

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

王美艳¹, 李 军^{1,2}, 孙 剑¹, 王学春¹, 方新宇¹, 任晶晶¹

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 实地测定了黄土高原半干旱区固原不同生长年限苜蓿草地和连作 8a 苜蓿草地翻耕轮作不同年限粮食作物后深层土壤水分特征, 分析了苜蓿草地土壤干燥化特征和粮草轮作对土壤水分的恢复效应。结果表明: (1) 苜蓿连作 1a、5a、8a 和 12a 等 4 类苜蓿草地 0~1000cm 土层平均土壤湿度值为 6.6%, 平均土壤水分过耗量 702.8mm, 平均土壤干燥化速率 147.1mm/a, 达到强烈干燥化程度, 苜蓿连作 5a 土壤干层深度超过 1000cm, 苜蓿连作 8a 土壤干层深度超过 1360cm, 苜蓿草地合理利用年限为 7a。(2) 连作 8a 苜蓿草地翻耕并轮作 4~7a 和 25a 粮食作物等 5 类粮田 0~1000cm 土层土壤湿度介于 6.74%~11.95%, 土壤贮水量恢复值介于 210.6~887.3mm, 平均土壤水分恢复速率为 80.8mm/a。轮作 6a 后粮田土壤干层轻度恢复程度以上深度达到 1000cm。通过粮草轮作使苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤稳定湿度需要 13a 以上。黄土高原半干旱区适宜的粮草轮作模式为: 7a 苜蓿 13a 粮食作物。

关键词: 黄土高原; 半干旱区; 苜蓿草地; 土壤干层; 粮草轮作; 土壤水分恢复

文章编号: 1000-0933 (2009) 08-4526-09 中图分类号: S152.7 文献标识码: A

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

WANG Mei-Yan¹, LI Jun^{1,2}, SUN Jian¹, WANG Xue-Chun¹, FANG Xin-Yu¹, REN Jing-Jing¹

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

2 State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (8): 4526 ~ 4534

Abstract: Soil water consumption characteristics of deep soil profile on different growth age alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotation fields were investigated and analyzed at Guyuan of semi-arid areas of the Loess Plateau. The results showed as follows: (1) Average soil moisture in 0 - 1000cm soil profile on 4 kinds of 1 - 12 year-old alfalfa grasslands was 6.6%, and soil water overuse amount was 702.8mm, and soil desiccating rate was 147.1mm per year, the soil desiccation intensity was strong desiccated. Thickness of desiccated soil layers was over 1000cm on the 5 year-old alfalfa grassland, and it was over 1360cm on 8 year-old alfalfa grassland. Suitable age for alfalfa grassland use was 7 year-old. (2) Soil moisture in 0 - 1000cm soil profile on 5 kinds of 4 - 7 years and 25 years alfalfa-grain crop rotation fields ranged from 6.74% to 11.95%, and soil water restoration amount was 210.6 - 887.3mm, and average soil water restoring rate was 80.8mm per year. Depth of restored soil layers over slight restoration intensity was over 1000cm on rotated grain crop fields for 6 years. Required years for soil moisture of desiccated soil layers restored to local soil stable moisture by alfalfa-grain crop rotations was over 13 years. Suitable alfalfa-grain crop rotation on the semi-arid area was 7 years alfalfa and 13 years grain crops.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771280, 30471024); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10501-180)

收稿日期: 2008-09-11; 修订日期: 2009-05-12

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

Key Words: the Loess Plateau; semi-arid area; alfalfa grassland; desiccated soil layer; alfalfa-grain crop rotation; soil water restoration

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是黄土高原半干旱区广泛栽培的优质多年生豆科牧草作物。随着退耕还林还草工程发展和“草畜肥粮旱作节水型农业结构调整,紫花苜蓿种植面积逐年扩大^[1,2]。由于紫花苜蓿属于多年生和深根系植物,对土壤水分消耗十分强烈,土壤干燥化现象普遍发生,引起苜蓿生长逐渐趋缓,产草量持续下降,最终出现严重的苜蓿草地退化现象,并制约后续植被或作物生长^[3~8]。退化苜蓿草地需要通过雨季休闲或与耗水量较小的粮食作物轮作等方式,克服和缓解苜蓿草地高强度耗水效应,促进苜蓿草地深层土壤湿度逐步提高和恢复,以便干燥化苜蓿草地的更新和高效再利用^[9,10]。本研究对黄土高原半干旱区不同生长年限苜蓿草地深层土壤水分及苜蓿连作 8a 翻耕后轮作不同年限粮食作物农田的深层土壤水分进行了测定,分析了不同生长年限苜蓿草地深层土壤干燥化特征,探讨了粮草轮作方式对苜蓿草地土壤水分的恢复效应,旨在黄土高原半干旱区苜蓿草地可持续利用提供科学依据。

