范围和厚度减小。图 1、图 2 和图 4 显示,2004 年的 12 年生苜蓿地干层深度和厚度均远大于 700cm,2005 年的 10 年生苜蓿地干层深度和厚度均深达 940cm,而轮作 18a 时土壤干层范围已减小到 200~520cm,厚度仅 320cm,甚至小于对照的中产马铃薯农田。对照的中产马铃薯农田干层范围为 180~520cm,厚度 340cm。说明干层明显得到消除。

2.3.3 苜蓿土壤干层水分变化趋势及草粮轮作恢复速度

为便于比较分析,本试验统一用 300~600cm 土层湿度动态变化来表示苜蓿土壤干层水分随生长年限的变化趋势以及草粮轮作对苜蓿干层水分的恢复效果。由于 0~300cm 表层土壤含水量受降水蒸发等气象条件影响较大,这种变化并不能反映土壤含水量长期的动态变化规律。而 300cm 以下土层不直接受降水随机性变化的影响,可反映苜蓿生长过程中对于层水分的消耗规律,且降水对土壤水分的恢复是由上而下进行的,所以 300~600cm 土层水分一旦能恢复到正常农田水平,就意味着 0~300cm 也已基本恢复。图 5 反映了 2004~2005 年测定的苜蓿地 300~600cm 干层水分随生长年限的动态变化及 10 年生苜蓿经草粮轮作 4、10a 和 18a 后(即图中对应的 14、20a 和 28a)的农田水分恢复动态。

随着苜蓿生长年限的增加,300~600cm 土壤干层湿度逐年下降,土壤整体干燥化程度加剧。由图 5 可看出,苜蓿在 3~7 年生期间,300~600cm 土层湿度急剧下降,由 4.97% 减小到 3.90%,年均降低 0.24%;7 年生以后,该层湿度维持在含水率为 4.00% 的极干燥化状态,7、10 年生和 12 年生苜蓿该层含水率分别为 3.90%、4.01% 和 3.89%,均低于当地苜蓿凋萎湿度 4.5%^[24]。可见,7 年生之后,苜蓿的生长仅依靠 300cm 以上土层的当年降水。到 12 年生时苜蓿土壤水分已极为匮乏,田间地上部分生长严重衰退,产草量极低。有关研究^[10]认为,宁南山区苜蓿 10 年生以后,多数趋于生理衰败,加之深层水分的枯竭,生物产量极低。

10 年生苜蓿经过草粮轮作 4、10a 和 18a,300~600cm 干层湿度由 4.01% 分别增加到 4.25%、4.94% 和 7.84%,年均恢复速度分别为 0.06%、0.07% 和 0.16%,说明干层一旦形成水分不易恢复,随着轮作年

份增加,恢复速度逐渐加快。轮作 18a 时,该土层湿度已高于低产马铃薯田(7.28%)、糜子田(7.50%)和低产小麦茬地(7.67%)同土层湿度,仅次于中产马铃薯田(8.85%)和高产小麦茬地(8.22%)同土层湿度。因此,10 年生苜蓿经过草粮轮作的生物修复作用,大约需要 18a 可使土壤干层水分恢复到农田状态。

3 结论

(1)随着苜蓿生长年限的增加,干土层深度与厚度先增加后减小。3 年生苜蓿干土层深度为 720cm,6 年

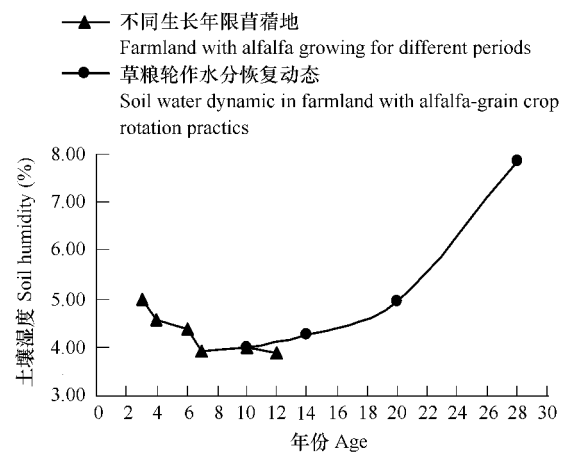


图 5 苜蓿地 300~600cm 土壤干层水分变化趋势和草粮轮作恢复效应

Fig. 5 Water contents of dry soil layer and water-restoring effects of alfalfa-grain crop rotation on soil dry layer in 300—600cm soil in alfalfa farmlands

