

水肥调控下苹果 – 玉米间作系统作物生长及经济效益分析

高 飞¹,王若水^{1,2},许华森¹,王冬梅¹,杨宗儒³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测站,山西 吉县 042200;
3.山西吉县林业服务中心,山西 吉县 042200)

摘 要: 为了探求适用于晋西黄土区果粮间作系统的水肥管理制度,以当地典型的苹果 – 玉米间作系统为研究对象,通过设置二因素三水平水肥耦合试验,分析不同水肥调控下玉米灌浆期穗位叶叶绿素和叶水势相对含量及水平分布特征,从而建立灌水量、施肥量与各叶片生理指标及产量的回归关系,进一步分析各处理投入产出值及经济收益。试验设置灌水量上限三水平分别为:田间持水量(F_c)的 50% (W_1)、65% (W_2)和 85% (W_3),施肥量分别为: $N\ 289\ kg\cdot hm^{-2} + P_2O_5\ 118\ kg\cdot hm^{-2} + K_2O\ 118\ kg\cdot hm^{-2}$ (F_1 , 70% 经验施肥量)、 $N\ 412.4\ kg\cdot hm^{-2} + P_2O_5\ 168.8\ kg\cdot hm^{-2} + K_2O\ 168.8\ kg\cdot hm^{-2}$ (F_2 , 100% 经验施肥量)、 $N\ 537\ kg\cdot hm^{-2} + P_2O_5\ 219\ kg\cdot hm^{-2} + K_2O\ 219\ kg\cdot hm^{-2}$ (F_3 , 130% 经验施肥量)。结果表明:水肥调控对植物叶绿素含量影响较小,对叶水势影响较大;随着施肥量的增加,植物叶水势、叶面积指数及产量均逐渐减小;不同水肥调控措施通过种间竞争对叶片生理参数产生的影响不同。玉米叶绿素随着距树行距离的增加而逐渐递增,不同灌溉水平对距树不同距离处玉米叶水势影响差异较大。多元回归分析结果显示:当全生育期氮肥施用量为 $289\ kg\cdot hm^{-2}$ 、磷肥施用量为 $118\ kg\cdot hm^{-2}$ 、钾肥施用量为 $118\ kg\cdot hm^{-2}$,间作系统可获得较高的产量,理论最大值分别为 $10\ 133.50\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $10\ 205.90\ kg\cdot hm^{-2}$ 。在本次试验设计范围内采用全生育期灌水上限设定值为田间持水量的 50%,总施肥量为 $525\ kg\cdot hm^{-2}$ (F_1 , 70% 经验施肥量)的水肥管理制度可使间作系统净收益最高,可达 $10\ 470.38\ 元\cdot hm^{-2}$ 。因此,低量灌水和施肥不仅可使系统净收益最大,还可避免盲目施肥和灌溉造成的环境污染和资源浪费,是最有利于晋西黄土区果粮间作系统的水肥管理制度。

关键词: 水肥耦合;果粮间作;叶绿素;叶水势;产量;净收益

中图分类号: S344.2 **文献标志码:** A

Analysis of crop growth and economic benefit in an apple – maize intercropping system under water and fertilizer coupling

GAO Fei¹, WANG Ruo-shui^{1,2}, XU Hua-sen¹, WANG Dong-mei¹, YANG Zong-ru³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian Forest Ecosystem State Field Science Observatory, Jixian, Shanxi 042200, China;
3. Jixian Forestry Service Center, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: In order to investigate the effects of water and fertilizer coupling on physiological index of leaves, yield and economic benefit in an apple – maize intercropping system, an experiment of water and fertilizer coupling was carried out in the Loess Plateau of Shanxi Province. The irrigation regimes were established by three threshold levels of soil moisture as follows: W_1 , 50% field capacity (50% F_c); W_2 , 65% field capacity (65% F_c); W_3 , 85% field capacity (85% F_c). Meanwhile, three fertilizer levels were also set up in this experiment, including F_1 , $N(289\ kg\cdot hm^{-2}) + P_2O_5(118\ kg\cdot hm^{-2}) + K_2O(118\ kg\cdot hm^{-2})$, F_2 , $N(412.4\ kg\cdot hm^{-2}) + P_2O_5(168.8\ kg\cdot hm^{-2}) + K_2O(168.8\ kg\cdot hm^{-2})$, F_3 , $N(537\ kg\cdot hm^{-2}) + P_2O_5(219\ kg\cdot hm^{-2}) + K_2O(219\ kg\cdot hm^{-2})$. The results showed that water and fertilizer coupling had little effect on chlorophyll content, but had a significant effect on leaf water potential. With the increase of fertilizer amount, leaf water potential, leaf area index and yield gradually decreased. Different water and fertilizer coupling measures had different effects on physiological parameters of leaves through competition between species. Chlorophyll content of maize increased with the increase of distance from the tree row, and the effect of different irrigation levels on leaf water potential of maize at different distances from the tree row was different. The results of multiple regression analysis showed that when the total nitrogen application amount during the whole growth period was $289\ kg\cdot hm^{-2}$, the total phosphorus application amount was $118\ kg\cdot hm^{-2}$, and the total potassium application amount was $118\ kg\cdot hm^{-2}$, the intercropping system could obtain a higher yield, and the theoretical maximum values were $10\ 133.50\ kg\cdot hm^{-2}$ and $10\ 205.90\ kg\cdot hm^{-2}$. Within the range of the experimental design, the water and fertilizer management regime with the upper limit of irrigation set as 50% of field capacity and the total fertilizer amount as $525\ kg\cdot hm^{-2}$ (F_1 , 70% experience fertilizer amount) could make the net benefit of the intercropping system the highest, reaching $10\ 470.38\ 元\cdot hm^{-2}$. Therefore, low irrigation and fertilization not only can maximize the net benefit of the system, but also can avoid blind fertilization and irrigation caused by environmental pollution and resource waste, which is the most beneficial water and fertilizer management regime for the apple-maize intercropping system in the Loess Plateau of Shanxi Province.

