

# 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响

黄明斌, 党廷辉, 李玉山

(中科院, 水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学)

**摘要:** 黄土高原旱塬土层深厚, 地下水一般不参与土壤水分的垂直交换, 农田水分循环模式是土壤-植物-大气类型。近几十年来, 由于黄土区旱作农田生产力的不断提高, 农田土壤水分循环出现新的特点。以农田长期定位试验资料为基础对这一新特点进行了分析, 结果指出旱作农田生产力提高对土壤水分循环的影响表现在土壤水分利用层加深, 降雨入渗深度减少和土壤干燥化。

**关键词:** 黄土高原; 旱作农田; 土壤水分循环

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2002)06-0050-05

黄土旱塬农田水分循环的模式为土壤-植物-大气类型。截取一段时间来看, 农田土壤水分循环是从降水渗入土体进行再分布开始的, 入渗前锋向深处推进, 同时开始了蒸发和有植被条件下的蒸腾过程。巨大的土壤水库可容纳全部降水而且截流在植物可以利用层内。约有 2/3 的水量消耗于长期的作物蒸发蒸腾, 约有 1/3 的水量消耗于生长期的物理蒸发, 北部无渗漏水量发生, 南部某些地区有周期渗漏水量<sup>[1]</sup>。径流是否发生则视地形而异。对于中低产田, 从周年的角度看, 大体上年蒸发蒸腾量和年降水量可视为相当。在田间条件下农田土壤水分处于不断循环变动中。其循环类型决定于气候、土壤、地下水和利用四大因素。土壤水分循环在时间上表现为季节性干湿动态, 在空间上表现为循环深度和剖面内不同循环强度的差别。土壤水分循环类型和土地生产力有着密切的联系。特别是在旱作农田中, 更有其突出的意义。为此, 本文以长期定位试验资料为基础, 从土壤水分利用层深度、降雨入渗补给深度、土壤含水量的变化等角度, 研究黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响, 探讨旱作高生产力下的水分生态环境效应与高产的可持续性。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验设计

为了研究旱作高生产力对土壤水分循环的影响, 分别于 1982 年和 1985 年先后在陕西的澄城县和长武县布置了裸地条件下冬小麦连作和油菜-冬小麦-冬小麦-冬小麦-豆-冬小麦-冬小麦-谷子轮作等多种形式的长期定位试验, 其中澄城县的定位试验于 1992 年结束, 长武县的定位试验目前仍在进行。两地试验小区面积均为 10.26 m × 6.5 m, 以不同施肥处理来实现不同的生产力水平。长武试验地的高、中、低产施肥处理分

别为: N 120P6QM 75000 (即每公顷每年播种前一次性施入氮肥 120 kg、磷肥 60 kg 和优质厩肥 75 000 kg)、M 75000 和不施肥, 多年平均产量 (1986~1999 年) 高、中、低分别为 4365、2930 和 1520 kg/hm<sup>2</sup>; 澄城试验地的中、低产施肥处理分别为: N 120P90 和 N 60P45, 10 年平均产量分别为 3 045 和 1 815 kg/hm<sup>2</sup>。每种处理设置 3 个重复, 测定项目各种作物所有播种和收割期 0~3 m 或 5 m 土壤含水量、作物产量和其它生物性状, 如出苗期、苗数、分蘖数等。其中土壤含水量的测定方法是: 表层 0~30 cm 用取土烘干法测定, 40~500 cm 用中子仪测定, 0~100 cm 每间隔 10 cm 测定一个数据, 100~500 cm 每间隔 20 cm 测定一个数据。冬小麦的播种期一般是 9 月 20 日左右, 收割期是 6 月 30 日左右; 豌豆和油菜的生育期是 10 月上旬到次年 6 月中旬; 谷子的生育期是 7 月上旬到 10 月上旬。

### 1.2 蒸散量计算

旱作农田水量平衡的一般式表达如下

$$ET = P + G + \Delta W - R - D \quad (1)$$

式中  $ET$ ——实际蒸散量;  $P$  和  $G$ ——分别是降水量和毛管水上升量;  $\Delta W$ ——土壤储水变化量;  $R$  和  $D$ ——分别是地表径流量、内排水量 (多指渗漏量)。由于地下水埋藏很深, 不参与土壤水循环,  $G = 0$ 。因而上式可简化为

$$ET = P + \Delta W - R - D \quad (2)$$

因试验小区四周均建有地埂, 无径流发生, 故  $R = 0$ 。另外, Lysimeter 蒸渗仪 (3 m 土柱) 多年监测结果证明无渗漏发生, 故  $D = 0$ 。因此, 旱塬农田蒸散量的计算公式可进一步简写为

$$ET = P + \Delta W \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生产力水平下的作物耗水层深度

