

# 限量补灌冬小麦套作玉米土壤水分的时空分布及利用效率

任根深<sup>1,2</sup>, 柴强<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省平凉市农业科学研究所, 甘肃 平凉 744000)

**摘要:** 在陇东半湿润易旱地区, 通过大田试验, 研究了限量补充灌溉及套作对冬小麦、玉米产量和水分利用效率(WUE)的影响, 探讨了冬小麦套作玉米、单作冬小麦和单作玉米地土壤水分的时空动态及利用特性。结果表明, 套作可显著提高冬小麦和玉米的产量和水分利用效率, 套作耗水量较相应单作耗水量的加权平均增加了 5.7%~7.3%, 产量提高了 52.8%~50.6%; 限量补灌对套作和单作小麦的增产作用显著, 对单作玉米的 WUE 也具有显著的提高作用, 但对单作小麦和套作 WUE 的影响不显著; 冬小麦套作玉米对水分利用的互补作用主要发生在冬小麦收获后, 主要通过利用冬小麦带和深层水分提高利用效率, 套作是既可提高旱农区当季降水利用率又可保留适宜底墒水平的高效种植模式。

**关键词:** 旱农区; 套作; 限量补灌; 水分利用效率; 水分时空变异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)01-0145-05

中图分类号: S157.7+5

## Spatial and Temporal Distribution of Soil Moisture and Its Utilization Efficiency in Intercropped Winter Wheat and Corn System Under Limited Supplementary Irrigation

REN Gen-shen<sup>1,2</sup>, CHAI Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Pingliang Institute of Agricultural Sciences, Pingliang, Gansu 744000, China)

**Abstract:** A field experiment was carried out in the semi-humid but easily dry region of East Gansu Province. Objectives of the study were to explore the effects of limited supplementary irrigation (LSI) and strip intercropping on the yield and water utilization efficiency (WUE) of winter wheat intercropped with corn and investigate the characteristics of spatial and temporal distribution of soil moisture and its utilization in intercropped winter wheat and corn, single cropping winter wheat, and single cropping corn systems. Results show that strip intercropping can significantly increase the yield and WUE of winter wheat and corn, the weighted average of consumed water for intercropping is 5.7%~7.3% more than that for the single crops, but the yield is increased by 52.8%~50.6%. Compared with the non-irrigation treatments, LSI significantly increases the yields of intercropped or single cropping winter wheat, increases the WUE of the intercropped crops, slightly increase the WUE of single cropping crops, and increase the utilization efficiency of soil moisture in sowing. In intercropped winter wheat and corn system, the compensation for soil moisture is mainly take place after wheat harvesting, which is realized mainly through using the moisture stored in winter wheat strips and deep soil layers. Strip intercropping is a typical high efficient cropping pattern in the semi-humid but easy dry area and it can not only enhance the utilization efficiency of current seasonal precipitation but also retain certain amount of water for the next crop.

**Keywords:** rainfed agricultural area; strip intercropping; limited supplementary irrigation; water utilization efficiency (WUE); spatial and temporal variation of soil moisture

收稿日期: 2007-06-25

修回日期: 2007-10-26

资助项目: “十五”国家科技攻关(2001BA508B11, 2004BA508B09); 甘肃省中青基金(3YS061—A25—021)

作者简介: 任根深(1962—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 高级农艺师, 主要从事冬小麦育种及栽培研究工作。电话(0933) 8223113。

通讯作者: 柴强(1972—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 副教授, 主要从事多熟种植、植物化感和节水农业方面的教学与研究。E-mail: Cha iq@gsau.edu.cn.

以间作套种为主体的多熟种植是解决耕地数量不足,提高资源利用效率,减少水土流失,实现农产品多样化的重要手段<sup>[1-3]</sup>。研究表明,合理的间套作并未增加作物的需水量,但可提高水分利用效率<sup>[4]</sup>。Morris 等总结了 10 种间作模式的水分利用特性后发现,间作水分利用效率与单作加权平均相比可提高 4%~99%,大多在 18% 以上<sup>[5]</sup>。间作套种时,由于将生育期不同的作物组合在同一群体内,复合群体的总生育期延长,对热量和水分的要求提高,而我国旱农地区 70% 以上的降水集中在 6—9 月,种植业生产除受降水不足的影响外,降水季节与作物需水季节的错位,导致降水利用效率低下,间作套种难以推广。集雨补灌技术借助人造设施,对自然降水进行了时间和空间上的再分配,提供了实现旱农区供水与作物需水相吻合的技术支持。本研究旨在通过研究限量补灌条件下冬小麦套作玉米土壤水分的时空分布特征及利用效率,为构建旱农区高水效多熟种植模式提供理论和实践依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试区概况