收稿日期:2016-05-13 修回日期:2017-03-20
基金项目:国家科技计划课题“黄土残塬区水资源节约型农林复合系统调控技术与示范(2015BAD07B0502);国家自然科学基金“果农间作系统林下太阳辐射时空分布及其对间作作物的影响(31470638);国家自然科学基金“晋西黄土区果农间作系统的水肥耦合试验研究”(31300530)
作者简介:高 飞(1991—),女,黑龙江人,研究生,主要研究方向为复合农林。E-mail:15201443407@163.com。
通信作者:王若水(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为农业水土资源高效利用,盐碱地水盐调控,复合农林。E-mail:wrsily_2002@163.com。

hm^{-2}), and F3, $\text{N}(537 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}) + \text{P}_2\text{O}_5(219 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}) + \text{K}_2\text{O}(219 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$. The results are summarized as follows: Irrigation and fertilization had no significant effect on chlorophyll content while significant effects were found on leaf water potential. The leaf water potential, leaf area index, maize yield all decreased with the increasing of fertilizer rate; while chlorophyll content increased with the increasing of the distance from the tree line. Different irrigation levels had considerable influences on the horizontal distributions of leaf water potential. According to the analysis of multiple regression, the maximum maize yield could obtained when $289 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer, $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ phosphorus fertilizer, $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ potassium fertilizer was applied during the whole stages. The theoretical maximum yield can be $10\ 133.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $10\ 205.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. According to the results of economic benefit analysis, the maximum economic benefit could obtained when no fertilizer applied at jointing stage, $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ fertilizer applied at tasseling stage and filling stage and irrigating water upper limits (about 85% field capacity). The net income can be $10\ 470.38 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$. Therefore, the treatment with relatively low amount of irrigation water and applied fertilizer can not only obtain the maximum economic benefit but also can avoid the pollution to soil and underground water and resource waste caused by unreasonable fertilization and irrigation. Accordingly, it was the most economical and environmental irrigation and fertilizer regulation method for the apple-maize intercropping system.

Keywords: water and fertilizer regulating; apple-maize intercropping system; chlorophyll; leaf water potential; yield; net income

晋西黄土区是典型的气候干旱区,土壤贫瘠,降雨稀少。恶劣的土壤和气候环境严重限制该地区的农业生产。果粮间作系统因其良好的生态和经济效益,被广泛推广应用,成为该地区主要农业经营模式。苹果和玉米是当地主要的经济树种和粮食作物,但果树生长周期长、效益滞后,为充分利用现有土地资源,稳定经济收入,在未坐果的幼龄果树行间间作玉米成为该地区现行较广泛的土地集约利用方式之一。目前,该地区苹果种植面积 1.87 万 hm^2 ,农作物播种总面积 1.56 万 hm^2 ,其中果园间作面积 1.03 万 hm^2 ,占果园总面积的 55%,玉米总播种面积 0.59 万 hm^2 ,间作 0.38 万 hm^2 ,占 64.1%。但晋西黄土残塬地区土壤养分存储量有限,且降雨多集中在 6—8 月,时空分布极不平衡,果粮间作必会产生激烈的水肥资源竞争^[1-5],造成该地区间作系统土壤水分与养分进一步亏缺。为缓解这种趋势,必须在间作系统缺水缺肥的关键期进行水与肥的补给^[6]。

大量研究表明,盲目的施肥和灌溉会导致资源浪费和环境污染,合理的水肥管理措施才可达到“水肥互促”的目的^[7-9]。果粮间作系统种间生态位重叠较大,对水分、养分的竞争更加激烈^[10-14],极易产生水肥亏缺从而限制系统产出。所以在干旱贫瘠的晋西黄土区,对间作系统进行水肥耦合试验,探究水分和肥料对植株形态、生理及产量等方面的影响^[15],探求适用于该地区水肥优化组合,对该地区的环境^[16]和经济发展都有着重要的实践指导意义。

