

黄土高原地区不同草地退耕模式
水分利用效率的比较

刘孝利¹ ,李凤民² ,曾昭霞² ,陈求稳¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 ,北京 100085 ;
2. 兰州大学干旱与草地教育部重点实验室农业生态研究所 ,兰州 730000)

摘要 :研究了半干旱黄土高原区不同退耕模式下植被恢复的比较 ,对 3 种不同人工豆科牧草多年生紫花苜蓿 alfalfa (*Medicago sativa*) ,多年生沙打旺 erect milkvetch (*Astragalus adsurgens*) ,2 年生草木樨 sweetclover (*Melilotus officinalis*) 和一种自然撂荒 (fallow) 进行了实地种植比较。通过 3a 研究发现 ,紫花苜蓿是耗水最严重的牧草 ,水分利用效率仅高于撂荒 ;沙打旺具有最高的地上总生物量和水分利用效率。紫花苜蓿和沙打旺地块中杂草生物量逐年降低 ,物种数量最低且没有增加。2 年生草木樨地物种数和地上生物量逐年增高 ,草木樨对暴雨的入渗贮存能力最大 ,显著高于自然撂荒。草木樨结束生活史后第 1 年地上总生物量 (和撂荒一样全为杂草) 是撂荒地的两倍 ,且略高于紫花苜蓿的地上总生物量 ,同时物种数量也和物种数目最多的撂荒地没有显著差异 ($p < 0.05$)。草木樨显著降低了 10 ~ 40cm 土壤剖面的容重 ,草木樨结束生活史后残留根系有助于深层土壤水分恢复 ,水分状况恢复良好且优于紫花苜蓿和沙打旺。可见短期的人工干扰下两年生草木樨的种植有利于促进自然植被的恢复 ,优于自然撂荒和其他牧草种植的方式 ,容易推广且实际可行。

关键词 :黄土高原 ,退耕地 ,植被恢复 ,人工短期干预

文章编号 :1000-0933 (2007) 07-2847-09 中图分类号 :Q143 文献标识码 :A

Comparisons of water use efficiency under different conversion models of
cropland to grassland in the Loess Plateau of China

LIU Xiao-Li¹ ,LI Feng-Min² ,ZENG Zhao-Xia² ,CHEN Qiu-Wen¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology , Research Center for Eco-Environmental Sciences , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085 , China
2 Key Laboratory of Arid and Grassland Agroecology , Ministry of Education , Lanzhou 730000 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2847 ~ 2855.

Abstract : This study was conducted to explore the ecological restoration effects of the different conversion models of cropland to grassland in the semiarid Loess Plateau of China. One natural vegetation recovery model , the fallow (Fa) , and three human short-term grass-seeding perturbation models are investigated. The three perturbation models include perennial legume grass of alfalfa *Medicago sativa* (Ms) , two-year life history legume grass of sweetclover *Melilotus officinalis* (Mo) and perennial legume grass of erect milkvetch *Astragalus adsurgens* (Aa). All the plots were to recover naturally and were enclosed to avoid grazing and harvesting. The experiments were continued for 3 years. The Mo significantly decreased soil bulk density and facilitated the following wild weed vegetation growth and species recovery after Mo finished its life history.

基金项目 : 农田生态系统多目标协调方法与模型 (2005CB121107) ; 李嘉诚基金会西部教育科研项目

收稿日期 : 2006-10-19 ; 修订日期 : 2007-07-06

作者简介 : 刘孝利 (1979 ~) 男 , 安徽人 , 博士生 , 主要从事土壤生态学及其流域生态学研究。E-mail : zzhxll@163.com

Foundation item : The project was financially supported by Harmony methods and models of multi-objects in agroecosystem (No. 2005CB121107) , Li kashing foundation

Received date 2006-10-19 ; **Accepted date** 2007-07-06

Biography : LIU Xiao-Li , Ph. D. , mainly engage in soil ecology and drainage area ecology. E-mail : zzhxll@163.com

The wild weed biomass and water use efficiency (WUE) of Mo in the first year after its life history finished were twice as much as that of Fa. The Mo also has the highest water recharge efficiency during rainfall events, especially in storms at growing stage. The remained Mo root system facilitated the soil moisture recovery in deep soil. WUE in the Mo was higher than that in Fa and Ms, but it is lower than that in Aa. The Ms has the worst soil moisture condition in deep soil. Wild weed biomass decreased yearly and species has no change in Ms and Aa. It was found that Fa has the best soil water condition but the worst WUE and the lowest aboveground biomass. Therefore, appropriate short-term human perturbation of Mo has positive effects on the vegetation recovery efficiency and was easy to be applied to a large area in the semiarid region of Loess Plateau.