试验于 2003—2004 年在甘肃省镇原县上肖国家旱农实验站进行。试区 10 积温 2 700 ~ 3 400, 平均温度 8.3, 年日照时数 2 540 h; 多年平均降水量 542 mm, 54.1% 的降水集中在 7—9 月, 是传统的 2 年 3 熟区, 适于发展间套 2 熟, 但受雨热错位矛盾影响, 间套 2 熟较为少见。试区土壤为黑垆土, 最大田间持水量 21.8%。0—20, 21—40 cm, 41—60, 61—90, 91—120, 121—160, 161—200 cm 土壤容重分别为 1.34, 1.44, 1.33, 1.29, 1.26, 1.25, 1.25 g/cm<sup>3</sup>; 播前耕层土壤有机质 11.0 g/kg, 全氮 0.8 g/kg, 碱解氮 62 mg/kg, 速效磷 8.1 mg/kg, 速效钾 248 mg/kg, pH 值 7.8。

试验年度为平水年型, 冬小麦播种到玉米收获期间共降水 468 mm, 其中冬小麦生育期降水 284 mm; 冬小麦播种前 2 m 土层含水 380.1 mm。

### 1.2 试验设计

以种植模式和补灌为参试因子, 共设 6 个处理, 重复 3 次, 小区长 10 m, 随机排列。处理 1 (W<sub>6</sub>C<sub>2</sub>): 冬小麦/玉米, 冬小麦带宽 0.8 m 种 6 行, 密度 2.25 × 10<sup>6</sup> 粒/hm<sup>2</sup>; 玉米带宽 0.8 m, 种 2 行, 行距 0.27 m, 玉米密度 45 000 株/hm<sup>2</sup>, 间距 0.27 m, 每小区二个自然带, 全地膜覆盖, 小区间留走道 0.5 m; 处理 2 (W<sub>6</sub>C<sub>2</sub>I): 处理 1 + 补灌, 即在冬小麦拔节期、玉米大喇叭口期分别滴灌 25 mm; 处理 3 (W<sub>CK</sub>): 冬小麦单

作, 全地膜覆盖, 密度为 3.75 × 10<sup>6</sup> 粒/hm<sup>2</sup>, 行距 0.15 m; 处理 4 (W<sub>CK</sub>I): 处理 3 + 冬小麦拔节期滴灌 25 mm; 处理 5 (C<sub>CK</sub>): 玉米单作, 全地膜覆盖, 密度为 52 500 株/hm<sup>2</sup>, 行距 0.27 m; 处理 6 (C<sub>CK</sub>I): 处理 5 + 玉米大喇叭口期滴灌 25 mm。播前施农家肥 45 000 kg/hm<sup>2</sup>。套作和单作冬小麦分别施纯 N 90 kg/hm<sup>2</sup> 和 135 kg/hm<sup>2</sup>, 纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/hm<sup>2</sup> 和 90 kg/hm<sup>2</sup>, 全作基肥; 套作和单作玉米分别施纯氮肥 180 kg/hm<sup>2</sup> 和 225 kg/hm<sup>2</sup>, 纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup> 和 150 kg/hm<sup>2</sup>, 磷肥全作基肥, 氮肥留 1/3 作大喇叭口期追肥。冬小麦品种为陇鉴 127, 玉米品种为金穗 2001。

### 1.3 测定指标和分析方法

土壤含水量在冬小麦播种前, 收获后测定。玉米收获后分别在冬小麦带、冬小麦玉米交结带、玉米带内按 0—20, 20—40, 40—60, 60—90, 90—120, 120—160, 160—200 cm 分层测定土壤含水量。