1 研究方法

1.1 试验点概况

试验点位于宁夏回族自治区固原市原州区彭堡乡,属黄土丘陵半干旱区,地处东经 106°10',北纬 36°5',海拔 1676.0m,年平均气温 6.1℃,10 年积温 2259.7℃,年降水量 455.4mm,年蒸发量 1722.5mm,土壤为黄绵土,田间持水量和凋萎湿度分别为 19%和 5%,土壤容重为 1.30g/cm³。

1.2 土壤湿度测定方法

本文采用空间分布代替时间序列的方法,测定和比较不同生长年限苜蓿草地及苜蓿草地翻耕后轮作粮田的土壤水分状况。于 2008 年 7 月下旬选择苜蓿连作 1a、5a、8a 和 12a 等不同生长年限旱地紫花苜蓿草地和连作 8 年苜蓿草地翻耕后轮作 4~7a 和 25a 等不同年限粮食作物的农田进行深层土壤湿度测定。土壤湿度采用土钻取土烘箱烘干法,取土最大深度为 1000~1360cm,每 20cm 取样 1 次,在 105℃ 烘干至恒重,分别称量湿土重、干土重和铝盒重,最后计算各层土壤重量含水量。

1.3 土壤干燥化强度评价方法

在黄土高原地区,通常以土壤稳定湿度作为判别土壤干燥化的上限指标。土壤稳定湿度是指在黄土高原半干旱气候、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%^[12~14]。本研究中土壤稳定湿度值采用土壤凋萎湿度与田间持水量的平均值计算,该值反应了某一种土壤对水分保持能力的中间状态,不随降水量的年度和季节变化而发生变化^[11]。本研究采用文献^[11]提出的土壤干燥化指数 *SDI* (soil desiccation index) 方法来评价土壤干燥化强度。*SDI* 定义为某一土层实际土壤有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,其含义为某一土层可供植物吸收利用的土壤实际有效含水量占该层土壤正常有效含水量的比重,公式表达为:

$$SDI = \frac{SM - WM}{SSM - WM} \times 100\% \quad (1)$$

式中,*SDI* 为土壤干燥化指数,*SM* 为土壤湿度,*WM* 为凋萎湿度,*SSM* 为土壤稳定湿度。

土壤干燥化强度划分为 6 级:(1) *SDI* = 100%,为无干燥化;(2) 75% < *SDI* < 100%,为轻度干燥化;(3) 50% < *SDI* < 75%,为中度干燥化;(4) 25% < *SDI* < 50%,为严重干燥化;(5) 0 < *SDI* < 25%,为强烈干燥化;(6) *SDI* < 0,为极度干燥化。

1.4 土壤水分恢复程度评价方法

在粮草轮作过程中,干燥化苜蓿草地翻耕后轮作粮田土壤水分得到逐渐恢复,拟采用土壤稳定湿度值作为土壤水分完全恢复的判断指标。为了便于评价粮草轮作对干燥化苜蓿草地土壤水分的恢复效应,本研究提出了一个定量描述土壤水分恢复程度的概念——土壤水分恢复指数 *SWRI* (soil water restoration index),定义为苜蓿草地翻耕后轮作粮田与翻耕前苜蓿草地某一土层土壤有效含水量差值占该层土壤稳定有效含水量与

翻耕前苜蓿草地土壤有效含水量差值的百分数,其含义为粮草轮作田某一土层已恢复土壤有效含水量占应恢复土壤有效含水量的比重,公式表达为:

$$SWRI = \frac{SMG - SMA}{SSM - SMA} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $SWRI$ 为土壤水分恢复指数; SMG 为苜蓿草地翻耕后轮作粮田土壤湿度; SSM 为土壤稳定湿度, SMA 为与翻耕轮作粮田相同生长年限苜蓿草地土壤湿度。

土壤水分恢复程度划分为 6 级: (1) $SWRI = 100\%$, 为完全恢复; (2) $75\% < SWRI < 100\%$, 为极好恢复; (3) $50\% < SWRI < 75\%$, 为良好恢复; (4) $25\% < SWRI < 50\%$, 为中度恢复; (5) $0 < SWRI < 25\%$, 为轻度恢复; (6) $SWRI < 0$, 为无恢复。

2 结果分析

2.1 苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量

固原连作 1a、5a、8a 和 12a 苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值分别为 10.25%、5.94%、5.12% 和 5.07%, 平均值为 6.60%, 明显低于当地土壤稳定湿度值 12.00%, 连作 8a 和 12a 的苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值接近凋萎湿度值 5% (表 1)。四类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤贮水量 (土壤湿度平均值与土壤容重和土壤厚度相乘) 659.1~1332.0mm, 平均值 857.3mm, 土壤有效贮水量 (土壤贮水量与凋萎湿度时贮水量之差) 9.1~682.0mm, 平均值 207.3mm, 土壤水分过耗量 (土壤贮水量与土壤稳定湿度时贮水量之差) 228.0~900.9mm, 平均值 702.8mm, 土壤干燥化速率 (土壤水分过耗量除以生长年限) 为 75.1~228.0mm/a, 平均值 147.1mm/a。随草地生长年限延长, 苜蓿草地土壤干燥化速度减缓, 由 1 年生的 228.0mm/a 降低到 12 年生的 75.1mm/a。