叶片的生理指标直接反映植株生理状况,同时影响着植物光合性能的发挥,从而限制干物质的积

累和最终产量及经济效益的形成^[17-19]。目前,一些学者对水肥控制条件下植物叶片生理参数进行了较多研究^[20-23],但对于农林复合系统植物叶片生理指标变化特征及其与水肥调控的定量关系方面的研究较少。本文以晋西黄土区典型的苹果-玉米间作系统为研究对象,研究不同水肥处理条件下作物叶片生理参数、产量特征和经济效益,及其与灌水施肥量的定量关系,为该地区果粮间作系统建立合理高效的水肥管理制度提供理论依据,为水肥调控条件下种间互作机制的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西省吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站石山湾试验基地($36^{\circ}00' \sim 36^{\circ}13' \text{N}$, $110^{\circ}31' \sim 110^{\circ}56' \text{E}$),该地属于黄土残塬沟壑区,表层为第四纪风积黄土,呈微碱性反应($\text{pH} = 7.9$),土壤贫瘠,有机质含量在 1% 以下,其中供试果园全氮含量 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $7.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量 $4.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,0~60 cm 土层平均孔隙度 52.54%^[1]。该地区属温带大陆性气候,年平均降水量 575.9 mm,主要集中在 6—8 月,约占全年降水量的 80.6%,年平均蒸发量为 1 723.9 mm,4—7 月蒸发量占全年蒸发量的 54%。年平均无霜期 170 d 左右,平均气温 10°C ,平均积温 $3\ 357.9^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 试验设计

1.2.1 灌水量设定 试验于 2014 年 4—9 月进行。

根据二因素三水平试验设置,共设 9 个处理,另设一组空白对照处理,重复 3 次,随机区组设计。试验苹果树为 4 年生,株高 2.2 m,胸径 4.2 cm,冠幅 1.5 m,冠高 1.2 m,尚未开始坐果,株行距为 4 m×5 m,树行为东西走向;玉米株行距为 0.5 m×0.6 m,每个小区共 4 棵果树,小区边缘距离树 1 m(图 2),小区面积为 42 m²。

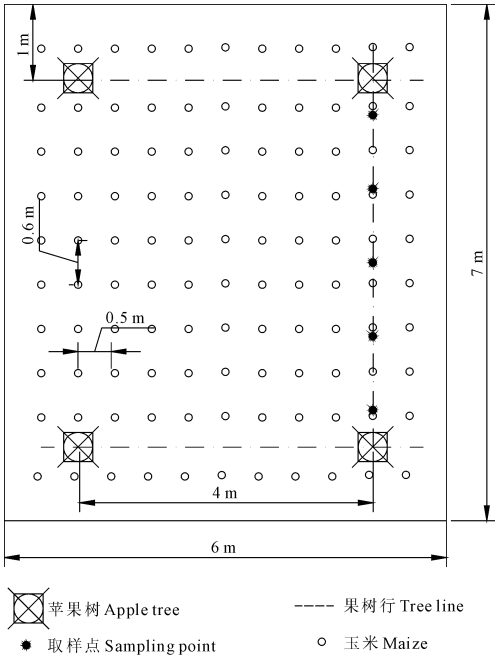


图 2 试验小区及采样点布设图
Fig.2 Experiment plot and sampling sites

1.3 各叶片生理参数及产量的测量方法

玉米叶绿素测定:在两行果树之间,垂直于果树行方向上布设一条样线,样线上布设样点(图 2)。从距离树行 0.5 m 处布设第一个取样点,之后每隔 1 m 布设一个取样点。在玉米灌浆期,运用便携式叶绿素仪测量玉米穗位叶片基部 2/3 处的 SPAD 值(叶绿素含量相对值)^[28]。

玉米叶水势测定:取样线布设同叶绿素一致,取样点选取距果树行 0.5 m,1.5 m,2.5 m 的三株玉米。在玉米灌浆期,运用露点水势仪测量玉米穗位叶叶片水势。

苹果叶绿素和叶水势测定:每棵果树选取 5 枚发育正常、无病虫害的叶片测定叶水势及叶绿素,小区内 4 棵果树取平均值。

产量测定:收获期(10 月 27 日),分小区测量玉米产量。

1.4 生产成本与经济收入计算方法

所有苹果 – 玉米间作系统利用的土地价值均认为是相同的,不考虑该项成本。间作系统农业生产

过程的成本包括资金投入和劳动力投入两部分。资金投入项目包括作物种子、化肥、灌溉水、农药,这些生产材料的价格均依照当地的农业生产水平执行。农业生产过程的劳动力投入主要包括土地翻耕、除草、施肥、灌水等项目产生的雇佣劳动力的投入。其中,雇工成本按照 2014 年当地平均雇工工资计算(人工 130 元·人⁻¹·d⁻¹)。另外,根据当地经济发展状况,农民在从事农业生产之外并不能获得其它工作机会或收入,所以,未将土地经营者所投入的个人或家庭成员劳动力作为生产成本。资金和劳动力的成本通过对各个农业生产系统经营者进行问卷调查的方式获取^[29]。由于本试验选取的幼龄果树尚未坐果,而且作物秸秆采用还田的方式进行处理,所以苹果//玉米间作系统的经济收入均来自玉米产量,经济收入根据作物产量和 2014 年当地的收购价格计算(1.6 元·kg⁻¹)。