Key Words : Loess Plateau ; abandoned cropland ; vegetation recovery ; short-term human perturbation

土地利用变化是全球变化的一个最重要现象^[1], 直接与食品安全^[2]、水和土壤质量有密切关系^[3~5]。土地利用变化与土壤质量, 包括土壤微生物活动变化同时发生^[6,7], 对土壤养分提高和降低有重要影响^[8,9]。

黄土高原丘陵沟壑区是世界上侵蚀最严重的区域^[10~12], 也是世界上最大的黄土区^[13]。严重的土壤侵蚀带走大量的土壤颗粒和养分^[14,15], 破坏了土壤的物理特性, 如土壤容重增加, 团聚体稳定性和水保持能力下降^[16], 通常称“土壤结构退化”。土壤结构(包括广义的土壤过程、土壤物理状况和土壤功能^[17,18])退化通常预示了土壤空隙度和土壤气孔导度的下降, 对土壤空气和水力特征以及植物生长都有负面影响^[19]。

针对西部生态环境退化现状, 提出了“退耕还林还草”的策略, 包括中西部的 10 个省中 363 个县市。工程规划为 2001 年到 2010 年, 还林还草的目的在于重建中西部尤其是黄河中上游地区的生态环境^[20], 通过植被恢复可以阻滞径流, 减少径流的侵蚀性, 提高土壤的抗侵蚀能力^[21~23]。然而由于黄土高原地区严重的干旱气候, 土壤水分成为植被恢复的主要限制因子^[24~26], 如何在时间和空间上合理管理水资源是该区最大的挑战和难题^[27]。黄土高原地区的集雨技术, 如覆膜、沟垄集水等, 基本针对如何充分利用分布不均的降雨资源以及减少径流的问题^[28,29]。然而这些研究都是在小面积的试验基础上取得成果, 同时长期覆膜干扰了土壤的有机和无机因子的平衡, 并可能危害土壤的质量、持续性和稳定性^[30], 使得一些成果无法应用到实践中去。因此, 研究黄土高原地区土壤水分动态依然是该地区植被恢复必要的因素。

本实验重点研究在 4 种不同的退耕还草方式对土壤水分、土壤容重、生物量和物种数量恢复的影响, 从而阐明不同退耕方式土壤水分动态和水分利用效率变化, 寻求有效的退耕还草方式, 从一个新角度分析人工短期干预造成的土壤水分亏缺。

1 材料和方法

1.1 实验地点描述

实验地点位于甘肃榆中连川地区, 地处北纬 N 36.2°, 东经 E 104.3°, 海拔在 2300~2500m 之间。该地区为中温带半干旱气候, 年平均气温为 6.5℃, 最高气温 19.5℃, 最低气温 -8.0℃。近 10a (1993~2003 年) 的平均降雨(雪)量为 328mm, 自由水面蒸发量为 1320mm, 基本没有地下水源。该地区土壤主要特性如表 2 所示。

实验地为坡顶弃耕地, 坡度从 12°到 0°, 海拔 2439m, 土壤 pH 值 8.1, 平均田间持水量 22.9%, 永久萎蔫土壤水分含量 6.2%。表 1 给出了实验期间的降雨分布情况。

1.2 实验设计及土样采集测定

实验地弃耕前(2002 年)种植作物为小麦, 2003 年 4 月 12 日, 本研究设计了 4 种不同退耕还草模式: 自然撂荒(fallow)和播种 3 种不同豆科牧草(多年生紫花苜蓿、沙打旺和 2 年生的草木樨)。3 种牧草草籽播种量分别为 22.5, 11.3, 37.5 kg/hm², 播种后禁止放牧和收割。每个实验地块面积为 1400 m² (35 m × 40 m), 坡度均为 12°渐变为 0°, 沿地势从坡顶平行种植以避免径流的互相输入而互相干扰。

土样均用直径 8cm 的土钻获得, 在样地中心以三角形分布 3 次重复取样, 并注意样地标记保护, 尽量减

小取样误差。土壤水分采用传统的烘干法测定,土壤容重依据 Robertson *et al*^[31]描述的方法测定弃耕开始时的背景值和 3a 后不同退耕方式下 40cm 土层容重变化。

表 1 2003 ~ 2005 年每月降雨量 (mm) 分布
Table 1 Distribution of rainfall (mm) at the experimental site at 2003 ~ 2005

年份 Year	月份 Month												降雨总量 Total (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2003	4.3	0	15.7	26.2	55.7	50.8	43	42.1	32.7	51.4	12	0	333.9
2004	0	0	0	3.5	26.6	20.4	57	54	16.6	13.8	5.8	0	197.7
2005	1	11.8	20.3	6.2	55.1	54.7	90.9	26.1	27.6	26.5	0	0	320.2

表 2 实验地区土壤基本特性
Table 2 Basic properties of the soil in this experimental site

土层深度 Soil depth (cm)	SOC (%)	TN (%)	TP (%)	AP (mg/L)	pH	土壤颗粒组分 Particles components (%)①			CEC (m. e/100g)	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)
						2.0 ~ 0.02 (mm)	0.02 ~ 0.002 (mm)	<0.002 (mm)		
0 ~ 20	0.53	0.065	0.063	7.0	8.5	33.72	48.15	17.32	9.1	1.17
20 ~ 40	0.44	0.056	0.067	6.0	8.4	33.80	48.85	27.97	6.8	1.21

CEC 阳离子交换容量 ;SOC 土壤有机碳 ;TN 总氮 ;TP 总磷 ;AP 有效磷 Data quoted from Gansu Soil Record , edited by soil general investigation office , Gansu Province , published by Gansu Science and Technology Press ,1993 ;CEC : Cation Exchange Capacity ;SOC : soil organic carbon ;TN : total nitrogen ;TP : total phosphorous ;AP : available phosphorous

