

## 黄土高原土壤干层水分恢复与作物产量响应

王晓凌<sup>1, 2</sup>, 陈明灿<sup>1</sup>, 李凤民<sup>2</sup>, 李友军<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471003; 2. 兰州大学干旱草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要:**通过大田试验研究了黄土高原苜蓿草地土壤干层水分恢复状况, 及恢复过程中不同作物的产量响应。试验设 5 个处理, 苜蓿 草谷子 春小麦 马铃薯 豌豆 (WPPe); 苜蓿 草谷子 玉米 玉米 春小麦 (CCW); 苜蓿 草谷子 马铃薯 春小麦 玉米 (PWC); 苜蓿 草谷子 休闲 豌豆 马铃薯 (FPeP); 常规耕作农田 (CS)。结果表明, 如用苜蓿翻耕后农田土壤含水量与凋萎湿度时土壤含水量的比值表示土壤干层水分恢复程度, 比值在正常降雨情况下增加而在降雨量少时下降, 但如用苜蓿翻耕后农田土壤含水量与常规农田土壤含水量的比值表示土壤干层水分恢复程度, 比值持续增长不受降雨量的影响。经过 4 年时间 WPPe、CCW、PWC、FPeP 的 0~5 m 土层的土壤含水量由 2001 年 4 月仅有常规农田的 63.66% 上升到 2004 年 9 月的 90.51%、89.83%、92.17%、96.72%。苜蓿翻耕后的农田作物产量与常规农田中的作物产量没有明显差别, 而水分利用效率显著高于常规农田中的作物产量。以秋收作物马铃薯和玉米较适合苜蓿-作物轮作。

**关键词:**黄土高原; 半干旱区; 土壤干层; 紫花苜蓿; 土壤水分

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0001-04

## Water Restoration of Dry Soil Layers in the Loess Plateau and Crop Yield Response

WANG Xiao ling<sup>1, 2</sup>, CHEN Ming can<sup>1</sup>, LI Feng-min<sup>2</sup>, LI You-jun<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China;

2. MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000 China)

**Abstract:** Field experiment was carried out to study dry soil layers of alfalfa grassland water restoration and crop yield response in water restoration. Five treatments were established in the experiment, alfalfa millet spring wheat potato pea (WPPe); alfalfa millet corn corn spring wheat (CCW); alfalfa millet potato spring wheat corn (PWC); alfalfa millet fallow pea potato (FPeP); conventional farming system (CS). The results showed that when the ratio of soil water content in field after alfalfa to soil water content at crop lower limit for growth denoted water restoration, the ratio increased in normal rainfalls and decreased with little rainfalls. When the ratio of soil water content in field after alfalfa to soil water content in CS denoted water restoration, the ratio increased continually and was influenced little by rainfalls. After four years, soil water content of WPPe, CCW, PWC, FPeP in 0~500 cm soil depth which had only 63.66% of CS in April 2001 had reached 90.51%, 89.83%, 92.17%, 96.72% of CS in October 2004 respectively. Crop yields in field after alfalfa had no significant different with CS. However, water use efficiencies in field after alfalfa were significantly higher than in CS. Potato and corn which harvest in autumn were optimal for rotation in field after alfalfa.

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

黄土高原地区在林草植被过度耗水的情况下, 土壤含水量处于极渡亏缺状态, 甚至可达到或接近凋萎湿度, 经过雨季上层土壤水分可以部分得到补偿, 而得不到补偿的土层土壤含水量长期处于一种较稳定的低水平上, 形成所谓的“土壤干层”<sup>[1, 2]</sup>。土壤干层作为一种特殊的土壤水分现象, 广泛分布于我国的黄土高原地区<sup>[3~5]</sup>, 然而它的形成却严重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>[6, 7]</sup>, 而且也在很大程度上影响后续植被的选择和生存<sup>[8]</sup>。目前对土壤干层水分恢复的研究主要有, 用计算机模拟来确定水分恢复所需的年限<sup>[9]</sup>, 以及测定土壤干层水分恢复到某一具体土壤水分含量所需的时间<sup>[10, 11]</sup>。但是由于黄土高原地区的降雨变率较大, 容易出现丰水年或干旱年份不同的降雨