图 1 是长武试验地高、中、低三种产量水平在不同时段作物根系吸水的最大利用层深度。其中图 1a 和图 1b 分别是冬小麦连作 7 年和 15 年后, 即 1991 年 7 月 5 日和 2000 年 7 月 2 日, 冬小麦收割后不同处理 0~500 cm 土壤含水率的剖面分布, 初值系开始试验前土壤剖

收稿日期: 2002-01-15 修订日期: 2002-07-01

基金项目: 国家自然科学基金 (50079023); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金和 CERN 长武生态站资助

作者简介: 黄明斌 (1968~), 男, 湖北钟祥人, 博士, 副研究员, 陕西杨凌 中国科学院, 水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100

面的含水率分布。由图可见, 冬小麦产量水平不同, 作物耗水层深度也不同, 对同一产量水平, 冬小麦连作时间不同, 作物耗水层深度也不同。冬小麦 1991 年收割后, 中、低产量水平的冬小麦耗水层深度在 420 cm 左右, 而高产水平的冬小麦耗水层深度可达 500 cm; 冬小麦连作 15 年后, 高产水平的冬小麦耗水层深度已超过 500 cm, 而中、低产量水平的冬小麦耗水层仅达到 500 cm。因此, 冬小麦产量水平愈高, 连作时间愈长, 作物耗水层就愈深。就冬小麦根系扎深而言, 一般深度可达 280~300 cm<sup>[3]</sup>, 大于该深度的土壤水分是在水势梯度的作用下进入根系吸水层而被利用的, 根系吸水层的土壤含水量愈低, 则水势梯度愈大, 单位时间内水分上移进入根层的水量愈大, 则深层水分亏缺量愈大。

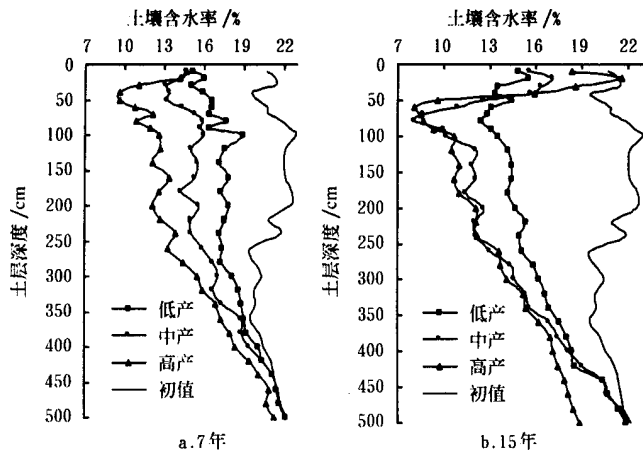


图 1 冬小麦连作 7 年(a)和 15 年(b)后不同产量水平作物耗水层的差异

Fig 1 Difference of water use depth by winter wheat with different yields after 7 years (a) and 15 years (b) cultivation

降雨量相对要小的 1996 年夏季休闲期, 高产试验小区降雨入渗补给深度仅为 120 cm, 中产试验小区的补给深度为 170 cm, 而低产试验小区的补给深度也只有 190 cm, 0~300 cm 土层总补给量分别为 196 & 170.4 和 127.7 mm。另外, 休闲期土壤墒情的相对恢复程度也受产量水平的影响。1986~1998 年冬小麦地共 13 年的夏季休闲期, 高、中、低试验小区 0~3 m 土层降雨平均有效补给率分别为 54.0%、48.4% 和 37.4%, 也就是说其间高、中、低试验小区分别蒸发掉同期降水的 46.0%、51.6% 和 62.6%。因此, 旱作农田高生产力在提高土壤水和降水利用效率的同时, 也降低了降水的入渗补给深度, 从而阻碍了深层土壤水分的恢复, 易产生土壤下伏干燥层。