1.5 数据处理与分析

运用 Excel 2010 软件进行数据统计及图表制作,运用 SPSS 16.0 软件进行方差分析及多重比较,运用 Matlab 2012 软件进行多元回归分析。为便于用叶片参数表征水肥补给对两物种种间竞争关系的影响,引进叶片参数相对值^[30]: $R = \frac{\text{试验组两物种叶片参数差值}}{\text{对照组两物种叶片参数差值}}$; $R > 1$ 表明水肥补给加剧种间竞争对叶片参数的影响, $R < 1$ 表明水肥补给缓解种间竞争对叶片参数的影响。

2 结果与讨论

2.1 水肥调控对叶片生理参数及产量的影响

各处理叶片生理参数及产量如表 2 所示。各试验组与对照组叶绿素含量均无显著差异,说明水肥处理对叶绿素含量的影响相对较小。苹果及玉米的叶水势均受施肥量因素的影响较大:水肥补给显著降低苹果的叶水势,降幅达 17.56% ~ 214.4%,而高水高肥处理(W₃F₃)的叶水势显著低于其它组,可能是由于大量施肥导致植物吸收营养物质的量增加,叶片溶质浓度变大,导致叶水势降低^[31]。玉米叶水势随着施肥量的增加总体逐渐降低:在低施肥量(F₁)条件下,玉米叶水势随着灌水量的增加而逐渐升高,且达到显著水平,说明低量施肥时提高灌水量可有效改善植物水分状况;中施肥量(F₂)条件下,不同灌溉水平叶水势无显著差异;高施肥量(F₃)条件下,叶水势随着灌水量的增加缓慢降低。说明随着施肥量的增大,灌水量对叶水势的增益作用逐渐减弱。叶面积指数及玉米产量均随着施肥量的增大而

减小,不同施肥水平对作物产量的影响达到显著差异水平。大量的研究结果显示,水肥的增产作用存在一个最适值,当投入量低于最适投入量时,随着投入量的增加,产量也随之增加;达到最适投入量时,产量最高;投入量继续加大,产量则随之减小^[32-33]。所以在本试验中产量随着施肥量的增加反而减少,但水肥补给的试验组仍然较对照组显著提高作物产量,提高幅度达 954.8 ~ 1 281.3 kg·hm⁻²,增产 10.74% ~ 14.42%。由叶绿素及叶水势 *R* 值可以看出,不同水肥调控模式使得种间竞争对

叶片生理参数的影响不同:对于叶绿素来说,施肥水平为 F1、F3 的处理加剧了种间竞争对叶绿素的影响 (*R* > 1),对于叶水势来说,试验组 W₁F₁、W₂F₃、W₃F₃ 均使叶水势 *R* 值显著增加 (*R* > 1),即此种情况下会加剧种间竞争对叶水势的影响。这是由于叶绿素和叶水势受土壤水肥状况及地上光照状况的共同影响,而水肥状况也会导致地上光竞争的改变,所以水肥调控对叶片生理指标的影响是通过地上部分和地下部分综合作用产生的,因此不同水肥调控措施通过种间竞争对叶片生理参数产生的影响不同。

表 2 不同水肥处理对叶绿素、叶水势、叶面积指数和产量的影响

Table 2 Effects of different water and fertilizer treatments on SPAD value, leaf water potential, LAI and yield

试验处理 Treatment	生理指标 Physiological indexes							
	苹果叶片 SPAD 值	玉米叶片 SPAD 值	叶绿素 <i>R</i> 值	苹果叶片 水势/MPa	玉米叶片 水势/MPa	叶水势 <i>R</i> 值	叶面积 指数	玉米产量
	Apple SPAD values	Maize SPAD values	Chlorophyll <i>R</i>	Apple water potentia	Maize water potentia	Leaf water potentia <i>R</i>	Leaf area index	Maize yeild /(kg·hm ⁻²)
W ₁ F ₁	55.8 ± 0.8a	61.3 ± 1.2ab	1.77a	- 4.00 ± 1.20a	- 5.88 ± 0.54ad	2.09a	2.71 ± 0.31ab	10116.8 ± 40a
W ₂ F ₁	57.0 ± 2.0a	64.0 ± 2.2a	2.26b	- 3.75 ± 0.82ab	- 3.95 ± 0.64b	0.22b	2.92 ± 0.07a	10116.5 ± 31.4a
W ₃ F ₁	56.1 ± 3.4a	59.2 ± 0.9ab	1.00cd	- 3.74 ± 1.02ab	- 3.43 ± 0.38c	0.34bf	2.93 ± 0.28a	10166.8 ± 17.4a
W ₁ F ₂	56.9 ± 1.6a	59.3 ± 1.2ab	0.77c	- 6.22 ± 0.47c	- 5.45 ± 0.88a	0.86ce	2.79 ± 0.09ac	10001 ± 23b
W ₂ F ₂	55.2 ± 2.1a	57.5 ± 1.7b	0.74c	- 6.98 ± 0.95d	- 5.83 ± 0.32ad	1.28d	2.81 ± 0.03ad	10016.1 ± 20b
W ₃ F ₂	57.4 ± 2.7a	60.9 ± 2.0ab	1.13d	- 6.45 ± 0.29cd	- 5.60 ± 0.72a	0.94c	2.59 ± 0.23bcde	10056 ± 17.4b
W ₁ F ₃	57.0 ± 0.9a	60.0 ± 1.3ab	0.97cd	- 6.80 ± 0.34d	- 6.26 ± 0.13e	0.60fe	2.53 ± 0.11bcde	9840.3 ± 15.1c
W ₂ F ₃	55.0 ± 1.2a	61.9 ± 1.2ab	2.23b	- 8.70 ± 0.20e	- 6.38 ± 0.37f	2.58g	2.40 ± 0.12e	9840.4 ± 26.1c
W ₃ F ₃	54.2 ± 1.0a	63.5 ± 1.6a	3.00e	- 10.03 ± 0.30f	- 6.68 ± 0.48df	3.72h	2.41 ± 0.03e	9935.7 ± 23c
CK	55.2 ± 0.1a	58.3 ± 1.5ab	—	- 3.19 ± 0.13b	- 4.09 ± 0.28b	—	2.45 ± 0.03be	8885.5 ± 35d