年型, 不同的降雨年型下土壤干层水分恢复有什么样的表现? 以及在多变的降雨年型下如何确定土壤干层水分恢复标准? 截至目前未见报道。另外出现土壤干层的土地上种植作物对水分恢复的会有什么样的影响和该过程中作物产量的表现如何? 至今同样未见报道。因此本试验以 10 年生苜蓿地出现的土壤干层为研究对象来解决上述问题, 从而为该地区的生态环境建设和出现土壤干层土地的有效利用提供科学的依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计与方法

本研究于 2000 年 10 月至 2004 年 10 月在兰州大学黄土

\* 收稿日期: 2006-06-21

基金项目: 教育部重大科技创新基金; 河南科技大学人才科学研究基金

作者简介: 王晓凌(1975-), 男, 河南淇县人, 博士, 副教授, 主要从事作物生态学研究。

高原半干旱生态系统实验站- 甘肃省榆中( 36° 02' N, 104° 25' E, 海拔 2 400 m) 进行。试验所在地为典型的半干旱黄土丘陵沟壑区, 气候属中温带半干旱气候, 多年平均降水量 328 mm, 多集中于 7、8、9 月份, 年际降水变率 22. 5%, 年均气温 6. 5℃, 无霜期 140 d。土壤为黑麻土( Chinese soil Taxonomy), 田间持水量为 21. 18%, 凋萎湿度为 7. 17%。

1.2 试验设计

2000 年 10 月把一块 10 年生苜蓿草地翻耕后, 在 2001 年春天种植草谷子, 以使其表层略微恢复水分, 然后在 2002 年 4 月又把它分为 4 部分, 从 2002~ 2004 年分别种植不同的作物, 它们分别为: 春小麦- 马铃薯- 豌豆( WPpE); 玉米- 玉米- 春小麦(CCW); 马铃薯- 春小麦- 玉米( PWC); 休闲- 豌豆- 马铃薯(FPeP)。紧靠苜蓿地有一常规耕作农田( CS) 作为对照, 从 2001~ 2004 年以下面的顺序种植作物: 春小麦- 豌豆- 马铃薯。WPpE、CCW、PWC、FWP 中未使任何肥料, 在 CS 中每年施 1 500 kg/hm<sup>2</sup> 农家肥, 化肥 N 90 kg/hm<sup>2</sup>, 化肥 P 13. 1 kg/hm<sup>2</sup>。小麦、玉米、马铃薯、豌豆分别于 4 月底, 4 月初, 5 月初, 5 月初, 4 月初播种, 小麦为条播, 玉米则在地表覆膜后进行点播, 马铃薯为点播, 豌豆也为点播。小麦、玉米、马铃薯和豌豆分别于 8 月初、9 月底、9 月底和 8 月初收获, 计算生物量和籽粒产量。故本试验共有 5 个处理, 它们分别为 WPpE、CCW、PWC、FWP、CS, 每处理三个重复。

1.3 测定

于每年作物播前和播后以及 4 月到 10 月的每月 12 日, 用土钻采集土壤样品, 用烘干法测定样品的含水量, 其中 4 月和 10 月取土深度 500 cm, 其余取土深度 200 cm。土壤凋萎湿度用遮雨棚法测定<sup>[12]</sup>。作物产量和生物量以在 72℃ 条件下烘 72 h 后出的干物质来计算。

土壤干层水分恢复程度采用绝对恢复和相对恢复两种方法表示。绝对恢复用公式(1) 表示:

$$WR = \frac{SWC_1}{SWC_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: WR——土壤干层的绝对恢复程度; SWC<sub>0</sub>——土壤含水量为凋萎湿度时的土壤水分含量; SWC<sub>1</sub>——苜蓿翻耕后农田在 2001 年 4 月以及每年 10 月的土壤含水量。相对恢复用公式(2) 表示:

$$WX = \frac{SWC_R}{SWC_C} \times 100\% \tag{2}$$

式中: WX——土壤干层的相对恢复程度; SWC<sub>C</sub> 和 SWC<sub>R</sub>——CS 和苜蓿翻耕后农田各处理 2001 年 4 月和每年 10 月的土壤含水量。试验数据采用 SAS(6. 12) 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 降雨特征与土壤水分含量