物种数量和地上生物量通过样方采集获得,样方大小为 0.5m×0.5m,以梅花形分布 5 次重复取样,并记录样方内所有杂草种类。杂草生物量与人工豆科牧草生物量分开,采用 105℃ 杀青 0.5h,然后 80℃ 烘 72h 以上直至恒重,测定地上杂草生物量和牧草生物量,统计总生物量和总物种数。

1.3 数据统计分析

所有数据通过预处理之后,采用 SPSS12.0 进行分析,包括均值和方差之间的差异性,下面各表给出分析的结果。

2 结果

2.1 不同退耕方式下土壤水分动态

弃耕后 2003 至 2004 年的第 1 年,撂荒地 2m 土壤水分贮存量稍有增加,草木樨和紫花苜蓿显著降低 ($p < 0.05$) (表 3)。紫花苜蓿和草木樨两种退耕方式土壤水分消耗已经超过 2m 的深度 (图 1),2003 ~ 2005 年跟踪研究期间紫花苜蓿深层土壤水分状况最差,低于草木樨和沙打旺,并显著低于撂荒地 (图 1 ~ 图 3)。

表 3 给出了 2004 年几次强降雨前后不同退耕方式下土壤对雨水资源入渗贮存效率的比较。7 月 19 日雨季前测定了背景值,发现紫花苜蓿 0 ~ 2m 土壤水分亏缺最为严重,2m 水贮量显著低于其他退耕恢复方式,亏缺程度为紫花苜蓿 > 草木樨 > 沙打旺 > 撂荒,撂荒地土壤水分状况最好,与弃耕开始时没有显著差异 ($p < 0.05$)。7 月 19 日到 8 月 22 日时间段内,出现了几次暴雨并有径流产生,测得降雨入渗贮存增量撂荒地最差 (61.7mm),显著低于 3 种人工豆科草地 ($p < 0.05$);草木樨地的入渗增量最高,而且 3 种人工草地之间没有显著差异 (表 3,图 2)。在草木樨生活史结束时 (2004 年 10 月),土壤 2m 水分贮量显著低于撂荒,经过 2004 年 9 月至 2005 年 4 月的休闲期后,草木樨地 1m 以下土壤水分迅速恢复,水分状况优于沙打旺,0 ~ 80cm 剖面土壤水分含量甚至高于撂荒地 (图 3),草木樨水分贮量恢复量为 23.7mm,显著高于其他 3 种处理 ($p = 0.05$)。

① 根据《甘肃土种志》,甘肃省土壤普查办公室编著,1993

表 3 2003 ~ 2005 年土壤 2m 剖面水分动态 以及暴雨前后不同退耕方式下土壤水分入渗恢复研究比较

Table 3 Soil water dynamics in 2m soil profile from 2003 to 2005 , and the different soil water storage efficiency before/after rain events during the growing stage of 2004 from July to August , in the four patterns of conversing abandoned farmland to grassland

项目 Item	土壤水贮量变化 Soil water storage dynamics (mm)			
	Fa	Mo	Ms	Aa
Apr. 2003	192.8 ^{aA} ± 10.2	187.6 ^{aA} ± 9.2	185.3 ^{aA} ± 3.7	190.9 ^{aA} ± 8.0
Apr. 2004	215.9 ^{aA} ± 7.3	160.6 ^{acB} ± 12.7	161.8 ^{bB} ± 9.4	182.9 ^{aA} ± 14.7
Jul 19. 2004	207.4 ^{aA} ± 4.0	149.9 ^{bcB} ± 6.4	130.1 ^{cC} ± 4.9	163.1 ^{bBD} ± 9.7
Aug 22. 2004	269.1 ^{bA} ± 7.9	259.0 ^{cA} ± 20.9	229.2 ^{dB} ± 17.5	254.4 ^{cA} ± 15.9
增量 Increments (mm)	61.7 ^A	109.1 ^B	98.1 ^B	90.9 ^B
Oct. 2004	241.3 ^{cA} ± 12.6	185.7 ^{aB} ± 4.8	161.3 ^{bC} ± 7.3	167.6 ^{dB} ± 9.5
Apr. 2005	238.5 ^{cA} ± 7.8	209.4 ^{dA} ± 5.1	169.7 ^{bB} ± 5.8	185.4 ^{cA} ± 10.7
Oct. 2004 ~ Apr. 2005 土壤水分恢复增量 Soil water recharge storage (mm)	-2.8A	23.7C	8.4B	11.8B

同行含相同大写字母、同列含相同字母表示平均值差异不显著 ($P < 0.05$) , Ms :紫花苜蓿 ;Mo :草木樨 ;Aa :沙打旺 ;Fa :自然撂荒 ;下同
Means within the same row followed by the same letter (upper case) or within the same column (lower case) are not significantly different at $P < 0.05$;
Ms : alfalfa (*Medicago sativa*) grassland ; Mo : sweetclover (*Melilotus officinalis*) grassland ; Fa : fallow ; and Aa : erect milkvetch (*Astragalus adsurgens*) grassland ; the same below