注:同列数值后不同字母表示处理间差异显著 (*P* < 0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference at *P* < 0.05.

方差分析结果显示(表 3),灌水处理对叶水势有极显著的影响,对其它指标无显著影响;施肥量对叶绿素无显著影响,对其它指标均有极显著影响;水肥交互作用对植物水势及玉米叶绿素含量有极显著影响;*F* 值显示:施肥处理对叶片各生理参数和产量的影响程度较灌溉处理和距树行距离大。树距对玉米叶绿素含量及叶水势都有着极显著的影响,但灌水量与距树距离、施肥量与距树距离以及三者的交互作用均对玉米叶绿素无显著影响,这说明水肥补给可使距果树不同距离的玉米叶绿素含量差异减小。

2.2 玉米叶片生理参数水平分布特征

2.2.1 玉米叶绿素水平分布 叶绿素是光合作用重要的光敏化剂,其含量越高,其潜在的光合能力就越强,其体内积累的光合产物也就越多^[35-37]。叶绿素含量与灌溉量和施肥量密切相关^[35]。

苹果//玉米间作系统叶绿素的水平分布状况如图 3 所示。玉米叶绿素含量随着距离果树行距离的增加逐渐增加,由于四年生果树植株小,郁闭度低,近树行侧玉米接受光照强,叶绿素分解较快,而随着距树距离的增加光照变弱,光合消耗的叶绿素也变少。试验组远树行玉米较近树行玉米叶片叶绿素含量提高 6.10% ~ 9.44%,对照组远树行玉米较近树行玉米叶绿素含量提高 12.4%,说明水肥补给可能一定程度上弱化了叶绿素水平分布的差异性,对种间竞争有一定的缓解作用。一些试验组变化趋势表现为北侧近树行玉米叶绿素含量较低,可能是由于光照强度弱,抑制叶绿素的生物合成。总之叶绿素的合成与分解受到光照、温度、水分、养分等因素的共同影响^[38]。所以距树行不同距离处土壤水分、养分以及小气候的变化造成了叶绿素水平分布的差异。

表 3 灌水量、施肥量以及距树距离的方差分析

Table 3 Variance analysis of irrigation-fertilization rate and distance from tree

影响因素 Factor	显著性检验 <i>F</i> 值 Significance test <i>F</i> value					
	苹果 SPAD 值 Apple SPAD value	玉米 SPAD 值 Maize SPAD value	苹果叶片水势/MPa Apple leaf water potentia	玉米叶片水势/MPa Maize leaf water potentia	叶面积指数 Leaf area index	玉米产量 Maize yeild/(kg·hm ⁻²)
灌水量 Irrigation rate	0.223	1.525	27.392 **	119.332 **	0.555	2.646
施肥量 Fertilizer rate	0.393	9.458 **	490.069 **	376.299 **	21.735 **	133.583 **
距树距离 Distance from a tree	—	5.824 **	—	77.858 **	—	—
灌水量 × 施肥量 Irrigation rate × Fertilizer rate	0.614	8.787 **	2.824 **	55.903 **	2.677	2.760
灌水量 × 距树距离 Irrigation rate × Distance from tree	—	0.456	—	185.507 **	—	—
施肥量 × 树距 Fertilizer rate × Distance from tree	—	0.992	—	152.159 **	—	—
灌水量 × 施肥量 × 树距 Irrigation rate × Fertilizer rate × Distance from tree	—	0.649	—	30.636 **	—	—

注：* 表示影响显著 ($P < 0.05$)，** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。下同。
Note: * indicates significant at $P < 0.05$; ** indicates vary significant at $P < 0.01$. The same as below.