带田耗水量以 3 个取样点平均土壤含水量计算, 单位为 mm。

作物水分利用效率 (WUE) = 作物经济产量 / 耗水量; 土地当量比 (LER) = 套作混合产量 / 套作预期产量; 套作预期产量 = 冬小麦单作产量 × 套作冬小麦占地比 + 玉米单作产量 × 套作玉米占地比; 当 LER > 1 时, 说明系统具有增产优势, LER = 1, 说明系统无增产或减产<sup>[6-7]</sup>。数据资料用 SPSS11.0 软件分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理的产量与水分利用特性

套作可显著提高旱地冬小麦和玉米的产量和水分利用效率 (表 1)。以相同供水方式的单作模式为对照计算两种套作模式的 LER, 不补灌时为 1.53, 补灌时为 1.51, 说明该套作模式具有增产作用。不补灌时, 套作产量和水分利用效率较单作冬小麦、单作玉米分别提高了 125.9%, 14.5% 和 68%, 32.9%, 增产作用显著; 补灌时, 套作产量和水分利用效率较两种单作分别提高了 125%, 13.2% 和 57.61%, 22.40%。以单作小麦, 单位玉米产量加权平均为产量对照, 以单作小麦和单作玉米耗水量的加权平均为对照比较发现, 不补灌和补灌套作耗水量增加了 5.7% 和 12.3%, 但产量分别提高了 52.8% 和 50.6%, 即套作提高 WUE 的主要原因是在耗水量增大较小的前提下显著提高了产量。

补灌显著提高了套作的 WUE, 对单作冬小麦和套作作物 WUE 的影响不显著, 同时, 玉米单作供水效率显著高于单作冬小麦和冬小麦套作玉米。

表 1 不同处理的产量及水分利用效率

处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			收获期土壤贮水量/mm	耗水量/mm	WUE/(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	供水效率/(kg·mm·hm <sup>-2</sup> )
	冬小麦	玉米	冬小麦+玉米				
W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	3 553d	7 608d	11 161b	376.3	471.8b	23.66a	—
W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	3 826c	8 475c	12 301a	377.0	521.1ab	23.61a	22.8b
W <sub>CK</sub>	4 864b	—	4 864e	318.72(445.3)	345.4c	14.08d	—
W <sub>CK</sub> I	5466a	—	5 466d	324.3(440.0)	364.8c	14.98d	24.08b
C <sub>CK</sub>	—	9 748b	9 748c	300.4	547.7a	17.80cd	—
C <sub>CK</sub> I	—	10 866a	10 866bc	309.8	563.3a	19.29b	44.72a

注: 小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著, 下表同; 单作冬小麦收获期为 6 月 18 日, 玉米收获期为 9 月 14 日, 括号中数据为 9 月 14 日时单作冬小麦茬地的土壤含水量。

## 2.2 不同处理土壤水分的时空分布

### 2.2.1 不同处理土壤水分的时间分布特征

种植模式对土壤含水量的影响在不同时期存在显著差异(表 2)。冬小麦收获期, 不同处理土壤含水量较播种前下降了 28.34%~33.85%, 其中单作不补灌处理下降幅度最大, 冬小麦套作玉米补灌处理下降幅度最小, 但此时不同处理 2 m 土层内的平均土壤含水量差异不显著。两作收获后, 不同处理 2 m 土层内平均含水量较播种前的变化幅度为 0.07%~29.95%, 其中单作冬小麦不补灌处理土壤含水量与播前持平, 而单作玉米不补灌处理较播前下降幅度最大。模式之间对比, 单作冬小麦、单作玉米、冬小麦套作玉米土壤含水量差异显著, 其中单作冬小麦土壤含水量最高, 套作次之, 单作玉米最低; 同种模式的补灌与未补灌处理土壤平均含水量差异不显著。

### 2.2.2 冬小麦套作玉米土壤水分的空间分布特征

不同处理冬小麦收获期和玉米收获期 2 m 土层中的平均含水量如表 2 所示。套作冬小麦收获和玉米收获时土壤含水量的水平分布存在较大的差异。冬小麦收获时, 套作处理 2 m 土层中的平均含水量在冬小麦带、冬小麦玉米交结带和玉米带内的差异不显著, 表明冬小麦收获前, 两种作物对土壤水分利用的互补作用极小或者不存在水分在空间上的互补作用。玉米成熟期, 冬小麦带内的土壤含水显著高于玉米带内的含水量, 但两者与交结带内土壤的含水量差异不显著。表 2 表明, 单作冬小麦土壤含水量明显高于间作冬小麦带内的土壤含水量, 但单作玉米带内的土壤含水量较间作玉米带内降低, 说明套作群体内土壤水分发生了从冬小麦带内向玉米带内的转移, 形成了套作水分利用在空间上的互补基础。