由表 1 可知与多年平均降雨量相比, 2002 年是丰水年, 2001 年和 2003 年为平水年, 2004 年是干旱年。由图 2 可知, 2004 年各处理每月 0~ 100cm 的土壤含水量比 2003 年和 2002 年低, 主要由于该年的降雨量较少。2002 年 5 月、7 月和 8 月高的降雨量使该时期的 0~ 100 cm 土层的土壤含水量在三年中较高。总之各处理 0~ 100 cm 的土壤含水量受降雨量的影响较大, 在降雨量多时会升高反之下降。2002 年 4 月、6 月和 9 月 0~ 100 cm 土层的土壤含水量 CS 显著高于苜蓿翻耕后的农田, 主要由于这三个月的降雨量在该年中相对较少。2004 年 4 月、5 月和 6 月份 0~ 100 cm 土层的土壤含水量 CS 又显著高于苜蓿翻耕后的农田各处理, 同样主要由于降雨量少的缘故。因此降雨量相对少时 0~ 100 cm 土层的土壤含水量 CS 显著高于苜蓿翻耕后的农田各处

理。100~ 200 cm 的土壤水分含量除了 2004 年 9 月之外 2002、2003 和 2004 年 3 年中 CS 都显著高于苜蓿翻耕后农田各处理。

表 1 试验期间降雨量和多年平均降雨量 mm

年	月												全年
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2001	3	1.2	0	32.6	20.2	31.9	56.4	67.3	70.3	2.8	0.7	1.3	287
2002	4.6	4.2	6.8	34.7	118	48.1	20.5	96	35.1	5.2	4.6	3.2	381
2003	4.3	1.6	15.7	26.2	55.7	50.8	53	52.1	32.7	27	5.9	0.9	325
2004	2.7	3.6	2.3	3.5	43.6	41.4	40	44	9.8	2.7	5.4	3.1	203
多年平均	0.8	2.5	8.42	17.0	35.8	37.0	60.0	73.3	44.2	24.3	6.23	0.7	310

2.2 土壤水分恢复田间水分平衡

由表 2 可知 0~ 200 cm 土壤深度, WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 WR 均大于 100%, 在 2003 年 10 月 WPpE 和 CCW 的 WR 最高且显著高于其他处理, 在 2004 年 10 月 PWC 和 FPeP 的 WR 最高。200~ 500 cm 土壤深度, WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 WR 从 2001 年 4 月到 2001 年 10 月显著增高, 从 2001 年 10 月到 2002 年 10 月变化不显著, 从 2002 年 10 月到 2003 年 10 月显著增高, 从 2003 年 10 月到 2004 年 10 月又显著降低。0~ 500cm 土层深度, WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 WR 从 2001 年 4 月到 2003 年 10 月逐年显著增高, 然后从 2003 年 10 月到 2004 年 10 月又显著降低, 在 2003 年 10 月出现最高值分别为 108. 6%、117. 3%、113. 0%、114. 2%。由表 3 可知, WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 WX 在 0~ 200 cm、200~ 500 cm、0~ 500 cm 土壤深度, 从 2001 年 4 月到 2004 年 10 月显著逐年增高。在 2004 年 10 月, WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 WX 在 0~ 500 cm 土层深度分别达到了 90. 51%、89. 83%、92. 17%、96. 72%。由表 4 可知, 各个不同时期以及四年中总的 ET, CS 都显著高于 WPpE、CCW、PWC、FPeP, 而 WPpE、CCW、PWC、FPeP 之间没有显著差别。各个不同时期以及四年中总的 ET, WPpE、CCW、PWC、FPeP 都低于该期间的降雨量。CS 在 2001~ 2003 年期间 ET 与降雨量较接近, 而在 2003~ 2004 年期间 ET 却远大于该期间的降雨量。