生时最深可达 1000cm 以下,10 年生时为 920cm。3~12 年生苜蓿地 0~700cm 土层基本上均属于土壤干层范围。

(2)随苜蓿生长年限增加,0~800cm 土层湿度不断降低,一定年限后 800~1000cm 土层湿度有明显恢复现象。2004 年测定的 4、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~700cm 土层平均含水率分别为 5.30%、5.22% 和 5.01%;2005 年测定的 3、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~800cm 土层湿度分别为 6.26%、5.60% 和 5.27%;800~1000cm 土层湿度分别为 14.73%、6.25% 和 8.09%。

(3)300cm 为苜蓿地降水下渗的最大临界深度。在苜蓿生长期,300cm 以下的土壤干层一旦形成,将长期存在,7~12 年生苜蓿 300~700cm 土层湿度仅维持在 4.0% 左右。

(4)草粮轮作可使苜蓿生长形成的干土层水分得到有效恢复。农田种植苜蓿后,土壤干燥化加剧,土壤剖面最低含水率临界线由 6.10% 下降到 3.50%,干层厚度增加;10 年生苜蓿地轮作 18a 粮食作物后,土壤湿度基本恢复到农田水平,干层厚度也接近农田,且轮作年份越长,降水下渗深度越大,土壤各层次水分恢复效果越好。

4 讨论

4.1 苜蓿地土壤水分动态

随着苜蓿生长年限的增加,土壤干燥化程度加剧。这与有关研究结论一致。李玉山通过在陕西长武的长期定位试验观测,苜蓿地整个剖面各层次土壤湿度以类似的速率逐年降低^[9]。韩仕峰^[10]对宁夏固原岷岷的 1~12 年生苜蓿地土壤水分实测结果表明,随着苜蓿生长年限的增加,0~5m 土壤湿度由 1 年生的 8.9% 下降到 12 年生的 6.1%。

苜蓿生长到一定年限发生衰退后,深层土壤水分有恢复现象。这与程积民^[25]在宁南旱区固原头营梁的试验结果基本一致。程积民试验认为随着紫花苜蓿种群的衰败,土壤含水量有一定恢复。苜蓿 6 年生时 600~800 cm 土壤水分有所恢复,7~12 年生时 400~800 cm 土壤水分有所恢复,但幅度均不大。在半干旱地区,10 年生苜蓿退化草地土壤水分的自然恢复过程一般需 5a。随着草地的退化,其 0~800cm 的土壤水分可自然恢复到种植紫花苜蓿之前的水平。并认为土壤水分的恢复是受地下水影响的结果。而根据本试验测定,苜蓿在 6~10 年生仅在 800~1000cm 土层水分有较大恢复,该层土壤湿度由 6 年生的 6.25% 恢复到 10 年生的 8.09%,干层深度由 6 年生的 1000cm 以下可减小到 10 年生的 920cm。苜蓿在 6 年后发生退化,12 年生时干层深度仍在 700cm 以下,0~800cm 土壤水分并未得到自然恢复。苜蓿生长期 300~800 cm 土层干燥化加剧,300cm 以下干层将长期存在,而且降水入渗深度最大仅为 300cm。所以,尽管种植苜蓿后土壤渗透性好,但降水不可能透过 300~800cm 的深厚干层而使 800cm 以下深层水分得到补充,这一点与樊军等人^[26]的结论一致,况且黄土高原地下水埋深达 60~100m^[18],埋藏较深,也排除地下水的影响,可以认为是“土壤水库”的深层储水向上补充的结果。杨文治^[27]研究认为,土体中水分运动同样遵循经典热力学的普遍规律,由高势能方向向低势能方向不停地运动。本文认为,深层土壤储水被苜蓿消耗后储水量有限,且受重力作用,向上补充调节的深度是有限的,不可能使 0~800cm 土壤水分得到全部恢复。从更深层次的整个土壤系统角度看,这实质上是土壤水分的内部调节过程,不是真正意义上的苜蓿干层水分恢复途径。降水入渗才是使苜蓿土壤干层水分恢复的唯一来源^[18]。

4.2 草粮轮作措施对苜蓿地干土层水分恢复效应

在同等降水条件下,不同植物对土壤水分的消耗强度不同。苜蓿地 0~200cm 土层均为干层,而农田 0~200cm 土层湿度均高于田间稳定湿度。杨文治^[17]认为,在旱作农区作物耗水在土层上部形成的暂时性低湿层,一般通过当年降水可得到补偿、恢复。与本试验结论一致。但在高产作物参与种植下,农田降水渗深以下土壤水分消耗较多,该土层湿度稳定在较低的水平,易形成土壤干层,这也是农田作物产量低而不稳、易产生波动的主要原因^[9]。