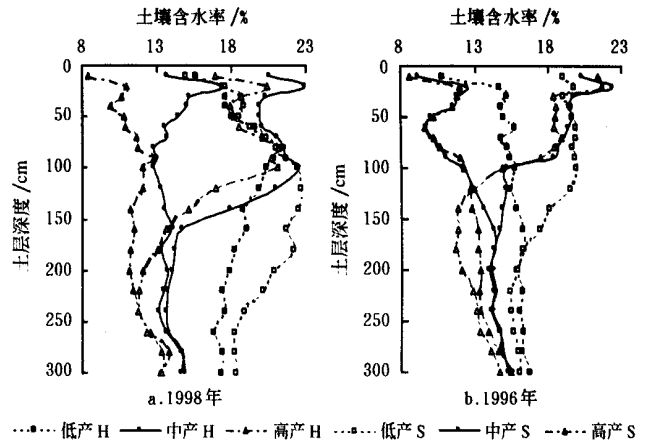


图 2 旱作生产力水平对降水入渗补给深度的影响 (a, b 分别是 1998 年和 1996 年的夏季休闲期)

Fig 2 Effect of dryland productivity on rainfall infiltrating depth (a and b represent fallow periods in 1998 and 1996, respectively)

## 2.2 不同生产力水平下的降水入渗补给深度

冬小麦收割后农田进入 7~9 月的夏季休闲期, 此时正是黄土高原的降水季节, 作物强烈蒸腾作用所消耗的土壤水分可得到部分或者全部恢复。在试验期间 (1985~1999 年), 长武试验区夏休期间平均降雨量 246.2 mm, 最大量 456.2 mm, 最小量 134.4 mm, 同期土壤蒸发耗水 131.4 mm, 土壤平均失墒率为 53.4%, 平均补给量为 114.8 mm。但是作物产量水平不同, 所腾空的土壤库容和耗水层深度也不一样, 将直接影响到夏休期间降水的入渗补给量、补给深度和土壤蒸发失墒率。图 2a 和图 2b 分别是 1998 年 (休闲期降雨 332.1 mm) 和 1996 年 (休闲期降雨 279.8 mm) 长武试验地高、中、低产量水平冬小麦收割期 (H) 和下一季播种期 (S) 3 m 土层土壤含水量的剖面分布。由分布曲线可清楚地判断, 降雨量相同, 作物产量水平不同, 土壤腾空的库容不同, 因而降水入渗补给深度相差比较明显。就降雨量较大的 1998 年夏季休闲期而言, 高产试验小区降雨入渗补给深度为 240 cm, 中产试验小区的补给深度为 280 cm, 而低产试验小区的补给深度超过 300 cm; 而

## 2.3 旱作农田高生产力对土壤含水率的影响

### 2.3.1 旱作冬小麦高产连作对土壤含水率的影响

冬小麦是秋播夏收, 全生期处于当年雨季后和翌年雨季前的旱季, 生育期降水量只能满足需水量的一半左右, 需要大量吸收土壤储水, 以满足生长需水的要求。特别是耗水高峰正是晚春初夏之交, 此时蒸腾量大幅度增加, 土壤水分支出远高于收入, 使整个剖面土壤湿度降到全年最低点。犹如被腾空的土壤水库库容, 为承纳雨季中大量而集中的降水提供了条件, 雨季中接纳的土壤储水量又保存到来年春季供小麦利用, 这就是小麦田一年一周期的土壤水分循环过程。而作物产量提高加强了这一循环过程, 不仅改变了土壤水分利用深度和降水入渗补给深度, 而且降低了土壤含水率, 导致土壤干燥化。

本研究依据的长武和澄城冬小麦长期连作试验分别自 1984 年和 1982 年秋播开始。长武点高产处理区和低产处理区、澄城点的中产处理区和低产处理区由于单产和耗水量的差异, 土壤湿润状况在同一基础上, 随着试验的不断延续已发生显著的分异 (图 3 和图 4)。图 3 分别显示了长武试验地高产区和低产区冬小麦播种

和收割期 3m 土层储水量的演变过程。高产区土壤含水率的降低过程主要发生在头 4 年。此后深层的根土水势已达到相对平衡, 1~ 3 m 土层土壤湿度在一个相对较低的含水率基础上随降水自然波动而变化。从表 1 可看出, 在 15 年的试验期间, 高、中、低产田小麦平均产量分别为 4 078、2 745 和 1 472 kg/hm<sup>2</sup>, 平均蒸散量分别为 421、408 和 383 mm, 其中生育期降水提供了 283 mm, 土壤前期储水分别提供 138、125 和 100 mm。因此高产田较中产和低产田平均每年多消耗土壤前期储水 13

mm 和 38 mm, 从而导致土壤含水率逐渐下降。图 4 分别是澄城试验地中产田和低产田冬小麦播种期和收割期 2 m 土层土壤储水量的动态变化过程。10 年内中产田年平均耗水量是 313.6 mm, 低产田年平均耗水量是 298.3 mm, 在降水量相同的条件下, 中产田不断利用土壤前期储水来弥补雨水资源的不足, 结果导致土壤含水率降低。这段降低过程与长武试验结果类似, 也经过了 4~ 5 年后达到新的平衡, 此后中、低产试验小区土壤含水率在收割期的差别不大。