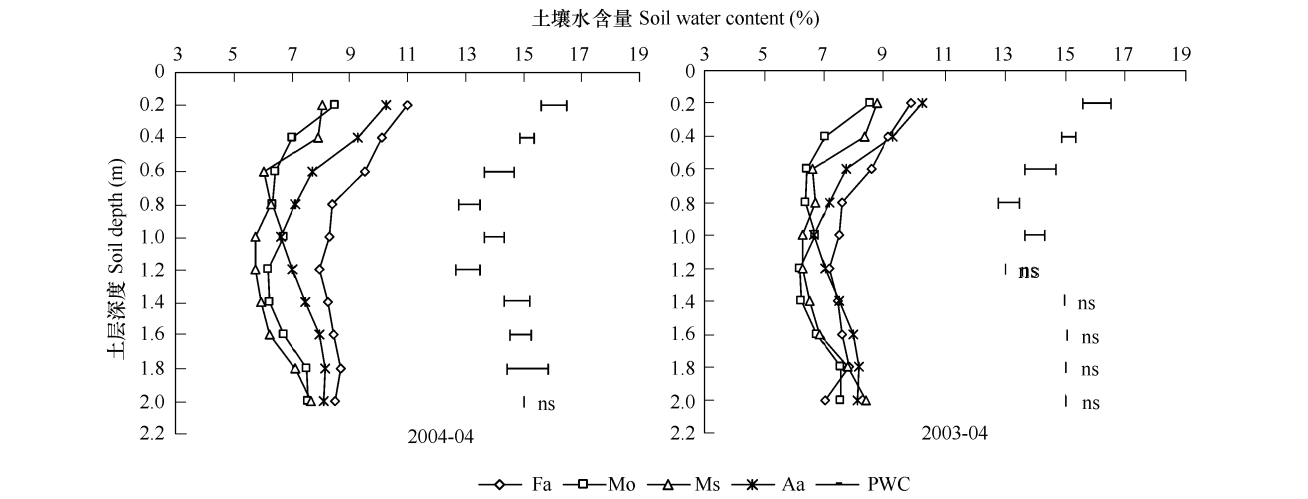


图 1 退耕后第 1 年土壤 2m 剖面水分消耗状况的比较

Fig. 1 Soil water moisture distribution in 2m soil profile in four models of managing abandoned farmland

PWC 永久萎蔫点水分含量值 ,下同 ns 0.05 水平无显著差异 PWC : permanent wilting soil water content , the same below ; Error bars are the L. S. D. at $P = 0.05$, ns : no significant difference

2.2 不同退耕方式对地上生物量、水分利用效率和物种数恢复的影响

2.2.1 生长季水分消耗量的计算

由于该研究基于实地退耕还草长期跟踪试验 ,围栏禁止畜牧收割 ,除了牧草播种人工短期干预 ,皆任其自然生长恢复 ,基本剔除人为干扰。鉴于缺乏暴雨径流数据 ,本研究提出牧草生长季水分消耗量的粗略估算方程 (1) 以及径流估算方程 (2) :

$$WA = P + \Delta SWBA + \Delta SW - R \tag{1}$$

$$R = Pd - \Delta SWBA \tag{2}$$

式中 ,WA 为生长季 (每年 4 月中旬至 9 月底)生物量形成的水分消耗量 ;P 为生长季内降雨总量 ;ΔSWBA 为暴雨 (指有径流产生的强降雨)前后 2m 土壤水分贮量变化值 ;ΔSW 为生长季 2m 土壤水分变化量 ;R 为暴雨

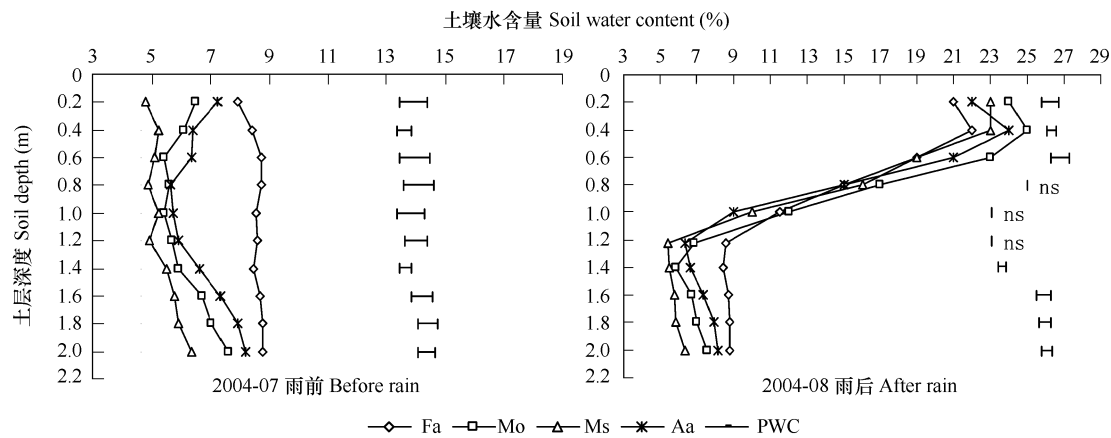


图2 不同退耕方式对短期强降雨的入渗贮存分析

Fig. 2 The infiltration storage efficiency of rainstorm (runoff occurs) in 2m soil profile of four models of managing abandoned farmland
ns 0.05 水平无显著差异 Error bars are the L. S. D. at $P = 0.05$, no significant difference