表 2 不同处理冬小麦收获期和玉米收获期 2 m 土层中的平均含水量

处理	冬小麦收获期				玉米收获期			
	冬小麦带	冬小麦玉米交结带	玉米带	平均	冬小麦带	冬小麦玉米交结带	玉米带	平均
W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	10.49(a)	9.87(a)	10.69(a)	10.35 a	13.76(a)	12.59(ab)	12.20(b)	12.85 b
W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	10.71(a)	10.03(a)	11.27(a)	10.67 a	13.52(a)	12.83(ab)	12.32(b)	12.89 b
W <sub>CK</sub>	10.42	—	—	10.42 a	14.90	—	—	14.90 a
W <sub>CK</sub> I	10.60	—	—	10.60 a	14.74	—	—	14.74 a
C <sub>CK</sub>	—	—	9.85	9.85 a	—	—	10.43	10.43 c
C <sub>CK</sub> I	—	—	10.10	10.10 a	—	—	10.78	10.78 c

注: 括号中的小写字母表示套作不同取样点的土壤含水量在 5% 水平上差异显著。

研究表明, 在春小麦间作玉米和春小麦间作大豆复合群体中, 小麦收获前均处于竞争优势<sup>[12-13]</sup>, 小麦收获后后茬作物均存在显著的后补偿效应, 可显著提高资源利用效率<sup>[8]</sup>; 小麦间作大豆群体内, 两作共生期行间水分消耗多, 小麦收获后, 大豆带内的土壤水分消耗较快, 复合群体这种不同时段土壤水分在水平方向上的变化特征, 有利于 WUE 的提高<sup>[9]</sup>。高产田间作冬小麦的根深可达到 200 cm 的土层, 全生育期

平均根干重的 60% 集中在 0—40 cm 的土层中, 根系 TTC 还原强度呈上小下大变化趋势, 0—40 cm 土层中根系 TTC 还原总量全生育期平均值占 0—160 cm 土体的 66.01%<sup>[10]</sup>; 间作玉米 0—40 cm 土层中的根干重占总根重的 85%, 但根系活力呈上小下大趋势, 大口期 40 cm 以下根系活力较高, 此后随生育进程的推进, 根系活性的高位点持续下移, 乳熟期已达到 80 cm 土层以下<sup>[11]</sup>, 说明间作冬小麦水分与养分的吸收

层次主要在相对较浅的土层,而间作玉米有利于吸收利用深层次的养分与水分,这种特性与本研究 2 种作物收获后土壤含水量的空间差异相吻合。

不同处理不同土层内土壤含水量差异较大(表 3)。冬小麦成熟期,同一土层不同处理间的土壤含水量差异极小,但同一处理不同土层的土壤含水量差异较大,其中 120 cm 以下是含水量较高且变化极小的土层,而含水量变化最大的在 40—90 cm 土层。0—20, 21—40, 41—60, 61—90, 91—120, 121—160, 161—200 cm 7 个土层土壤含水量的变异系数在 6 个处理中的变化范围分别为 4.09%~4.57%, 2.58%~2.77%, 6.52%~7.70%, 6.43%~7.80%, 3.79%~4.21%, 1.67%~1.75%, 0.68%~0.70%(表 4)。