表 1 长武试区小麦连作不同产量水平 3 m 土层储水量、耗水量、生育期降水量和产量变化

Table 1 Variations of soil water storage in the profile of 3 m, evapotranspiration (ET), precipitation during the growing season and yield during the 15 a study periods at Changwu Station

生育期	生育期降水 /mm	高 产				中 产				低 产			
		土壤储水量		耗水量 /mm	产量 /kg · hm <sup>-2</sup>	土壤储水量		耗水量 /mm	产量 /kg · hm <sup>-2</sup>	土壤储水量		耗水量 /mm	产量 /kg · hm <sup>-2</sup>
		播种期 /mm	收割期 /mm			播种期 /mm	收割期 /mm			播种期 /mm	收割期 /mm		
1984~ 1985	328	835	722	441	4 943	835	741	421	3 596	835	772	390	2 096
1985~ 1986	282	786	612	456	4 359	800	631	450	2 234	831	665	448	1 284
1986~ 1987	292	636	546	382	4 850	651	623	320	2 609	695	686	302	1 316
1987~ 1988	331	562	527	366	6 479	625	616	340	3 737	659	706	283	2 100
1988~ 1989	328	737	523	543	3 761	788	608	508	3 041	796	652	472	1 361
1989~ 1990	318	642	480	479	2 621	683	597	403	1 280	722	666	373	7 10
1990~ 1991	320	729	497	553	1 853	788	562	546	2 168	819	671	468	9 32
1991~ 1992	228	542	499	271	6 306	636	548	316	4 095	681	614	294	2 340
1992~ 1993	347	674	470	551	3 852	757	546	558	2 351	815	613	549	1 098
1993~ 1994	315	606	480	441	1 475	664	575	404	1 577	717	659	372	1 431
1994~ 1995	178	628	442	364	2 258	686	495	369	1 715	749	550	377	1 057
1995~ 1996	243	471	476	238	5 647	508	508	243	3 426	601	606	237	1 625
1996~ 1997	217	574	377	414	4 461	618	448	387	3 364	694	567	344	1 560
1997~ 1998	276	618	515	380	3 610	674	554	396	2 822	731	608	399	1 475
1998~ 1999	242	663	468	437	4 706	729	511	461	3 168	768	569	441	1 699
平 均	283	647	509	421	4 078	696	571	408	2 745	647	640	383	1 472

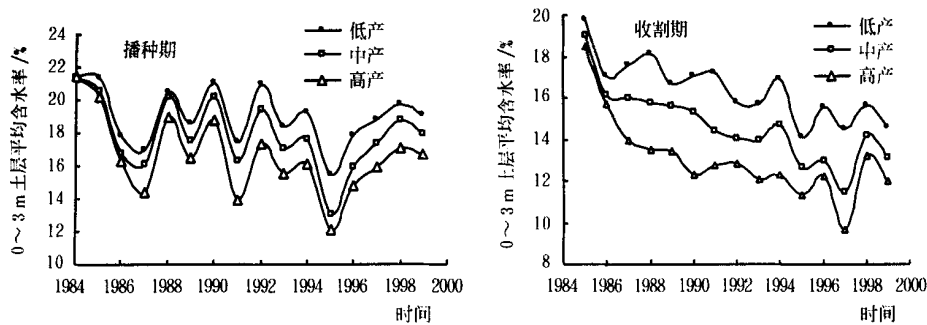


图 3 高产和低产冬小麦播种期和收割期土壤含水率的变化(长武)

Fig 3 Change of soil water contents at sowing and harvest for winter wheat with high and low yields (Changwu)