表 1 黄土高原半干旱区不同生长年限苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤含水量比较

Table 1 comparison of soil water amount in 0~1000cm soil layers on different growth age alfalfa grasslands on semiarid areas of the Loess Plateau

草地类型 Alfalfa grassland type	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮水量 Soil water amount (mm)	土壤有效贮水量 Available soil water amount (mm)	每米土层土壤有效贮水量 Available soil water in every 1m soil layer(mm/m)	土壤水分过耗量 Amount of soil water overuse (mm)	平均土壤干燥化速率 Rate of soil desiccation (mm/a)
1a	10.25	1332.0	682.0	68.2	228.0	228.0
5a	5.94	771.8	121.8	12.2	788.2	157.6
8a	5.12	666.1	16.1	1.6	893.9	127.7
12a	5.07	659.1	9.1	0.9	900.9	75.1
凋萎湿度 Wilting moisture	5.00	650.0	0	-	-	-
土壤稳定湿度 Soil stable moisture	12.00	1560.0	910.0	91.0	-	-
田间持水量 Field capacity	19.00	2470.0	1820.0	182.0	-	-

2.2 苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征

固原连作 1a、5a 和 12a 苜蓿草地 0~1000cm 土层及连作 8 年苜蓿地 0~1360cm 土层土壤湿度剖面分布特征如图 1 所示, 并以田间持水量、土壤稳定湿度和凋萎湿度作为对照。1 年生苜蓿草地土壤湿度介于 6.34%~17.09% 之间, 明显高于其它 3 类苜蓿地, 其中 60~460cm 强烈耗水层土壤湿度低于 8%, 460~720cm 土层土壤湿度逐步升高到土壤稳定湿度, 720cm 以下土层土壤湿度均在土壤稳定湿度之上, 若以土壤稳定湿度值作为界定苜蓿草地耗水深度的上限指标, 那么 1a 苜蓿草地最大耗水深度 (或者土壤干层分布最大深度) 已达 720cm 左右。连作 5a、8a 和 12a 苜蓿草地 0~1000cm 土壤湿度分别变动于 3.56%~8.97%、3.34%~8.13% 和 2.84%~8.30% 之间, 整个剖面土壤湿度均小于土壤稳定湿度值, 说明土壤干层分布深度均超过 1000cm。连作 5a 苜蓿草地 180~540cm 土层, 连作 8a 苜蓿草地 120~600cm 和 660~720cm 土层, 连

作 12a苜蓿草地 120~580cm和 600~700cm土层,土壤湿度均在凋萎湿度之下,属极度耗水干燥层。随着苜蓿生长年限的延长,苜蓿草地 0~1000cm土层土壤湿度剖面分布趋于稳定和一致,出现强烈耗水层和极度耗水层,土壤干燥化强度趋于加剧,苜蓿连作 5a后草地最大耗水深度均已超过 1000cm。连作 8a苜蓿地最大测土深度 1360cm,0~1360cm 土层土壤湿度变动于 2.84%~11.67%,平均值为 5.97%,比 0~1000cm 土层土壤湿度平均值 5.12%高 0.85个百分点;1000cm 以下土层土壤湿度先增后减,1120cm 为拐点,土壤湿度未能达到稳定湿度,说明苜蓿连作 8a后最大土壤干层厚度已经超过了 1360cm。

2.3 苜蓿草地土壤干燥化强度评价

固原苜蓿连作 1a、5a、8a和 12a后草地 0~1000cm 土层土壤干燥化指数平均值分别为 75%、13%、2%和 1%,除 1a苜蓿草地为轻度干燥化程度外,其余 3类苜蓿地均达到了强烈干燥化程度(表 2)。由表 2可看出,除 1a苜蓿草地外,其它 3类苜蓿地均出现了极度干燥化土层,并且随生长年限增加,极度干燥化土层厚度增加,但增长速度趋缓;连作 5a、8a和 12a的苜蓿地土壤干层厚度均呈现极度干燥层 >强烈干燥层 >严重干燥层的状况,总土壤干层厚度都达到了 1000cm;连作 8a和 12a的苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤干燥化程度均达到强烈干燥化程度以上。说明在黄土高原半干旱区,苜蓿连作 5a以后草地已经处于相当干燥的土壤水分环境下,种植 1a苜蓿后草地土壤干层深度也已达 720cm,苜蓿草地土壤干燥化速度很快。