2.3 作物水分利用, 作物产量和水分利用效率

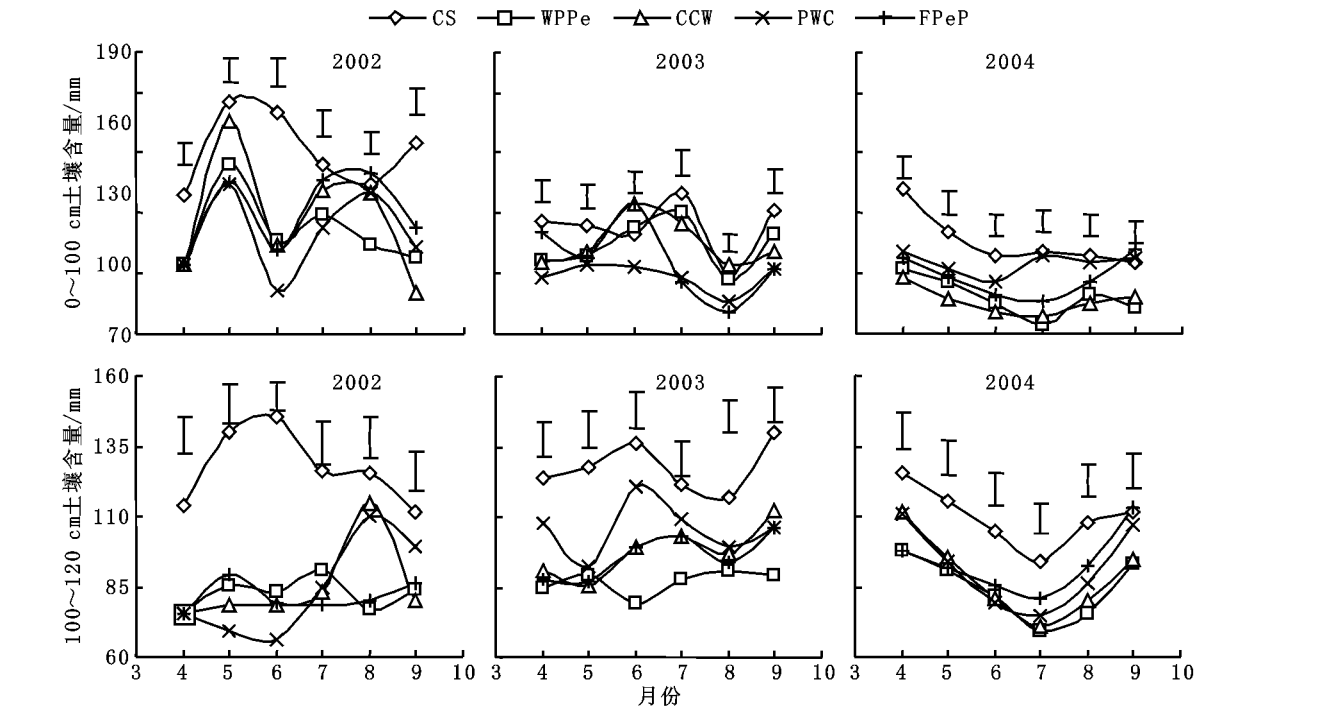
由表 5 可知, 一年中同一作物的产量耗水量( WU), 2002 年春小麦 CS 显著高于 WPpE, 2003 年豌豆 CS 同样显著高于 FPeP, 2004 年马铃薯 CS 也显著高于 FPeP; 一年中同一作物的产量, 2002~ 2004 年 CS 与苜蓿翻耕后的农田没有显著的差别; 一年中同一作物的水分利用效率( WUE), 2002~ 2004 年苜蓿翻耕后的农田显著高于 CS。苜蓿翻耕后农田中的 WU, 春小麦 2003 年显著比 2002 年和 2004 年低; 马铃薯 2002 年显著高于 2003 年和 2004 年; 玉米 2002 年最高, 2004 年次之, 2003 年最低; 豌豆 2004 年显著高于 2003 年。苜蓿翻耕后农田中的作物产量, 春小麦 2002 年最高, 2003 年次之, 2004 年最低; 马铃薯 2002 年和 2004 年显著高于 2003 年; 玉米 2002 年显著高于 2003 年和 2004 年; 豌豆 2003 年显著高于 2004 年。苜蓿翻耕后农田中的 WUE, 春小麦 2004 年显著低于 2002 年和 2003 年; 马铃薯 2002 年显著低于 2003 年和 2004 年; 玉米三年中没有显著差别; 豌豆 2003 年显著高于 2004 年。

3 讨论

3.1 土壤干层水分恢复

本文中 WR 从 2001 年 4 月到 2003 年 10 月显著逐年增高, 由于 2004 年降雨量极少 WR 从 2003 年 10 月到 2004 年 10 月又显著降低。同样沈禹颖等<sup>[13]</sup> 也报道苜蓿草地形成的土壤干层, 在无植被休闲的条件下, 经过一年的时间, 0~ 300 cm 土壤剖面水分含量恢复到田间持水量的 78%, 但在随后

的两年中, 虽然年降水高达 601 mm, 而土壤水分没有进一步的增加。因此由于 WR 受降雨等外界因素的影响而不稳定。



图中竖杠表示不同处理最小显著差数法比较(LSD,  $P=0.05$ )