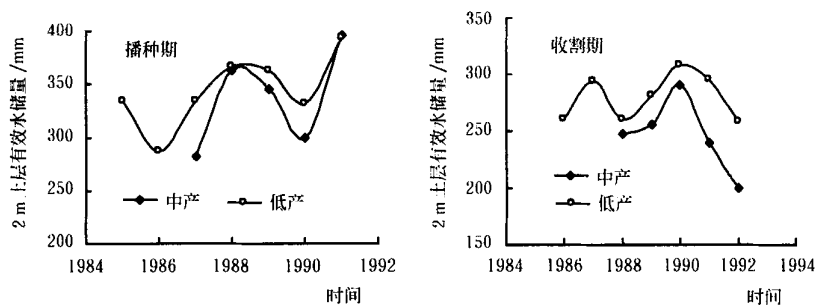


图 4 中产和低产冬小麦播种期和收割期土壤储水量的变化(澄城)

Fig 4 Change of soil water contents at sowing and harvest for winter wheat with middle and low yields (Chengcheng)

2.3.2 旱作高产农田轮作对土壤含水率的影响

轮作是不同作物的周期种植, 各种作物的耗水量和生育期都不相同, 势必使土壤水库贮水量不一致, 要达到连年持续增产, 常常通过作物换茬搭配来解决其水分供应问题。如在半湿润地区, 为克服麦田作物地休闲期土壤水分无效蒸发问题, 改三年三作为四作, 复种谷糜作物后, 再配一季豌豆, 以持续调节水分利用。10 年试验结果表明麦(谷)、豌豆轮作比麦、麦、麦连作多利用 10.77% 的降水, 增产粮食 1 528.5 kg/hm<sup>2</sup>, 多利用土壤 196.28 mm 储水<sup>[4]</sup>。同样的轮作制度, 中产比低产将利用更多的土壤储水, 从而导致土壤含水率降低的结果。表 2 是油菜、麦、麦轮作中产区和低产区作物产量和耗水量的差异, 由表可知 9 年平均产量 2 315 kg/hm<sup>2</sup> 较低产区 2 150 kg/hm<sup>2</sup> 高 165 kg/hm<sup>2</sup>, 年平均多耗水 53.8 mm。结果是 9 年平均中产区 2 m 土层土壤有效水储量为 44.7 mm, 低产区 2 m 土层土壤有效水储量为 55.3 mm (图 5a)。表 3 是澄城试区麦-豆-麦-麦-谷长期定位试验结果, 中产区 10 年平均产量 2 652.9 kg/hm<sup>2</sup>, 低产区 10 年平均产量 2 103.8 kg/hm<sup>2</sup>; 10 年中产区平均耗水量 371.4 mm, 低产区后 6 年平均耗水量 317.5 mm, 中产区较低产区年平均多耗水量 53.9

mm, 2 m 土层土壤有效水储量平均少 18.3 mm (图 5b)。不同轮作试验的结果也证实, 高产农田土壤含水量低于低产农田, 作物生长的土壤水分环境相对较差, 土壤水库对大气干旱的调节能力降低, 作物产量易受自然降水的影响。

表 2 麦和油菜轮作中产区与低产区作物产量和耗水量的差异(澄城)

Table 2 Difference of ET from winter wheat and rape rotation with middle and low yields (Chengcheng)

年份	种植作物	中产轮作区		低产轮作区	
		产量 /kg · hm <sup>-2</sup>	耗水量 /mm	产量 /kg · hm <sup>-2</sup>	耗水量 /mm
1983	油菜	1 245	378.8	1 440	—
1984	冬小麦	2 610	420.2	2 535	—
1985	冬小麦	2 775	493.6	2 430	—
1986	油菜	435	163.0	345	215.8
1987	冬小麦	3 310.5	275.4	2 860.5	278.1
1988	冬小麦	2 067	290.3	2 392.5	277.1
1989	油菜	1 830	208.3	1 372.5	232.1
1990	冬小麦	4 635	377.4	3 945	340.1
1991	冬小麦	1 927.5	334.8	2 032.5	295.5
	平均	2 315	326.9	2 150	273.1

表 3 麦豆轮作中产区与低产区作物产量和耗水量的差异(澄城)

Table 3 The differences of yield and evapotranspiration at fields with middle and low productivity (Chengcheng)