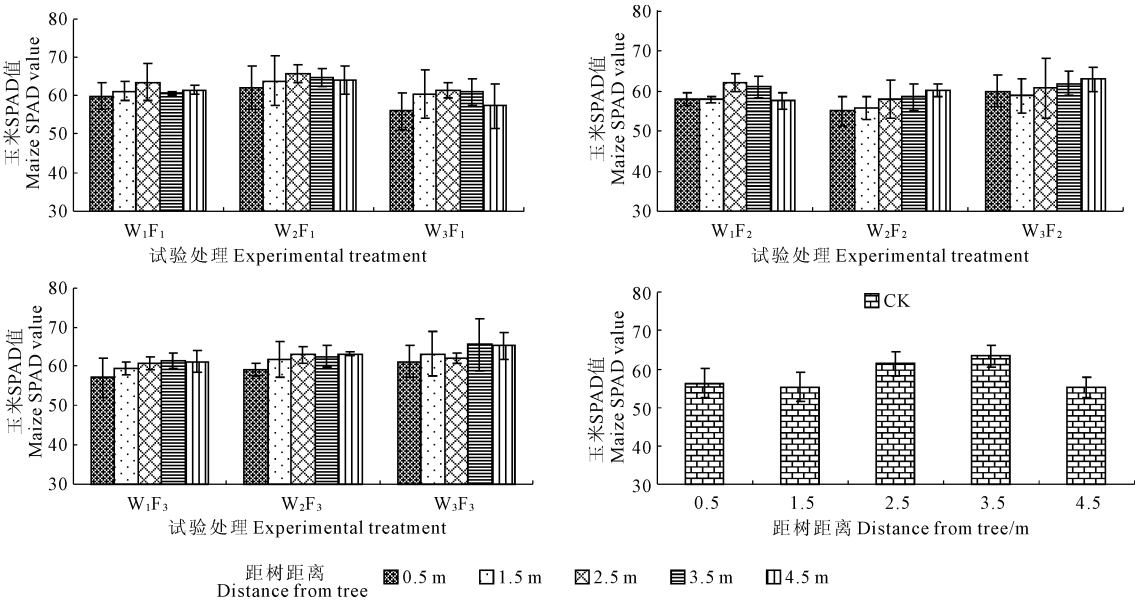


图 3 不同水肥处理玉米 SPAD 值水平分布

Fig.3 Horizontal distribution of leaf SPAD value in different water and fertilizer treatments

2.2.2.2 玉米叶水势水平分布 叶水势的高低既可反映土壤供水能力和作物缺水程度,也可反映叶片从其它器官吸水的能力^[31]。各处理玉米叶水势水平变化趋势如图 4 所示,灌水量对叶片的水平分布影响较大,50% Fc 灌溉水平下,玉米叶水势随着距树距离的增加而增加,65% Fc 灌溉水平下,玉米叶水势随着距树行距离的增加先增大后减小。85% Fc 灌溉水平下,植物叶水势水平分布各异。在土壤 – 植物 – 大气三者组成的连续体中,植物水势受到土

壤和大气水分的双重影响^[39]。低灌水量条件下,作物与林木种间水分竞争较激烈,植物为了维持正常生长,会降低自身叶水势以适应环境,所以灌溉水平为 50% Fc 的试验组,植物叶水势明显要低于灌溉水平为 65% Fc 和 85% Fc 的两个组别,并且随着距树行距离的增大,叶水势逐渐升高;而随着灌水量的增加,种间水分竞争逐渐减弱,植物叶水势受土壤水分的影响程度降低^[40],受大气条件的影响增大,有研究表明远树侧较低的气孔导度可导致叶水势升