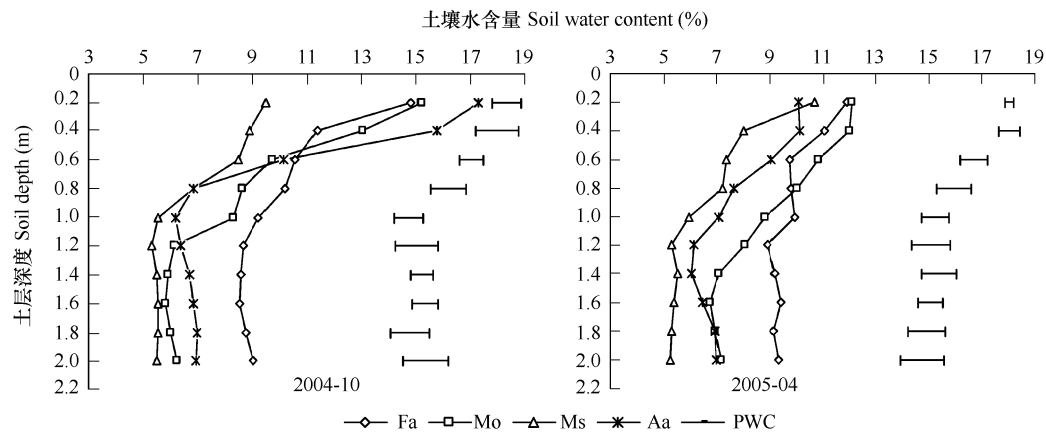


图3 草木樨生活史结束后,土壤水分的恢复状况

Fig. 3 Soil water restoration during the subsequent fallow of October 2004 to April 2005 after Mo finished its life history
Error bars are the L. S. D. at $P = 0.05$

期间的径流量;Pd 为暴雨期间的降雨量。

2.2.2 地上生物量、水分利用效率与物种恢复动态变化

表4 给出退耕后不同管理方式下地上总生物量、杂草生物量以及物种总数恢复的动态变化。退耕后第1年撂荒地的地上总生物量最低为492.3 kg/hm²,草木樨、紫花苜蓿和沙打旺的地上总生物量分别为(926.8 ± 79.6) kg/hm², (678.3 ± 68.8) kg/hm², (867.9 ± 12.1) kg/hm²,杂草生物量分别为(27.3 ± 6.9), (17.2 ± 4.0), (10.3 ± 4.4) kg/hm² (表4)。紫花苜蓿和沙打旺的杂草生物量在接下来的两年里逐渐降低,2004年分别为(9.6 ± 3.3)和(8.7 ± 5.0) kg/hm²,2005年分别为(7.6 ± 3.2)和(4.6 ± 2.4) kg/hm²。草木樨地中杂草生物量逐年增加,2005年草木樨生活史结束后的第1年地上总生物量(全为杂草)为(2789.4 ± 562.1) kg/hm²,是同年撂荒地总生物量(1230.9 ± 163.9) kg/hm²的两倍,高于紫花苜蓿的地上总生物量(2462.5 ± 441.1) kg/hm² (表4)。

撂荒地的水分利用效率实验期间一直最低,紫花苜蓿仅高于撂荒地,但低于草木樨。沙打旺的水分利用效率最高。水分利用效率因降雨出现波动,除了高耗水的紫花苜蓿,其他3种退耕还草方式下水分利用效率在降雨较多的2005年均低于降雨稀少的2004年(表1,表4)。

物种总数是评价自然生态系统稳定性的重要因子,因此物种数也是退耕方式好坏的重要评估指标。撂荒

地的物种数逐年增加,2005 年显著多于 2003 年 ($P < 0.05$),而且在 2003 和 2004 两年中显著高于其他退耕方式 ($P < 0.05$);草木樨结束生活史后的 2005 年,物种数略低于撂荒地,两者之间没有显著差异 ($P < 0.05$),显著高于紫花苜蓿和沙打旺(表 4)。

表 4 地上生物量、水分利用效率以及物种数对不同退耕还草方式的生态响应

Table 4 Responses of aboveground biomass, water use efficiency and wild weed species to different patterns in conversing abandoned farmland to grassland