图 1 2002、2003 和 2004 年 4 月至 9 月每月 0~ 100 cm 和 100~ 200 cm 土壤水分含量。

表 2 不同时期苜蓿翻耕后农田的 WR

土层深度 / cm	处理	时间 (年. 月)				
		2001. 4	2001. 10	2002. 10	2003. 10	2004. 10
0~ 200	WPPe	101. 9C	102. 7 C	111. 4B	125. 9A	113. 1B
	CCW	101. 9C	102. 7 C	112. 5B	128. 1A	110. 4B
	PWC	101. 9B	102. 7 B	123. 9A	121. 6A	125. 9A
	FPeP	101. 9C	102. 7 C	127. 2B	122. 7B	134. 2A
200~ 500	WPPe	70. 4C	81. 8B	85. 3B	97. 0A	87. 5B
	CCW	70. 4C	81. 8B	83. 2B	110. 0A	88. 1B
	PWC	70. 4D	81. 8C	91. 8B	107. 1A	81. 9C
	FPeP	70. 4C	81. 8B	85. 4B	108. 2A	84. 6B
0~ 500	WPPe	83. 0D	90. 1C	95. 8B	108. 6A	97. 7B
	CCW	83. 0D	90. 1C	96. 9B	117. 3A	97. 0B
	PWC	83. 0D	90. 1C	104. 6B	113. 0A	99. 5BC
	FPeP	83. 0D	90. 1C	102. 1B	114. 2A	104. 4B

同一行字母不同表示差异显著 ( $P=0.05$ )。

表 3 不同时期苜蓿翻耕后农田的 WX

土层深度 / cm	处理	时间 (年. 月)				
		2001. 4	2001. 10	2002. 10	2003. 10	2004. 10
0~ 200	WPPe	59. 37D	62. 03D	69. 08 C	83. 11B	89. 44A
	PWC	59. 37D	62. 03D	69. 08 C	80. 85B	87. 28A
	CCW	59. 37D	62. 03D	76. 79 C	81. 49BC	99. 60A
	FPeP	59. 37D	62. 03D	78. 84 C	83. 54BC	106. 11A
200~ 500	WPPe	62. 54D	68. 02 C	72. 40BC	77. 31B	91. 45A
	PWC	62. 54D	68. 02 C	70. 59 C	82. 40B	92. 07A
	CCW	62. 54D	68. 02 C	77. 81B	85. 31A	85. 61A
	FPeP	62. 54D	68. 02 C	72. 42BC	86. 39A	88. 44A
0~ 500	WPPe	60. 91E	65. 15D	70. 81 C	80. 45B	90. 51A
	PWC	60. 91E	65. 15D	70. 20 C	81. 71B	89. 83A
	CCW	60. 91E	65. 15D	77. 33 C	83. 62B	92. 17A
	FPeP	60. 91E	65. 15D	75. 48 C	82. 68B	96. 72A

同一行字母不同表示差异显著 ( $P=0.05$ )。

从 2001 年 4 月到 2004 年 10 月这段时间内, 无论在平

水年份的 2001 年和 2003 年, 湿润年份的 2002 年或干旱的 2004 年苜蓿翻耕后农田各处理中的 ET 总是小于 CS 中的 ET, 整个试验期间中在苜蓿翻耕后农田中的 ET 也同样小于 CS, 因此苜蓿翻耕后农田相对于 CS 是一个土壤水分持续增加和恢复的过程。主要原因是由于种植了 9 年苜蓿, 提高了土壤肥力水平, 从而有利于雨水的保持而有效的阻止的土壤水分的蒸发。与本研究相似, 乔秉钧<sup>[4]</sup>报道种植苜蓿可改善土壤结构, 增加孔隙度, 还可提高土壤的持水量, 增加透水性, 有利于土壤水分的保持。马世均<sup>[5]</sup>等也报道较高的土壤肥力的地块比贫瘠的土壤每公顷可多蓄 750 mm 雨水, 减少土壤蒸发 14. 9%~ 19. 8%, 而且一般草地较农田能减少水土流失增加土壤含水量。从 2001 年 4 月到 2004 年 10 月 WPPe、CCW、PWC、FPe 的 WX 是一持续增长的直线过程, 故 WX 不受降雨的影响, 主要与土壤本身特性有很大关系, 因此较稳定。