在宁南山区,苜蓿草地和农田由于土壤物理蒸发和植物蒸腾作用,均存在土壤干层。紫花苜蓿与大田作

物的凋萎系数分别为 4.5%^[24]和 5.9%^[28],土壤稳定湿度为 9.58%,各年生苜蓿土壤剖面最低含水率达到凋萎湿度以下,趋近于 3.50%,不同类型农田的土壤剖面最低含水率趋近于 6.10%。在农田种植苜蓿后,土壤干层湿度范围由原先的 6.10%~9.58%扩大到 3.50%~9.58%,土壤干层厚度和深度也相应加厚加深。山仑^[7]和刘忠民等^[22]在宁南试验认为,随着苜蓿种植年限的加长,主要吸水层下移,土壤上层水分可逐渐得到恢复,苜蓿耕翻后可轮作 1 年生浅根系的草谷子作物,王志强^[23]也认为,紫花苜蓿翻耕后种植 1 年生农作物水分还可得到一定的恢复。本试验区各年生苜蓿地 0~100cm 土层由于直接受降水补充保持了较高湿度,干湿变化与苜蓿生长年限变化不相关,可进行草粮轮作。而王俊^[29]试验发现生长超过 10a 的苜蓿草地 0~200cm 土壤水分持续下降,即使轮作草谷子也不能使水分恢复。

本试验中草粮轮作可使测定深度内 0~600cm 土壤水分恢复到农田水平,且轮作年份越长,土壤各个层次水分恢复效果越好。10 年生苜蓿轮作 4、10a 和 18a 后的农田 0~600cm 土层湿度分别为 5.58%、6.88% 和 9.19%,其中 200cm 以上土层水分得到了较大恢复,轮作 4、10a 和 18a 后的农田 0~200cm 土层湿度分别为 8.39%、11.01% 和 11.90%,轮作 10a 后均超过土壤稳定湿度 9.58%,经过 18a 轮作后,土壤水分基本恢复到农田水平,恢复年份与李军^[24]在宁南山区的研究结论一致。王俊^[29]在甘肃省榆中县的试验也证明合理轮作对解决苜蓿种植导致的土壤水分亏缺问题具有重要作用。苜蓿地的水分恢复同时与试验区的气象条件、土壤特性和降水格局有关^[30]。

References:

- [1] Sun J H, Wang Y R. Yield characteristics and genetic diversity of main alfalfa varieties in China. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(5): 803—808.
- [2] Wang W D. The practical role of grass and grain rotation. *Pratacult Sci China*, 1988, 5(2): 1—3.
- [3] Lu H P, Sun A H. Effect of grass crop rotation on crop yield increase. *Pratacultural Science*, 2003, 20(4): 10—13.
- [4] Zhang S H. Discussion of approach and aspect of grassland use in Loess Plateau of Longdong Region. *Pratacul Sci*, 1997, 14(5): 4—7.
- [5] Yang X M, Kav B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario. *Soil Till Res*, 2001, 59: 107—114.
- [6] Anthony M W, Craeme J B, *et al.* Managing legume leys, residues and fertilizers to enhance the sustainability of wheat yields and nutrient balance 2. Soil physical fertility and carbon. *Soil Till Res*, 2000, 54: 77—89.
- [7] Shan L, Liu Z M, Xin Y Q, *et al.* A Study on the Grass and Field Crops Rotation in Mountain Region of Southern Ningxia 1. The Production and Benefit of Different Rotation System. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(4): 60—68.
- [8] Wang Q S, Zhang Y F, Su J K. Review on alfalfa-crop rotations. *Eco-agriculture Research*, 1999, 7(3): 35—38.
- [9] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 404—411.
- [10] Han S F. Characteristics of soil water utilization of alfalfa grassland on mountainous area of south Ningxia. *Pratacultural Science*, 1990, 7(5): 47—53.
- [11] Liu P S, Li J, Jia Z K, *et al.* Study on soil water consume principle of alfalfa grassland and resume effects after grains rotation in mountain region of southern Ningxia. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, (9): 270—274.
- [12] Guo Z S, Shao M A. Soil Water Carrying Capacity of Vegetation and Soil Desiccation in Artificial Forestry and Grassland in Semi-arid Regions of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(8): 1640—1646.
- [13] Chen H S, Shao M A, Wang K L. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, (10): 2491—2498.
- [14] Yang W Z, Yu C Z. Regional management and assessment in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1992. 62—63.
- [15] Cheng J M, Wan H E, Wang J, *et al.* Over depletion and recovery of soil moisture on *Astragalus adsurgens* grasslands in the loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2979—2983.
- [16] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91—101.
- [17] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433—438.
- [18] Li Y S. Effects of forest on water cycle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427—432.
- [19] Wang L, Shao M A, Hou Q C. Preliminary Research on Measured Indexes of Dried Soil Layer. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 87—90.
- [20] Yang W Z, Shao M A. Study on Soil Moisture in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000. 10: 174—177.
- [21] Yang W Z. Soil water ecological environment of artifical forestry and grassland in the Loess hilly area. *Memoir of NISWC, Academia Sinica and*