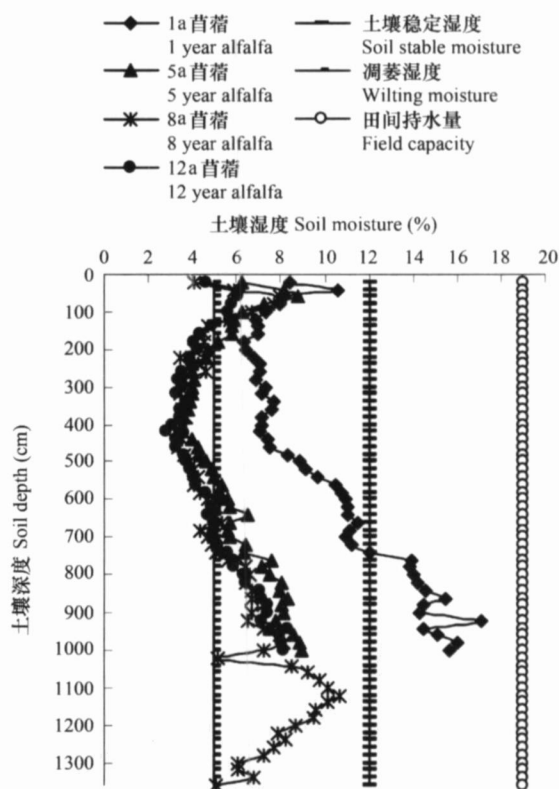


图 1 黄土高原半干旱区固原不同生长年限苜蓿草地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig 1 Comparison of soil moisture distribution in different growth age alfalfa grasslands at Guyuan of semi-arid area on the Loess Plateau

表 2 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化指数、土壤干燥化强度和土壤干层厚度 (cm)

草地类型 Grassland type	平均土壤干燥化指数 Average SDI (%)	土壤干燥化强度 Soil desiccation intensity	极度干燥层 Extreme desiccated soil layer	强烈干燥层 Strong desiccated soil layer	严重干燥层 Serious desiccated soil layer	总土壤干层 Total desiccated soil layer
1a	75	轻度干燥化 Slight desiccated	0	40	420	720
5a	13	强烈干燥化 Strong desiccated	360	320	240	1000
8a	2	强烈干燥化 Strong desiccated	560	300	140	1000
12a	1	强烈干燥化 Strong desiccated	580	240	180	1000
平均 Average	23	强烈干燥化 Strong desiccated	375	225	245	930

2.4 苜蓿草地适宜翻耕年限

苜蓿生长一定年限后需要及时翻耕,缓解土壤干燥化强度,恢复干层土壤湿度,以保证苜蓿草地的可持续利用。在多年生苜蓿生长过程中,单从经济效益考虑,苜蓿生长到 9~10a总产量达到最高点而且花费农业生产时期较短,是翻耕倒茬的最佳时期^[15]。而李玉山认为,单纯以追求高产为目标的草地生产,应调整为以得到适度产量为目标,并缓解或避免土壤下伏干层的形成。所以在确定苜蓿翻耕年限时,要从经济效益和生态效益双方面考虑。

粮食作物根系耗水范围主要在 0~300cm 内,为了保障作物能够正常生长,苜蓿翻耕地 0~300cm 土层湿度要保持在一定水平之上,其下限不应低于凋萎湿度。苜蓿连作 1a、5a、8a 和 12a 后 0~300cm 土层土壤湿度分别为 7.40%、5.64%、5.02% 和 4.64%,对连作 1~12a 苜蓿草地 0~300cm 土壤水分变化拟合回归方程如下:

$$Y = 0.0246X^2 - 0.5682X + 7.9627 \quad R^2 = 0.9982 \quad (3)$$

式中, Y 为土壤重量含水量, X 为苜蓿生长年限。(3)式表明苜蓿草地土壤含水量与生长年限呈现极显著的负相关关系。通过此公式计算得到连作 5~12a 苜蓿草地 0~300cm 土层土壤湿度值分别为 5.70%、5.40%、5.15%、4.96%、4.81%、4.70%、4.65% 和 4.65%。苜蓿连作 8a 0~300cm 土层土壤湿度的实测值和拟合值都处于凋萎湿度边缘,而且苜蓿连作 8a 以后 0~1000cm 土层整体都已经达到严重干燥化程度以上,深厚的土壤干层已经形成,不利于轮作作物生长,所以苜蓿翻耕年限不宜超过第 8 年,再考虑到经济效益,应该在第 7 年收获后及时翻耕轮作,这样既能阻止苜蓿草地土壤水分生态环境进一步恶化,又能为后茬作物生长遗留一定数量的土壤水分,促进苜蓿草地的可持续发展。