玉米成熟期,不同处理 0—20 cm 的含水量均大于其它土层,且在 0—60 cm 的范围内随土层加厚含

水量随之降低,但在 61—90 cm 内略有提高,90 cm 以下土壤含水量持续下降。处理间相比,单作玉米所有土层中的含水量均显著低于单作冬小麦,在 0—120 cm 土层中显著低于套作,套作含水量介于两种单作模式之间,同一模式补灌与未补灌处理间的差异不显著。与小麦收获期不同,不同处理不同土层中的土壤含水量变异系数明显增大,变化范围分别为 14.24%~21.73%, 13.07%~18.75%, 13.92%~20.81%, 13.75%~20.29%, 12.14%~17.28%, 11.23%~15.11%, 10.10%~13.09%, 即这一时期土壤含水量的变异系数除 21—40 cm 土层外,随深度的增加变异系数减小,这一结果与张恩和等人在小麦间作大豆中的研究结果相似<sup>[13]</sup>。比较不同处理土壤含水量在不同层次中的变异系数发现,单作玉米>冬小麦套作玉米>单作冬小麦。

表 3 不同处理冬小麦成熟期和玉米收获期不同土层中的土壤含水量

%

处理	不同土层土壤含水量							
	161—200 cm	0—20 cm	21—40 cm	41—60 cm	61—90 cm	91—120 cm	121—160 cm	
冬小麦成熟期	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	8.37 ab	7.48 a	8.47 a	9.61 a	11.46 a	13.74 a	13.33 a
	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	9.07 a	7.95 a	8.68 a	10.02 a	11.97 a	13.59 a	13.38 a
	W <sub>CK</sub>	8.65 a	7.73 a	8.79 a	9.79 a	11.65 a	13.11 a	13.24 a
	W <sub>CK</sub> I	8.94 a	7.83 a	8.84 a	10.21 a	11.82 a	13.32 a	13.22 a
	C <sub>CK</sub>	8.12 b	7.41 a	7.48 b	8.42 b	10.78 a	13.46 a	13.27 a
	C <sub>CK</sub> I	8.34 ab	7.66 a	7.76 ab	9.14 ab	11.08 ab	13.27 a	13.46 a
玉米成熟期	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	14.68 b	13.22 b	12.46 b	13.12 b	12.51 b	12.22 ab	11.72 ab
	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	15.11 ab	13.46 ab	12.25 b	13.30 b	12.29 b	12.46 ab	11.33 ab
	W <sub>CK</sub>	17.19 a	15.66 a	14.44 a	15.15 a	14.66 a	14.06 a	13.12 a
	W <sub>CK</sub> I	17.21 a	15.44 a	14.23 a	15.17 a	14.22 a	13.78 a	13.16 a
	C <sub>CK</sub>	11.28 c	10.92 c	9.66 c	10.28 c	10.30 c	10.45 b	10.15 b
	C <sub>CK</sub> I	12.31 c	11.04 c	10.07 c	10.78 c	10.67 c	10.36 b	10.22 b

表 4 冬小麦成熟期和玉米成熟期不同土层含水量的变异系数

%

处理	不同土层土壤含水量							
	161—200 cm	0—20 cm	21—40 cm	41—60 cm	61—90 cm	91—120 cm	121—160 cm	
冬小麦成熟期	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	4.43	2.74	6.80	6.84	3.96	1.67	0.69
	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	4.09	2.58	6.64	6.56	3.79	1.69	0.69
	W <sub>CK</sub>	4.29	2.65	6.55	6.71	3.90	1.75	0.69
	W <sub>CK</sub> I	4.15	2.62	6.52	6.43	3.84	1.72	0.70
	C <sub>CK</sub>	4.57	2.77	7.70	7.80	4.21	1.70	0.69
	C <sub>CK</sub> I	4.45	2.68	7.42	7.19	4.10	1.73	0.68
玉米成熟期	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub>	16.70	15.48	16.13	15.90	14.23	12.92	11.34
	W <sub>6</sub> C <sub>2</sub> I	16.22	15.21	16.41	15.68	14.48	12.67	11.73
	W <sub>CK</sub>	14.26	13.07	13.92	13.77	12.14	11.23	10.13
	W <sub>CK</sub> I	14.24	13.26	14.13	13.75	12.52	11.46	10.10
	C <sub>CK</sub>	21.73	18.75	20.81	20.29	17.28	15.11	13.09
	C <sub>CK</sub> I	19.91	18.54	19.96	19.35	16.68	15.24	13.00