表 4 不同时期各处理的土壤水分  
蒸散总量与同时期的降雨量

时期	蒸散量/mm				同期降雨量	
	WPPe	CCW	PWC	FPeP	CS	/mm
Apr- 01- Oct- 01	238. 1B	238. 1B	238. 1B	238. 1B	264. 5A	278. 7
Oct- 01- Oct- 02	359. 1B	342. 7B	321. 3B	332. 0B	386. 6A	373. 3
Oct- 02- Oct- 03	250. 2B	250. 3B	269. 6B	258. 9B	306. 3A	305. 1
Oct- 03- Oct- 04	271. 0B	290. 4B	281. 6B	260. 6B	340. 2A	224. 4
Total	1118. 3B	1121. 5B	1110. 6B	1089. 6B	1277. 6A	1181. 5

同一行字母不同表示不同处理间的差异显著 ( $P=0.05$ )。

土壤水分来自于天上的降雨, 同时土壤水分还不断的向空气中蒸发, 当降雨大于土壤蒸发时土壤含水量增加, 否则相反, 故土壤水分含量是一个动态的概念。而且从本试验的结果来看, 各处理的水分含量每年以及每月都不相同, 都在时刻变化着。许多学者一致认为一年生农地的土壤水分多年平均收支基本平衡, 是由于与当地气候长期适应的结果<sup>[16, 17]</sup>。从本研究的结果来看 2001~ 2003 年降雨量基本接近多年平均降雨量, 此时 CS 土壤蒸散与降雨也基本平衡。

故以 CS 为苜蓿翻耕后土壤水分恢复的对照,能较客观的反映土壤水分含量本身的变化规律。

3.2 作物产量的响应

土壤是作物进行光合用所需的水分和养分的基础,肥力水平较高的农田能促进作物茁壮生长,从而促进了作物水分利用效率的提高。马世均等研究发现旱地高肥力地块有提高作物水分生产率的作用<sup>[15]</sup>。同样一项旱地试验研究表明,小麦高产地比低产地 0~ 100 cm 土层的湿度少 1.3%~ 1.7%,100~ 150 cm 土层的少 3.7%~ 4.9% 150~ 200 cm 的少 5%,主要由于小麦高产田养分状况较好<sup>[15]</sup>。由于种植苜蓿可以提高土壤的有机碳和土壤氮素的含量,能增加土壤水稳性团粒指数,改善土壤团粒结构,还可以减小土壤容重,增加土壤孔隙度,增加土壤的持水能力和雨水的渗透性<sup>[8]</sup>,所以本文中苜蓿翻耕后的农田也提高了作物的水分利用效率。一般一年生农作物主要利用 0~ 200 cm 土层的土壤水分<sup>[17]</sup>,本文中整体上作物生长季节 0~ 200 cm 土层的土壤含水量苜蓿翻耕后农田小于 CS。并且 2002 年 MWPe 中的春小麦、2003 年 MFPeP 中的豌豆和 2004 年 MFPeP 中的马铃薯的作物耗水量分别小于 2002 年 CS 中春小麦、2003 年 CS 中的豌豆和 2004 年 CS 的作物耗水量,但它们产量之间却没有显著差别,主要得益于苜蓿翻耕后农田中的作物较高的水分利用效率。

一系列中不同的大写字母表示苜蓿翻耕后的农田中,同一作物在不同的年间的显著性差异( $P = 0.05$ ),一系列中不同的小写字母表示一年中苜蓿翻耕后的农田与 CS 中,同一作物之间的显著性差异( $P = 0.05$ )。

一般旱地栽培中,作物产量与作物的耗水量是一线性关系<sup>[17]</sup>。同样本文 2002 年和 2003 年中,WPpE、CCW、PWC、FPe 中不同作物的耗水量多时它们的产量高,而耗水量少时它们的产量低。但在干旱的 2004 年尽管春小麦的耗水量与 2002 年基本相同但小麦产量却相差很大。主要原因是,春小麦苗期的水分亏缺容易造成春小麦严重减产<sup>[17]</sup>。在本试验中干旱的 2004 年使 CCW 的 4 月和 5 月的土壤含水量与往年相比极低,最终导致产量剧烈下降。2004 年豌豆产量低的原因与春小麦相似。马铃薯对于播种期、收获期要求不严,易保全苗,对水分的要求也符合我国旱农区的降水季节的特点:马铃薯在发芽至出苗期,可依靠种薯内的水分正常发芽出苗;幼苗期需水量也不多,虽遇春旱但仍能正常生长;