2.5 粮草轮作对苜蓿草地土壤水分恢复效应

多年生苜蓿草地所形成的深厚土壤干层,需要通过草地翻耕休闲或与粮食作物轮作破除苜蓿连续高强度耗水效应,促使苜蓿草地土壤干层的土壤湿度逐步恢复。苜蓿连作 8a 后翻耕种植不同年限粮食作物时农田土壤水分剖面特征如图 2 所示,可以直观的看到粮草轮作对苜蓿地 0~1000cm 剖面土壤水分恢复程度。苜蓿草地翻耕并种植粮食作物 4a、5a、6a、7a 和 25a 后, 0~1000cm 土层土壤湿度平均值分别为 6.74%、8.64%、10.48%、10.95% 和 11.95%,在苜蓿草地茬口上种植粮食作物年份越长,土壤水分恢复状况越好,土壤干层得到逐步恢复。土壤水分恢复主要靠降雨蓄水下渗和土壤水库的深层供水。由图 2 可以看出,在 0~1000cm 土壤剖面中,300cm 以上土层和 700cm 以下土层土壤水分恢复较好,表明剖面土壤干层湿度是由上部土层和下部土层向中层逐渐恢复。苜蓿生长 8a 后,在 120~600cm 和 660~720cm 形成两个土壤湿度低于凋萎湿度的极度干燥层,而 0~1000cm 土层土壤湿度均未达到当地土壤稳定湿度。苜蓿草地翻耕轮作粮食作物 4a 后,低于凋萎湿度的极度干燥层明显减小,只存在于 280~520cm 和 560~620cm,原极度干燥层上部和下部已经得到显著恢复;苜蓿草地翻耕轮作粮食作物 5a 后,极度干燥层进一步变薄,只存在于 240~480cm,而苜蓿草地翻耕轮作 6a、7a 和 25a 粮食作物后已经消除了极度干燥层。并且随着翻耕年限增加,深层土壤逐渐达到土壤稳定湿度,达到稳定湿度的土层厚度由下向上逐渐增加。

从土壤湿度恢复速度来看,苜蓿草地翻耕轮作粮食作物 6a 以前,土壤湿度恢复速度较快,而 6a 之后恢复速度减缓。苜蓿草地翻耕轮作粮食作物 25a 后, 0~1000cm 土层土壤湿度平均值达到 11.95%,已经近似等于当地土壤稳定湿度,所以粮草轮作方式对于苜蓿草地土壤干层湿度恢复作用明显。

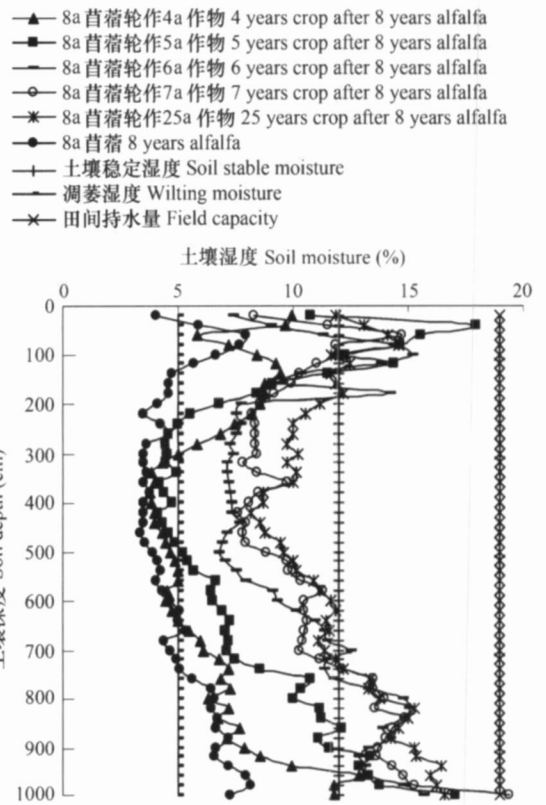


图 2 黄土高原半干旱区固原 8 年苜蓿草地翻耕后轮作粮食作物后土壤湿度剖面分布特征比较

Fig 2 Comparison of soil moisture distribution in different years of rotated grain crop fields after 8 years alfalfa grassland at Guyan of semi-arid area on the Loess Plateau

2.6 苜蓿草地翻耕后轮作粮田 0~1000cm 土层土壤贮水量、水分恢复速度和恢复所需年限

以苜蓿草地连作 8a 后的土壤湿度和土壤稳定湿度分别作为苜蓿草地翻耕轮作粮田土壤水分恢复下限和上限,计算土壤水分恢复速率,预测土壤湿度恢复所需年限。从表 3 可以看出,随翻耕轮作粮食作物年限的增加,土壤湿度逐渐接近稳定湿度,苜蓿草地翻耕轮作 4a、5a、6a、7a 和 25a 粮食作物后,0~1000cm 土层土壤贮水量恢复值(苜蓿草地翻耕后轮作粮田土壤贮水量与连作 8a 苜蓿草地土壤贮水量之差)分别为 210.6、457.7、695.8、757.7mm 和 887.3mm,要继续恢复到土壤稳定湿度时的需水量值(土壤稳定湿度时的贮水量与苜蓿草地翻耕后轮作粮田土壤贮水量之差)分别为 683.3、436.2、198.1、136.2mm 和 6.6mm。依据已恢复水量、待恢复水量和已翻耕年限,可以计算土壤水分恢复速率(恢复水量除以翻耕轮作年限)和土壤水分恢复仍需年数(待恢复水量除以恢复速度)。随苜蓿草地翻耕后轮作粮食作物年限延长,土壤水分恢复速率先增后减,翻耕轮作 6a 的粮田土壤水分恢复速率最大(115.9mm/a),翻耕轮作 25 年的粮田土壤水分恢复速率最小(35.5mm/a),5 类苜蓿草地翻耕轮作粮田的平均恢复速率为 80.8mm/a。若以 5 类翻耕轮作粮田各自的土壤水分恢复速率来算,它们仍分别需要 13.0、4.8、1.7、1.3a 和 0.2a 才能恢复到土壤稳定湿度,总恢复年限为 17.9、8.7、7.8、3a 和 25.2a,平均值为 13.6a;若都以平均土壤水分恢复速率来算,所需年份分别为 8.5、5.4、2.5、1.7a 和 0.1a,总恢复年限分别为 12.5、10.4、8.5、8.7a 和 25.1a,平均值为 13.0a。当轮作粮田土壤湿度恢复到当地土壤稳定湿度后,可再次选择种植苜蓿。由此可以确定,在黄土高原半干旱区固原苜蓿草地上,适宜粮草轮作模式为:7a 苜蓿 13a 粮食作物(苜蓿生长 7a 后翻耕种植粮食作物,粮食作物种植 13a 后可重新种植苜蓿)。