### 3 结论

冬小麦套作玉米可显著提高两作产量和 WUE, 套作较单作冬小麦和单作玉米产量的加权平均提高了 50.6% ~ 52.8%, WUE 提高了 43.93% ~ 48.43%。低定额补充灌溉使冬小麦套作玉米和单作冬小麦的产量显著提高, 但补灌单作玉米的增产作用不显著; 补充灌溉显著提高了间作玉米的 WUE, 但补灌对单作冬小麦和套作 WUE 的增加效果不显著, 有限灌水在单作玉米中的供水效率显著高于单作小麦和套作。

冬小麦套作玉米水分利用的互补作用主要发生在冬小麦收获后, 小麦带中的水分对玉米产量存在显著贡献。研究表明, 间套复合群体内, 不同作物根系发育存在显著的异步性, 是形成资源利用互补的重要原因<sup>[12-13]</sup>。本研究试区内, 玉米生长前期降水较少, 生长发育较慢, 对土壤水分的消耗量较小, 但冬小麦在返青后, 根系发育加快, 对土壤水分的适应能力加强, 加之小麦全生育期需水量小于玉米, 在干旱程度相对较轻的条件下能够正常生长发育。与冬小麦相比, 玉米生长发育盛期与降水季节吻合性较高, 种植玉米有利于提高当季降水的利用效率, 但玉米单作时土壤水分消耗过多, 使下茬冬小麦底墒不足, 不利于茬口的衔接。旱作农业区, 播前底墒水平与作物产量和 WUE 呈显著正相关<sup>[14-16]</sup>。本研究中, 套作、单作冬小麦、单作玉米的土壤相对含水量在玉米收获后分别为 59.04%、67.98% 和 48.60%。由于玉米收获期与冬小麦播种期间隔时间很短, 因此单作玉米较低的土壤含水量不利于下茬冬小麦的高产, 套作在前茬作物高产的基础上保持了相对较高的底墒水平, 可作为高效衔接前后茬的选择模式<sup>[17]</sup>。

旱作冬麦区, 麦收到下茬冬小麦播种前是蓄纳雨水的重要季节, 传统单作种植时, 由于地表裸露, 水分蒸发, 无效损耗严重, 冬小麦套作玉米延长了地面的覆盖时间, 可使有限降水的有效化程度提高, 但冬小麦收获后的套作玉米田内, 小麦带仍是水分蒸发损耗的重要区域, 研究降低小麦带收获后水分损失的相关技术应作为今后旱农区间套作研究的重点之一。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 柴强, 黄高宝. 集雨补灌对冬小麦套作玉米生长特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 76—79.  
[2] 曹国璠, 张荣达, 胡建风, 等. 马铃薯高产高效间套作种

模式研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 149—151.

- [3] 易小平, 唐树梅, 余雪标, 等. 海南坡地芒果园间作体系水土流失养分损失初步研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 93—96.  
[4] Mandal B K, Dagupta S, Ray P K. Yield of wheat, mustard and chickpea grow as sole crop and intercrop with 4 moisture regimes[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1986, 56(3): 187—193.  
[5] Morris R A, Garrity D P. Resources capture and utilization in intercropping: water[J]. Field Crops Research, 1993, 34: 303—317.  
[6] Willey R W. Intercropping: its importance and research needs. Part 1 Competition and yield advantages [J]. Field Crop Abstracts, 1979, 32(1): 1—10.  
[7] 胡恒觉, 黄高宝. 新型多熟种植[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1998.  
[8] 任三学, 赵花荣, 霍治国, 等. 有限供水对夏玉米根系生长及底墒利用影响的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 161—165.  
[9] 王勇. 旱地地膜冬小麦播前底墒对产量效应的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 117—120.  
[10] 任三学, 赵花荣, 郭安红, 等. 底墒对冬小麦植株生长及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 79—85.  
[11] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 底墒对小麦根冠生长及土壤水分利用的影响[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 149—154.  
[12] Long L, Jianhao S, Fusuo Z, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. Field Crops Research, 2001, 71: 173—181.  
[13] 张恩和, 吴圣龙, 黄高宝. 施肥对小麦/大豆间套农田土壤水分时空分布的调节[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 64—68.  
[14] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 214—219.  
[15] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 间套作条件下作物根系数量与活性的空间分布及变化规律研究. 间作早春玉米根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 974—979.  
[16] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1301—1304.  
[17] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间套农田水、肥与根系的时空协调性研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 53—56.