年份	种植作物	中产轮作区		低产轮作区	
		产量/kg · hm <sup>-2</sup>	耗水量/mm	产量/kg · hm <sup>-2</sup>	耗水量/mm
1983	冬小麦	3 165	383.1	2 766	—
1984	豌豆	1 215	346.3	1 206	—
1985	冬小麦	2 790	475.1	2 010	—
1986	冬小麦/谷子	3 525/819	520.8	3 011/600	—
1987	豌豆	238.5	123.3	321	147.0
1988	冬小麦	3 375	306.1	2 526	234.8
1989	冬小麦/谷子	4 770/4 297	695.7	4 200/1 897	719.4
1990	豌豆	1 540.5	198.2	1 467	170.2
1991	冬小麦	2 302.5	358.6	2 677.5	350.9
1992	冬小麦	3 261	306.9	2 556	282.4
平均		2 652.9	371.4	2 103.8	317.5

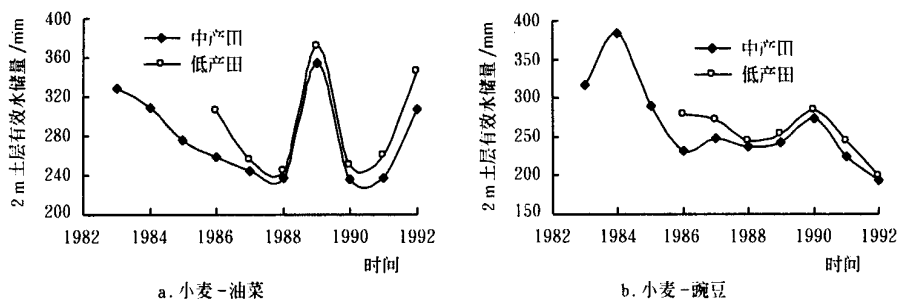


图 5 麦和油菜轮作(a)和麦豌豆轮作(b)中产和低产田收割期 2 m 土层土壤储水量的差异(澄城)

Fig. 5 Difference of soil water for winter wheat and rape rotation (a) and winter wheat and pea rotation (b) with middle and low yields (Chengcheng)

### 3 结 论

黄土高原旱作农田的水分资源在一个较长的时间序列内基本是不变的,它主要由自然降水、土壤水和地下水 3 部分组成。由于该区地下水埋藏较深,一般不直接参与土壤水分循环,因此旱作农田的水分资源实际上只有降水和土壤水两部分。而植物可利用的土壤水分又是十分有限的,它是自然降水在土壤、植物和大气之间循环转化后自然平衡的结果,改变其中的一个环节,都会影响整个循环系统的演变走向。因此,农田生产力水平提高,作物耗水量增大后<sup>[5,6]</sup>,将影响土壤水分循环<sup>[7,8]</sup>,即作物产量低,土壤含水量在较高的平衡点上随自然降水的变化而变化;作物产量高,土壤含水量将在一个较低的平衡点上波动。旱作农田高生产力对土壤水分循环的另一影响是改变土壤耗水层深度和降水入渗补给深度。

### [参 考 文 献]

- [1] 李玉山 黄土区土壤水分循环及其对陆地水文大循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3: 91~ 101.
- [2] 李玉山 旱作高产田产量波动性与土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353~ 356.
- [3] 邵明安, 杨文治, 李玉山 黄土区土壤水分有效性研究[J]. 水利学报, 1987, 8: 38~ 44.
- [4] 冷石林, 韩仕峰, 王立祥等 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, 133~ 172.
- [5] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [6] 康绍忠, 张富昌, 刘晓明 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 285~ 289.
- [7] 黄明斌, 邵明安, 李玉山 一个改进的随机动力学水平衡模型及其应用研究 I 模型[J]. 水利学报, 2000, 6: 20~ 26.
- [8] 黄明斌, 邵明安, 李玉山 一个改进的随机动力学水平衡模型及其应用研究 I 应用[J]. 水利学报, 2000, 6: 27~ 33.

## Effect of Advanced Productivity in Dryland Farming of the Loess Plateau on Soil Water Cycle

Huang Mingbin, Dang Tinghui, Li Yushan

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

**Abstract** Owing to the thick soil layer in dryland farming of the Loess Plateau, groundwater does not directly enter the soil water cycle, and the model of water cycle in dryland farming can only happen in the soil-plant-atmosphere system. With the increase in productivity during recent years, the new features of water cycle have been shown in dryland farming. Based on data from long term experiments in situ, these new features were studied. The results showed that the effect of advanced productivity in dryland farming on soil water cycle were to increase the depth of soil water consumption, reduce the rainfall infiltrating depth and decrease soil water content.

**Key words:** Loess Plateau; dryland farming; soil water cycle