表 3 黄土高原半干旱区 8 年生苜蓿地翻耕后轮作不同年限的粮食作物后农田 0~1000cm 土层土壤含水量比较

Table 3 comparison of soil water amount in 0~1000cm soil layers on different years of rotated grain crop fields after 8 years alfalfa grassland on sem arid areas of the Loess Plateau

轮作粮田类型 Rotated grain crop field type	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤贮水量 Soil water amount (mm)	已恢复贮水量 Restored soil water amount (mm)	待恢复需水量 Water amount required for full restoration (mm)	水分恢复速率 Rate of soil water restoration (mm/a)	土壤湿度恢复 所需年数 Years required for soil water restoration (a)
翻耕轮作 4a 粮田 Plowed and rotated for 4 years	6.74	876.7	210.6	683.3	52.6	13.0/8.5
翻耕轮作 5a 粮田 Plowed and rotated for 5 years	8.64	1123.8	457.7	436.2	91.5	4.8/5.4
翻耕轮作 6a 粮田 Plowed and rotated for 6 years	10.48	1361.9	695.8	198.1	115.9	1.7/2.5
翻耕轮作 7a 粮田 Plowed and rotated for 7 years	10.95	1423.8	757.7	136.2	108.2	1.3/1.7
翻耕轮作 25a 粮田 Plowed and rotated for 25 years	11.95	1553.4	887.3	6.6	35.5	0.2/0.1
土壤稳定湿度 Soil stable moisture	12.00	1560.0	-	-	-	-
8 年生苜蓿草地 8 years alfalfa grassland	5.12	666.1	-	-	-	-

2.7 土壤干层水分恢复规律与程度

按照土壤干层水分恢复程度,可将翻耕轮作粮田 0~1000cm 土层土壤剖面划分为 3 层(表 4),0~300cm 为轮作粮食作物的主要耗水层和降水补给层,300~600cm 为翻耕之前形成的强烈干燥层,600~1000cm 为深层土壤水分上升补给层。从表 4 可以看出,300~600cm 土层的土壤湿度恢复度远远低于 0~300cm 和 600~1000cm,此段土壤水分含量最低,位于整个干燥土层中部,降水入渗不到,深层水补给不上,恢复速度缓慢。虽然土壤水分恢复度随翻耕轮作年限的增加而增长,但翻耕 25a 后也仅为 72.5%,只达到良好恢复程度。0~300cm 土层受作物耗水和年际降水的影响,土壤水分恢复度有一定的波动性,但总体上恢复程度较好,5a

以后均达到了极好恢复程度。600~1000cm土层土壤恢复速度最快,恢复程度最好,翻耕轮作粮食作物 6a以后干燥土层已经完全恢复,土壤湿度超过了当地土壤稳定湿度。

整体看,随苜蓿草地翻耕后轮作粮食作物年限的延长,5类翻耕轮作粮田 0~1000cm平均土壤水分恢复度逐年增加,分别达到轻度恢复、良好恢复、极好恢复、极好恢复和完全恢复程度(表5)。5类翻耕轮作粮田达到良好恢复程度以上的土层厚度分别为 240、460、600、980cm和 1000cm,干层土壤水分恢复程度逐年提高,翻耕后轮作 25a粮食作物后整个土层均达到了良好恢复程度以上;达到轻度恢复程度以上的总土层厚度分别为 880、980、1000、1000cm和 1000cm,翻耕后轮作 6a粮食作物以后,土壤水分恢复深度已经达到 1000cm。

表 4 8年生苜蓿地翻耕轮作不同年限粮食作物后农田的 SWRI

Table 4 SWRI in 0~1000cm soil layers on different years of rotated grain crop fields after 8 years growth age alfalfa grassland