高^[6];灌水量较高的情况下,土壤水分不是作物水势的主要限制因子,叶水势受大气因子及作物本身调

节作用等多种因素的共同影响,导致 85% Fc 灌溉水平的组别叶水势水平变化较为复杂^[41]。

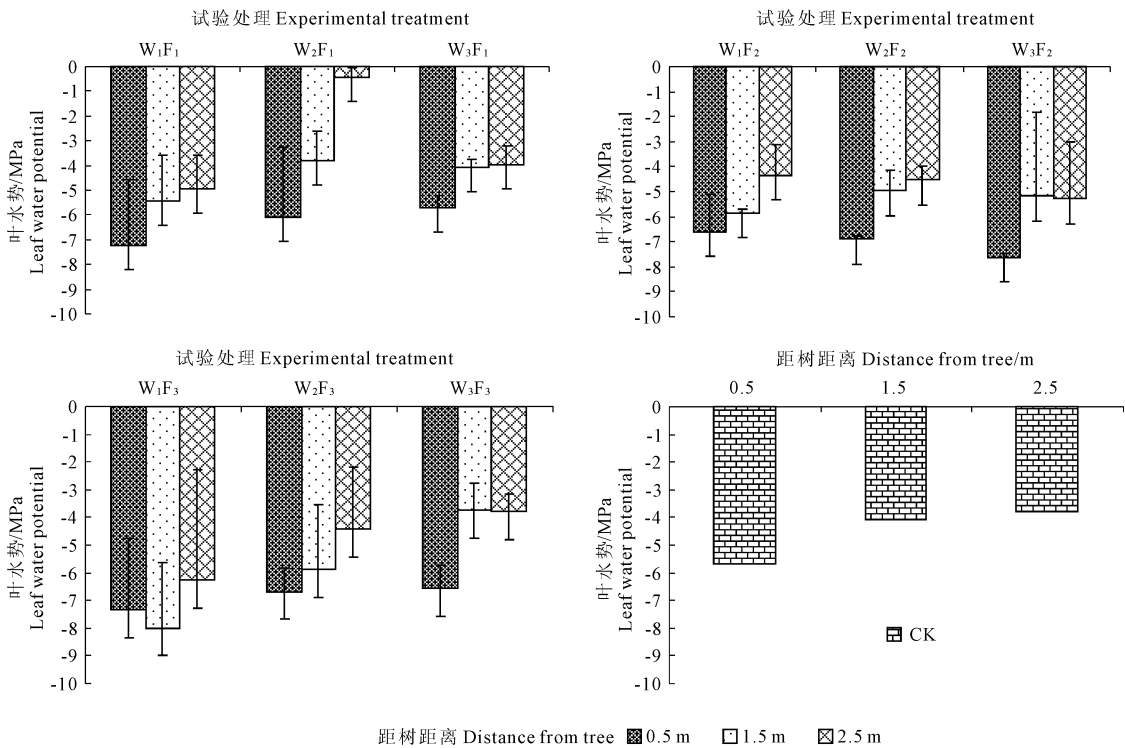


图 4 不同水肥处理玉米叶水势水平分布

Fig.4 Horizontal distribution of leaf water potential in different water and fertilizer treatments

2.3 灌水量、施肥量与叶片生理参数及产量的定量关系

建立叶片生理参数及产量与灌水量和氮肥施用量、灌水量和磷肥施用量、灌水量和钾肥施用量的非线性回归关系,剔除不显著的项,得到各指标的回归方程如表 6 所示。由方程可知,本试验中,苹果//玉米的叶水势和叶面积指数以及作物产量与灌水量和施肥量的回归关系均达到显著水平,这与前人^[42-43]的研究结果类似。由产量回归方程可知,灌水项不显著,说明肥料是影响产量的决定性因素,这也验证了方差分析的结果。氮、磷、钾肥项系数均为负,说明随着肥料施用量的增加,产量反而减低,这可能是本试验设计的氮肥、磷肥、钾肥用量均已超过最适值,所以造成此种现象。回归分析的结果显示:当全生育期氮肥施用量为 289 kg·hm⁻²、磷肥施用量为 118 kg·hm⁻²、钾肥施用量为 118 kg·hm⁻²,即采用本试验设计的低氮、低磷和低钾的施肥量时,间作系统可获得较高的产量。其它各指标取得极值时的灌水施肥量如表 4 所示。

2.4 间作系统经济效益分析

从表 5 可以看出,各处理净收益与总收入存在

一定差异,其中低水低肥的处理(W₁F₁)净收益最高,达 10 470.38 元·hm⁻²,低肥处理的三个组(W₁F₁,W₂F₁,W₃F₁)及低水中肥的处理(W₁F₂)均较对照提高净收益,分别增收 12.1%、7.4%、1.1%、1.9%。其余试验组总收入虽然均高于对照处理,但是由于灌水与施肥的投入,导致净收益均低于对照处理,较对照减少 2.5%~19.2%;随着灌溉量的增加,间作系统净收益也逐渐减少。各处理的净收益随着施肥量的增加而逐渐递减,低量施肥较中量和高量施肥增收 9.4%、19.5%,低量灌水较中量和高量灌增收 4.6%、10.5%。这是由于过多的灌水和施肥增加了成本(人力+资金),且在高水高肥的处理下,产量增产效益不明显,所以导致低水低肥处理(灌水上限:50% Fc,施肥量:525 kg·hm⁻²)净收益最大。所以在该地区采用低量灌水和施肥的农业管理措施即:拔节期不施肥,抽雄期施肥 262.5 kg·hm⁻²,灌浆期施肥 262.5 kg·hm⁻²,各生育期灌水上限均设定为田间持水量的 50%,不仅可以使系统经济收益最高,同时避免了过度灌溉和施肥造成的环境污染和资源浪费,在发展可持续农业中具有积极的推广意义。

表 4 叶片生理指标与灌水施肥量多元非线性回归分析

Table 4 Regression equation of physiological index with irrigation and fertilization rate