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[ J ]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427– 432.  
[ 2 ] 张兴昌, 卢宗凡. 坡地土壤水分动态及耗水规律研究[ J ]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 46– 56.  
[ 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[ J ]. 生态学报, 1983. 3(2): 91– 101.  
[ 4 ] 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[ J ]. 中国水土保持, 1999, (5): 11– 14  
[ 5 ] 王力, 邵明安, 侯庆春. 延安试区土壤干层现状分析[ J ]. 水土保持通报, 2000, 20(3): 35– 37.  
[ 6 ] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰. 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)[ J ]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 75– 83.  
[ 7 ] 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[ J ]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 25– 29.  
[ 8 ] 关秀琦, 邹厚远, 鲁子瑜. 黄土高原草地生产持续发展研究[ J ]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 56– 60.  
[ 9 ] 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[ J ]. 水土保持研究, 1996, 3(1): 166– 178.  
[ 10 ] 梁一民, 李代琼, 从心海. 沙打旺草地草量动态及水分利用研究[ J ]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 71– 78.  
[ 11 ] 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[ J ]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1991, 14: 71– 78.  
[ 12 ] 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[ J ]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944– 1950.  
[ 13 ] 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[ J ]. 生态学报, 2004, 24(3): 640– 647.  
[ 14 ] 乔秉钧, 孙启忠. 内蒙古河套灌区盐碱地生物开发与治理之途径[ J ]. 中国草地, 1995, (1): 21– 24.  
[ 15 ] 马世均. 旱农学[ M ]. 北京: 中国农业出版社, 1991.  
[ 16 ] 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[ J ]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944– 1950.  
[ 17 ] 冷石林, 韩仕峰, 王立祥. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术[ M ]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 166– 172.

盛花期是薯块生长最旺盛的时期,需水量猛增,恰恰是旱农区降雨量较多的季节,如这段时期遇到短期干旱后,一旦降雨薯块仍能继续膨大<sup>[15]</sup>。因此 2004 年马铃薯的耗水量与其产量的关系较为一致。玉米为地膜覆盖,能抵御早期的干旱且可以较好的保墒使其产量不为下降。

表 5 不同作物的耗水量、耗水量组分及水分利用效率

作物	年	处理	作物耗水量	产量/	水分利用率 WUE/
			WU/ mm	(kg · hm <sup>-2</sup> )	(kg · hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )
春小麦	2002	CS	271.32a	2937.2a	10.83b
	2002	WPpE	235.11bA	2935.3aA	12.48aA
	2003	PWC	184.51B	2037.3B	11.04A
	2004	CCW	234.73A	1791.5C	7.63B
马铃薯	2002	PWC	258.63A	3574.5A	13.82B
	2003	WPpE	193.16B	3191.3B	16.52A
	2004	FPeP	213.03bB	3603.3aA	16.42aA
	2004	CS	260.06aA	3498.3a	13.86b
玉米	2002	CCW	300.01A	3372.8A	11.24A
	2003	CCW	213.75C	2586.6B	12.10A
	2004	PWC	250.51B	2657.4B	10.61A
豌豆	2003	CS	207.7a	1425a	6.86b
	2003	FPeP	182.1bB	1524aA	8.37aA
	2004	WPpE	243.66A	1273.4B	5.23B

4 结 论

土壤绝对水分恢复由于受降雨量的影响变化大,不稳定,用其不易对土壤干层水分恢复做出明确的判断。而土壤相对恢复与土壤本身的性状有很大关系,较稳定,用其易对土壤干层水分恢复出明确的判断。苜蓿翻耕后农田较好的保水持水性能促进了土壤干层水分的恢复。经过将近 4 年时间 WPpE、CCW、PWC、FPeP 的 0~ 500 cm 土层的 WX 分别达到了 CS 的 90.51%、89.83%、92.17%、96.72%,因此 0~ 500 cm 的土壤水分已基本恢复。苜蓿翻耕后农田较好的土壤肥力状况提高了作物的水分利用效率。尽管苜蓿翻耕后农田的作物的耗水量低于 CS,但作物产量与 CS 没有显著差别。在土壤干层水分恢复过程中秋收作物马铃薯和玉米的产量比较稳定。