土层深度 Soil depth (cm)	翻耕轮作 4a Plowed and rotated for 4 years	翻耕轮作 5a Plowed and rotated for 5 years	翻耕轮作 6a Plowed and rotated for 6 years	翻耕轮作 7a Plowed and rotated for 7 years	翻耕轮作 25a Plowed and rotated for 25 years
0~300	37.7	78.0	77.7	75.6	99.8
300~600	6.4	16.1	45.6	63.3	72.5
600~1000	29.1	81.6	122.0	127.8	138.5
0~1000	24.8	60.8	85.8	92.8	107.1

表 5 黄土高原半干旱区苜蓿草地 0~1000cm土壤平均 SWRI土壤水分恢复程度和恢复土层厚度(cm)

Table 5 Average SWRI, soil restoration degree and thicknesses of water restored soil layers of 0~1000cm profile on alfalfa grasslands in semiarid area of the Loess Plateau

轮作粮田类型 Rotated grain crop field type	平均土壤水分 恢复度 Average SWRI (%)	土壤水分 恢复程度 Soil water restoration degree	完全恢复 Full restoration soil layer	极好恢复 Perfect restoration soil layer	良好恢复 Good restoration soil layer	总恢复土层 Total restoration soil layer
翻耕轮作 4a粮田 Plowed and rotated for 4 years	24.8	轻度恢复 Slight restoration	20	40	180	880
翻耕轮作 5a粮田 Plowed and rotated for 5 years	60.8	良好恢复 Good restoration	220	140	100	980
翻耕轮作 6a粮田 Plowed and rotated for 6 years	85.8	极好恢复 Perfect restoration	340	160	100	1000
翻耕轮作 7a粮田 Plowed and rotated for 12 years	92.8	极好恢复 Perfect restoration	300	280	400	1000
翻耕轮作 25a粮田 Plowed and rotated for 25 years	107.1	完全恢复 Full restoration	380	380	240	1000

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)苜蓿是多年生、深根系、高耗水作物,苜蓿草地土壤干燥化过程十分强烈。固原苜蓿连作 1~12a等 4类苜蓿草地土壤湿度测定结果表明,苜蓿生长年限越长,根系分布越深,对深层土壤水分消耗越多,土壤干层厚度越大,土壤干燥化程度越严重。这与程积民^[7]、杜世平^[25]及万素梅^[22]等的研究结果一致。在本研究中,连作 5a之后苜蓿草地 0~1000cm土层土壤湿度剖面分布趋于稳定和一致,最大耗水深度均已超过 1000cm,连作 8a苜蓿草地耗水深度超过了 1360cm。由于苜蓿草地土壤水分最大测定深度尚未突破土壤干层最大分布深度,因而半干旱区苜蓿草地最大干层分布深度应该在 1400cm以上,今后需要进一步加深苜蓿草地土壤水分测定深度,以确定半干旱区苜蓿草地最大耗水深度,评价苜蓿草地根系深层耗水能力和土壤干燥化程度。此外,本研究根据不同生长年限苜蓿地 0~300cm土层土壤湿度值推算,半干旱区苜蓿适宜利用年限为 7a,和韩仕峰和刘沛松等提出的半干旱区苜蓿草地最佳利用年限较为接近^[4,17,18]。

(2)实行粮草轮作是半干旱区苜蓿草地土壤水分恢复的重要途径,粮草轮作年限越长,土壤水分恢复效

果越好^[9~11, 18, 21, 22]。但因苜蓿草地翻耕轮作粮食作物试验年限通常较短,缺乏长周期的粮草轮作定位观测数据,粮草轮作土壤水分恢复速度和所需年限并不清楚,因而也无法确定适宜的粮草轮作模式。本研究对固原一般大田生产条件下苜蓿草地轮作不同年限粮食作物后深层土壤水分的实地测定,能够真实反映较长粮草轮作过程中土壤水分恢复过程和结果,推算土壤水分恢复速度、恢复程度和恢复时间,以期能粗略描述粮草轮作的土壤水分恢复进程,选择与当地降水资源相适应的适宜粮草轮作周期。本研究中,半干旱区苜蓿草地翻耕后轮作粮食作物的适宜年限为 13a,这和本课题组依据降水量和作物耗水量推算的半干旱区粮草轮作所需年限为 11a^[11],比较接近。目前,正在利用作物模拟模型定量模拟苜蓿粮食作物轮作过程中土壤水分恢复动态,能够较为精确的评价粮草轮作过程中土壤水分恢复效应和适宜粮草轮作顺序。

3.2 结论

(1)在黄土高原半干旱区固原,苜蓿连作 1~12a后 4类苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤湿度平均值为 6.6%,土壤水分过耗量平均值 702.8mm,土壤干燥化速率平均值 147.1mm/a,土壤干燥化指数平均值为 23%,达到强烈干燥化程度。连作 5a以后苜蓿草地最大耗水深度均已超过 1000cm,连作 8a苜蓿草地最大耗水深度超过了 1360cm。苜蓿草地最大利用年限为 7a,此后应翻耕并轮作粮食作物,以缓解土壤干燥化威胁,促进土壤水分逐渐恢复。