Ministry of Water Conservancy, 1985, (2): 18—28.

- [22] Liu Z M, Shan L, Deng X P, *et al.* Study on Grass-Grain Crop Rotation System in South Ningxia Hilly Area-Field Water Balance under Different Crop Rotation System. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 7(4): 67—71.
- [23] Wang Z Q, Liu B Y, Lu B J. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1944—1950.
- [24] Li J, Chen B, Li X F, *et al.* Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 75—89.
- [25] Cheng J M, Wan H E, Wang J. Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 435—438.
- [26] Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1): 61—65.
- [27] Yang W Z, Shao M A, Peng X D, *et al.* Relationships between environmental desiccation and soil moisture in the Loess Plateau. *Science in China*, Ser. D, 1998, 28(4): 357—365.
- [28] Zhu X M. Soil and agriculture on loess plateau. Beijing: Agriculture Press, 1989. 2—26, 342—365.
- [29] Wang J, Liu W Z, Li F M. Responses of soil water and fertility to the alfalfa crop rotation in semiarid loess area of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 44(1): 179—183.
- [30] Shen Y Y, Nan Z B, Gao C Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of soil water dynamics and crop yield response from a 4-year of lucerne and winter wheat rotation system in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 640—647.

参考文献:

- [1] 孙建华,王彦荣. 国内主要苜蓿品种产量品质及多样性研究. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 803—808.
- [2] 王无怠. 草田轮作新进展. *草业科学*, 1988, 5(2): 1—3.
- [3] 鲁鸿佩,孙爱华. 草田轮作对粮食作物的增产效应. *草业科学*, 2003, 20(4): 10—13.
- [4] 张少华. 陇东黄土高原干旱草地利用方向和途径的探讨. *草业科学*, 1997, 14(5): 4—7.
- [7] 山仑,刘忠民,辛业全,等. 宁南山区草田轮作研究 I. 不同轮作方式的生产力及效益. *水土保持学报*, 1992, 6(4): 60—68.
- [8] 王庆锁,张玉发,苏加楷. 苜蓿-作物轮作研究. *生态农业研究*, 1999, 7(3): 35—38.
- [9] 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.
- [10] 韩仕峰. 宁南山区苜蓿草地土壤水分利用特征. *草业科学*, 1990, 7(5): 47—52.
- [11] 刘沛松,李军,贾志宽,等. 宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究. *中国农学通报*, 2005, (9): 270—274.
- [12] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. *生态学报*, 2003, (8): 1640—1647.
- [13] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. *生态学报*, 2005, (10): 2491—2498.
- [14] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992: 62—63.
- [15] 程积民,万惠娥,王静,等. 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—2983.
- [16] 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.
- [17] 杨文治. 黄土高原水资源与植树造林. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433—438.
- [18] 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.
- [19] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 87—90.
- [20] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. 107—111.
- [21] 杨文治. 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集刊*, 1985, (2): 18—28.
- [22] 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.
- [23] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究. *生态学报*, 2003, 23(9): 1944—1950.
- [24] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应. *生态学报*, 2007, 27(1): 75—89.
- [25] 程积民,万惠娥,王静. 黄土丘陵区苜蓿生长与土壤水分变化. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 435—438.
- [26] 樊军,郝明德,邵明安. 黄土旱塬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—65.
- [27] 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(4): 357—365.
- [28] 朱显谟主编. 黄土高原土壤与农业. 北京: 农业出版社, 1989. 2—26, 342—365.
- [29] 王俊,刘文兆,李凤民. 半干旱区不同作物与苜蓿轮作对土壤水分恢复与肥力消耗的影响. *土壤学报*, 2004, 44(1): 179—183.
- [30] 沈禹颀,南志标,高崇岳,等. 黄土高原苜蓿-冬小麦轮作系统土壤水分时空动态及产量响应. *生态学报*, 2004, 24(3): 640—647.