处理 Treatments	项目 Item	Aug. 2003	水分利用效率 WUE	Aug. 2004	水分利用效率 WUE	Aug. 2005	水分利用效率 WUE
Fa	总计 Total (kg/hm ²)	492.3 ± 83.1	1.53 ^a	954.0 ± 112.3	3.84 ^a	1230.9 ± 163.9	2.80 ^a
	杂草 Weed (kg/hm ²)	492.3 ± 83.1		954.0 ± 112.3		1230.9 ± 163.9	
	杂草种数 WWS	8 ^{aA}		10 ^{aA}		14 ^{aB}	
Mo	Total	926.8 ± 79.6	2.32 ^b	2412.3 ± 261.5	10.42 ^b	2789.4 ± 562.1	7.59 ^b
	Weed	27.3 ± 6.9		47.7 ± 8.3		2789.4 ± 562.1	
	WWS	5 ^{bA}		7 ^{bA}		12 ^{aB}	
Ms	Total	678.3 ± 68.8	1.69 ^a	1137.7 ± 132.4	5.26 ^c	2462.5 ± 441.1	5.58 ^c
	Weed	17.2 ± 4.0		9.6 ± 3.3		7.6 ± 3.2	
	WWS	5 ^{bA}		5 ^{bA}		6 ^{bA}	
Aa	Total	867.9 ± 12.1	2.37 ^b	3971.9 ± 344.6	19.31 ^d	5297.7 ± 331.7	13.41 ^d
	Weed	10.3 ± 4.4		8.7 ± 5.0		4.6 ± 2.4	
	WWS	4 ^{bA}		6 ^{bA}		5 ^{bA}	

同行含相同大写字母、同列含相同字母表示平均值差异不显著 ($P < 0.05$),Ms:紫花苜蓿;Mo:草木樨;Aa:沙打旺;Fa:自然撂荒 Means within the same row followed by the same letter (upper case) or within the same column (lower case) are not significantly different at $P < 0.05$. Ms:alfalfa (*Medicago sativa*) grassland; Mo:sweetclover (*Melilotus officinalis*) grassland; Fa:fallow; and Aa:erect milkvetch (*Astragalus adsurgens*) grassland; WWS:wild weed species; WUE:water use efficiency;下同 the same below

2.3 不同退耕方式对 0 ~ 40cm 剖面土壤容重的影响比较

土地利用变化,尤其根系发达的牧草会影响土壤容重。农业用地退耕后,不同退耕方式均增加表层 0 ~ 15cm 的土壤容重(图 4)。紫花苜蓿 0 ~ 25cm 土壤容重最大,显著高于其他 3 种退耕方式 ($P < 0.05$)。退耕 3a 后的 2005 年 0 ~ 25cm 土壤容重大小顺序为紫花苜蓿 > 沙打旺 > 撂荒 > 草木樨,25 ~ 40cm 剖面土壤容重大小顺序为撂荒 > 紫花苜蓿 > 沙打旺 > 草木樨。草木樨地 20 ~ 40cm 剖面土壤容重显著低于其他 3 种退耕方式 ($P < 0.05$) 0 ~ 20cm 土壤容重仅略高于退耕前的背景值(图 4)。

3 讨论

土壤水分在半干旱环境下植被恢复工程中起到极其重要的角色。土壤水分在时间和空间上表现出极大的异质性^[32]和地形、土壤、植被以及土地利用上^[33~36]密切相关,因此寻求高效的退耕还草方式是十分重要。通过 3 种人工种植牧草和一种自然撂荒等 4 种退耕还草方式实验发现,撂荒具有最好的土壤水分条件,但是暴雨的入渗贮存量最低(表 3,图 1 ~ 图 3);撂荒地表层 0 ~ 20cm 的土壤容重增加,造成雨水的入渗效率降

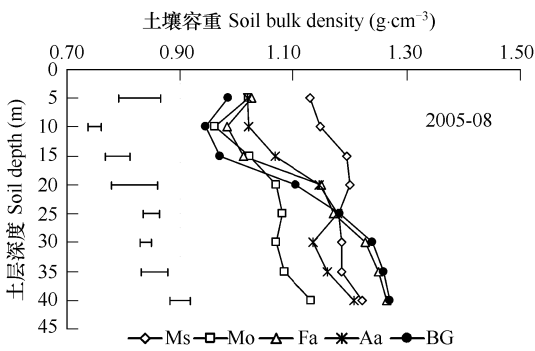


图 4 不同退耕方式对土壤容重的影响

Fig. 4 Soil bulk density changed under different models of managing abandoned farmland
BG:退耕前土壤容重背景值 BG:the original background value at the beginning of the farmland abandoned Error bars are the L. S. D. at $P = 0.05$

低^[13]。紫花苜蓿和草木樨属于高耗水型豆科牧草^[29],退耕的 2003 ~ 2004 两年,紫花苜蓿和草木樨对深层土壤水分的消耗都大于沙打旺,均超过 2m (图 1,图 2)。紫花苜蓿种植 3a 后 0 ~ 25cm 剖面土壤容重显著增加,显著高于其他 3 种退耕方式 ($P < 0.05$)。但相对于撂荒,3 种豆科牧草的种植均能降低 20 ~ 40cm 土壤剖面的容重,种植豆科牧草有利于深层土壤容重降低 (图 4)。实验结果发现,草木樨 20cm 以下土壤容重显著低于其他豆科牧草和撂荒 ($P < 0.05$) (图 4)。表 3 给出,草木樨在强降雨 (期间有径流产生) 前后的土壤水分入渗恢复量最大,显著高于撂荒,与紫花苜蓿和沙打旺无显著差异。可见,两年生的草木樨种植对浅层以及较深层土壤容重的降低以及降雨入渗效率的提高要优于其他牧草,显著高于自然撂荒恢复处理。