(2)在黄土高原半干旱区固原,连作 8a苜蓿草地翻耕并轮作 4~25a粮食作物后,5类轮作粮田 0~1000cm 土层土壤湿度平均值介于 6.74%~11.95%,土壤贮水量恢复值分别为 210.6~887.3mm,土壤水分恢复速率平均值为 80.8mm/a。与粮食作物轮作年限越长,土壤水分恢复程度越好,轮作粮田 0~1000cm 剖面土壤水分分别由上层和下层逐渐向中层恢复,轮作 6a后轻度恢复程度以上土层深度达到 1000cm。通过粮草轮作使苜蓿草地土壤湿度恢复到当地土壤稳定湿度需要 13a以上,适宜的粮草轮作模式为:7a苜蓿 13a粮食作物。

References:

- [1] Zhu X N, Guo J X, Liang C Z, *et al*. Irrigation effects on the yield of alfalfa and soil water condition in Huabei plain. *Grassland of China*, 2002, 24 (6): 32 - 37.
- [2] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (3): 404 - 411.
- [3] Li Y S. The properties of water cycles in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3 (2): 91 - 101.
- [4] Han S F. 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.
- [5] 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. *Transaction of CSAE*, 2004, 20 (1): 61 - 64.
- [6] Zhang C X, Hao M D, Wei X R, *et al*. Soil water distribution characteristic of Alfalfa with different planting years in the Gully Region of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10 (6): 604 - 607.
- [7] 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.
- [8] 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): 404 - 411.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Yang W Z, Shao M A. *Research on soil water of the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2000.
- [13] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (5): 433 - 438.
- [14] Li Y S. Effects of forest on water cycle on the loess plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (5): 427 - 432.

- [15] Liu P S, Li J, Jia Z K. Soil water study of alfalfa grass water consume disciplinary and resume effect while grain-grass rotation in the arid regions of southern Ningxia. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21 (9): 270 - 274.
- [16] 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.
- [17] Liu P S, Jia Z K, Li J. A study on optimal duration of *Medicago sativa* growth in M. *sativa*-grain crop rotation system in arid region of Southern Ningxia. *Pratacultural Science*, 2008, 17 (3): 31 - 39.
- [18] Liu P S, Jia Z K, Li J, *et al*. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (1): 183 - 191.
- [19] Shen Y Y, Nan Z B, Gao C Y, *et al*. Spatial and temporal characteristics of soil water dynamic sand crop yield response from a Lucerne and winter wheat rotation system in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (3): 640 - 647.
- [20] Li J, Chen B, Li X F, *et al*. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (4): 1429 - 1445.
- [21] Chen H S, Shao M A, Wang K L, *et al*. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (10): 2491 - 2498.
- [22] Wan S M, Jia Z K, Han Q F, *et al*. Dry soil layer forming and soil moisture restoration of alfalfa grassland in the semi-humid region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (3): 1045 - 1051.
- [23] Wang X L, Chen M C, Li F M, *et al*. Water restoration of dry soil layers in the Loess Plateau and crop response. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (1): 1 - 4.
- [24] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, *et al*. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid of Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (11): 77 - 83.
- [25] Du X P, Wang L F, Long M X. Study on soil moisture and yield dynamic of Arid Alfalfa Grassland in Mountain Areas of Southern Ningxia. *Pratacultural Science*, 1999, 16 (1): 12 - 17.

参考文献:

- [1] 朱香凝, 郭继勋, 梁存柱, 等. 华北平原地区灌溉对苜蓿产量及土壤水分的影响. *中国草地*, 2002, 24 (6): 32 ~ 37.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 ~ 53.
- [5] 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份生态环境效应. *农业工程学报*, 2004, 20 (1): 61 ~ 64.
- [6] 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. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (6): 604 ~ 607.
- [7] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. *应用生态学报*, 2005, 16 (3): 435 ~ 438.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 杨文治, 邵明安编著. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, 21 (9): 270 ~ 274.
- [16] 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.
- [17] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究. *草业科学*, 2008, 17 (3): 31 ~ 39.
- [18] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 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. *生态学报*, 2008, 28 (1): 183 ~ 191.
- [19] 沈禹颖, 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.
- [20] 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. *生态学报*, 2008, 28 (4): 1429 ~ 1445.
- [21] 陈洪松, 邵明安, 王克林, 等. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. *生态学报*, 2005, 25 (10): 2491 ~ 2498.
- [22] 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. *生态学报*, 2008, 28 (3): 1045 ~ 1051.
- [23] 王晓凌, 陈明灿, 李凤民, 等. 黄土高原土壤干层水分恢复与作物产量响应. *水土保持研究*, 2007, 14 (3): 1 ~ 4.
- [24] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵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.
- [25] 杜世平, 王留芳, 龙明秀. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究. *草业科学*, 1999, 16 (1): 12 ~ 17.