关于人工干预下植被恢复方式与自然撂荒植被恢复方式对土壤水分的影响,以及植物根系残留对雨水向土壤深层入渗有了很多研究^[37]。草木樨和紫花苜蓿都能显著降低深层土壤容重,提高土壤对雨水资源入渗的能力,尤其是强降雨期间增加雨水入渗、减少径流的能力 (表 3,表 4)。两年生草木樨结束其生活史后,残留的根系使得深层土壤水分得到很好恢复,撂荒地虽然一直拥有最好的土壤水分条件,由于土壤水分与雨水入渗成负相关关系^[38],因此撂荒地对于雨水资源的入渗利用也是最低,根据公式 (2) 则径流损失量也最大 (表 3,表 4)。

物种多样性、地上生物量 and 水分利用效率是衡量退耕还草效率的重要指标。人为干扰对生态系统的组成和功能有深远的影响^[39],近 3a 的跟踪研究结果发现,撂荒地物种数目逐年增加,前两年显著高于其他人工牧草干预下的退耕方式,但是地上生物量 and 水分利用效率最低 (表 4)。沙打旺与紫花苜蓿两种方式下杂草生物量逐年降低,退耕牧草由于禁止收割和放牧,所以牧草占绝对优势,造成杂草入侵困难,杂草物种数量显著低于撂荒地,沙打旺有最大地上生物量 and 水分利用效率。草木樨地上生物量 and 水分利用效率显著高于紫花苜蓿和撂荒,物种数逐年增加,尤其草木樨生活史结束后 (2005 年 4 月),草木樨地土壤深层水分得到一定程度的恢复 (图 3),同年 8 月地上杂草总生物量是撂荒地的两倍,而且高于紫花苜蓿地上总生物量 (表 4)。可见,两年生草木樨生活史结束后有助于黄土高原区植被恢复,提高对自然降雨的利用效率。

长期研究表明,人工干预对生态系统功能有深远的影响^[39],但生态系统对短期人工干预提高的功能是否具有长期的保持力还少有研究^[40],Thomas Spiegelberger^[41]等研究发现连续 2 ~ 4a 在酸性土壤中施入石灰,70a 后仍然能影响土壤微生物群落的组成。半干旱黄土高原区不同人工干预退耕还草方式对土壤质量、功能和生物群落组成带来什么样的深远影响还非常缺乏研究。因此,长期跟踪研究退耕方式对土壤特性带来的影响对于黄土高原地区植被恢复、土壤生态系统的稳定具有重要的科学价值和积极的意义。

References :

[1] Turner M G. Landscape ecology :the effect of pattern on process. Annual Review of Ecology and Systematics ,1989 ,20 ,171 — 197.

[2] Wilson E O. ed. Biodiversity. National Academy Press , Washington , D C. 1988

[3] Dalal R C ,Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. Soil Tillage Res ,1986 ,24 ,281 — 292.

[4] Bushchbacher R Uhl C ,Serrao E A S. Abandoned pastures in eastern Amazonia II . Nutrient stocks in the soil and vegetation. J. Ecol. ,1988 ,76 ,682 — 699.

[5] Fu B J ,Ma K M ,Zhou H F ,et al. The effect of land use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau. Chin. Sci. Bull. ,1999 ,44 (8) ,732 — 736.

[6] Halvorson A D ,Reule C A ,Anderson R L. Evaluation of management practices for converting grass land back to cropland. Soil Water Conserv ,2000 ,55 ,57 — 62.

[7] Kennedy A C ,Papendick R I. Microbial characteristics of soil quality. Soil Water Conserv ,1995 ,50 ,243 — 247.

[8] Guggenberger G ,Christensen B T ,Zech W. Land use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil. I. Lignin and carbohydrate signature. Eur. J. Soil Sci. ,1994 ,45 ,449 — 458.

[9] Guggenberger G ,Zech W ,Thomas R J. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an oxisol under tropical pastures following

native savanna. Soil Biol. Biochem 1995 ,27 ,1629 — 1638.

[10] Chen Y Z , Luk S H. Sediment sources and recent changes in the sediment load of Yellow River , China. In : Rindwanich , S. ed. Land Conservation for Future Generations. Proceedings of the 5th International Soil Erosion Conference , Ministry of Agriculture , Bangkok , Thailand , 18 — 29 January 1988. Department of Land Development , Bangkok , 1989. 313 — 323.

[11] Fu B. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China. Soil Use Manage 1989 ,5 ,76 — 82.

[12] Fu B , Gulnick H. Land evaluation in an area of severe erosion : the Loess Plateau of China. Land Degradation Rehabilitation 1994 ,5 ,33 — 40.

[13] Fu B J , Wang J , Chen L D , Qiu Y. The effect of land use on soil moisture variation in the Danangou Catchment , the Loess Plateau of China. Catena 2003 ,54 ,197 — 214.

[14] Peng L , Yu C Z. Nutrient losses in soils on Loess Plateau. Pedosphere 1995 ,5 (1) ,83 — 92.

[15] Shi H , Shao M. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. Journal of Arid Environments 2000 ,45 (1) ,9 — 20.

[16] Alegre J C , Cassel D K. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. Agriculture , Ecosystems and Environment 1996 ,58 ,39 — 48.

[17] Dexter A R. Physical properties of tilled soils. Soil and Tillage Research 1997 ,43 (1-2) ,41 — 63.

[18] Dias A C C P , Northcliff S. Effects of two land clearing methods on the physical properties of an Oxisol in the Brazilian Amazon. Tropical Agriculture 1985 ,62 ,207 — 212.

[19] Berger T W , Hager H. Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. Forest Ecology and Management 2000 ,136 ,159 — 172.

[20] UNCCD. China National Report to Implement the United Nation's Convention to Combat Desertification (UNCCD). UNCCD , 2002. 66.

[21] Zhang X C , Liu G B , Fu H F. Soil nitrogen losses of catchment by water erosion as affected by vegetation coverage. Chinese Journal of Environmental Science , 2000 ,21 (6) :16 — 19.

[22] Huang M B , Liu X Z. Regulation effect of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau. Chin. J. Appl. Ecol. , 2002 ,13 (9) :1057 — 1060.

[23] Huang Y L , Chen L D , Fu B J , Zhang L P , Wang Y L. Evapotranspiration and soil moisture balance for vegetative restoration in a gully catchment on the Loess Plateau , China. Pedosphere 2005 ,15 (4) :509 — 517.

[24] Hu L J , Shao M A. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau. Chin. J. Appl. Ecol. , 2002 ,13 (8) :1045 — 1048.

[25] Chen L D , *et al.* The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau , China , Catena (2006) , doi :10. 1016/j. catena. 2006. 08. 007.

[26] Yang W Z , Tian J L. Essential exploration of soil aridization in the Loess Plateau. Acta Pedologica Sinica , 2004 ,41 (1) :1 — 6.

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

[28] Li F M , Zhang Z W. The study on water use of the alfalfa grassland and *Stipa bungeana* grassland in Ningxia Yanchi. Acta Phytoecol. Geobot , 1991 ,15 (4) ,55 — 57.

[29] Li F M , Xu J Z , Sun G J. Restoration of degraded ecosystem and development of water-harvesting ecological agriculture in the semi-arid Loess Plateau of China. Acta Ecol. Sin. 2003 ,23 (9) ,1901 — 1909.

[30] Li F M , Song Q H. Dynamics of microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem , Soil Biology & Biochemistry , 2004 ,36 :1893 — 1902.

[31] Robertson G P , Bledsoe C S , Coleman D C , Sollins P. Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research. New York : Oxford University Press , 1999. 75 — 77.

[32] Gomez-Plaza A , Alvarez-Rogel J , Albaladejo J , Castillo V M. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. Hydrological Processes , 2000 ,14 :1261 — 1277.

[33] Burt T P , Butcher D P. Topographic controls of soil moisture distribution. Journal of Soil Science 1985 ,36 :469 — 486.

[34] Hawley M E , Jackson T J , McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. Journal of Hydrology 1983 ,62 :179 —

200

[35] Le Roux X, Bariac T, Mariotti A. Spatial partitioning of the soil water resource between grass and shrub components in a West African humid savanna. *Oecologia* ,1995 ,104 :147 — 155.

[36] Fu B J , Chen L D , Ma K M , Zhou H F , Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi , China. *Catena* 2000 ,36 :69 — 78.

[37] Ryel R J , Caldwell M M , Yoder C K , Or D , Leffler A J. Hydraulic redistribution in a stand of *Artemisia tridentata* : Evaluation of benefits to transpiration assessed with a simulation model. *Oecologia* ,2002 ,130 :173 — 184.

[38] Bodman G B , Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil. *Soil Sci. Soc. AM. J* ,1944 8 (2) :166 — 182.

[39] Tilman D , Lehman C. Human-caused environmental change : impacts on plant diversity and evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* ,2001 ,98 :5433 — 5440.

[40] Scheffer M S , Carpenter J A , Foley C. Folke , Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* ,2001 ,413 :591 — 596.

[41] Thomas Spiegelberger , Otto Hegg , Diethart Matthies , Katarina Hedlund , Urs Schaffner. long-term effects of short-term perturbation in a subalpine grassland. *Ecology* ,2006 ,87 (8) :1939 — 1944.

参考文献：

[21] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响. *环境科学* ,2000 ,21 (6) :16 ~ 19.

[22] 黄明斌, 刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用. *应用生态学报* ,2002 ,13 (9) :1057 ~ 1060.

[24] 胡良军, 邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究. *应用生态学报* ,2002 ,13 (8) :1045 ~ 1048.

[26] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报* ,2004 ,41 (1) :1 ~ 6.

[27] 杜峰, 温仲明, 王文龙, 徐学选, 穆兴民. 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.

[28] 李凤民, 张振万. 宁夏盐池长芒草草原和苜蓿人工草地水分利用研究. *植物生态学与地植物学学报* ,1991 ,15 (4) :319 ~ 329.

[29] 李凤民, 徐进章, 孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. *生态学报* ,2003 ,23 (9) :1901 ~ 1909.