回归方程 Regression equation	R^2	理论最大值 Maximum	灌溉/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) Optimum irrigation rate	施肥量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Optimum fertilizer rate
$\text{SPAD}_{\text{苹果}} = 48.7957 + 0.0003x_W + 0.0400x_N$	0.5451	70.6657	1300	537
$\text{SPAD}_{\text{苹果}} = 48.7314 + 0.0003x_W + 0.0989x_{P/K} - 0.0003x_{P/K}^2$	0.5447	57.27241	1300	164.8
$\text{SPAD}_{\text{玉米}} = 91.3750 - 0.0054x_W - 0.1471x_N + 0.0002x_N^2$	0.6461	68.4361	300	537
$\text{SPAD}_{\text{玉米}} = 91.5229 - 0.0055x_W - 0.3621x_{P/K} + 0.0009x_{P/K}^2$	0.6463	59.6767	300	118
$\psi_{\text{苹果}} = 2.6362 + 0.0021x_W - 0.0294x_N$	0.9782 ^{**}	-3.1304	1300	289
$\psi_{\text{苹果}} = 2.5702 + 0.0021x_W - 0.0690x_{P/K} + 0.0001x_{P/K}^2$	0.9778 ^{**}	-1.45	1300	118
$\psi_{\text{玉米}} = -4.4614 + 0.0067x_W - 0.0105x_N$	0.9026 [*]	1.2141	1300	289
$\psi_{\text{玉米}} = -4.5774 + 0.0067x_W - 0.0243x_{P/K} + 0.0001x_{P/K}^2$	0.9037 [*]	3.607	1300	219
$\text{LAI} = 2.0653 + 0.0008x_W + 0.0036x_N$	0.8808 [*]	5.0385	1300	537
$\text{LAI} = 2.0376 + 0.0008x_W - 0.0091x_{P/K}$	0.8817 [*]	2.0038	1300	118
$\text{Yeild}_{\text{玉米}} = 10278.0000 - 0.5000x_N$	0.9959 ^{**}	10133.5	—	289
$\text{Yeild}_{\text{玉米}} = 10264.0000 - 0.5000x_{P/K}$	0.9959 ^{**}	10205.90	—	118

注： x_W 、 x_N 、 x_P 、 x_K 分别代表灌水量、氮肥施用量、磷肥施用量、钾肥施用量。
Note: x_W 、 x_N 、 x_P 、 x_K means application amount of nitrogen, phosphate, potassium fertilizer respectively.

表 5 不同处理玉米生产成本和经济效益

Table 5 Cost and economic returns of maize production under different treatments

试验处理 Treatment	基础投入 /(元·hm ⁻²) (资金 + 劳动力) Basic input (Capital + labour)	施肥投入 /(元·hm ⁻²) (资金 + 劳动力) Fertilizer input (Capital + labour)	灌水投入 /(元·hm ⁻²) (资金 + 劳动力) Irrigation input (Capital + labour)	总投入 /(元·hm ⁻²) (资金 + 劳动力) Total input (Capital + labour)	总收入 /(元·hm ⁻²) Total income	净收益 /(元·hm ⁻²) Net income
W ₁ F ₁	4875.00	510.00	331.50	5716.50	16186.88	10470.38
W ₂ F ₁	4875.00	510.00	773.50	6158.50	16186.40	10027.90
W ₃ F ₁	4875.00	510.00	1436.00	6821.00	16266.88	9445.88
W ₁ F ₂	4875.00	1275.00	331.50	6481.50	16001.60	9520.10
W ₂ F ₂	4875.00	1275.00	773.50	6923.50	16025.76	9102.26
W ₃ F ₂	4875.00	1275.00	1436.00	7586.00	16089.60	8503.60
W ₁ F ₃	4875.00	2040.00	331.50	7246.50	15744.48	8497.98
W ₂ F ₃	4875.00	2040.00	773.50	7688.50	15744.64	8056.14
W ₃ F ₃	4875.00	2040.00	1436.00	8351.00	15897.12	7546.12
CK	4875.00	0.00	0.00	4875.00	14216.00	9341.00

3 结论与讨论

间作系统水肥调控对植物叶绿素含量影响较小,对叶水势影响较大;随着施肥量的增加植物叶水势、叶面积指数及产量均逐渐减小,这与胡云飞^[44]的研究结果类似,他通过对青花菜的研究发现:植物叶水势随着施肥量的增加先增大后减小,过多的施肥会降低植物叶水势。袁宇霞^[45]的研究结果显示,过多的灌水和施肥均会抑制植物叶面积、干物质量和产量的形成;施肥处理对叶片各生理参数和产量的影响程度较灌溉处理大。于亚军^[46]在查阅国内

外大量旱作农田水肥耦合研究资料的基础上,总结发现大田试验及常规对比试验的结果通常为肥料因子的增产作用大于水分因子,这与本试验的研究背景及结果一致。灌水与施肥处理可减小不同距树行距离玉米叶绿素含量之间的差异。

玉米叶绿素随着距树行距离的增加而逐渐递增;叶水势的水平分布与灌溉水平有关:50% Fc 灌溉水平下,玉米叶水势随着距树距离的增加而增加,65% Fc 灌溉水平下,玉米叶水势随着距树行距离的增加先增大后减小,85% Fc 灌溉水平下,植物叶水势分布差异较大。

本试验在未坐果的幼龄果树行间作农作物,充分利用了现有的土地资源,虽然产量仅从玉米中获得,但较闲置土地而言仍可获得额外的经济收益。许华森^[29]对晋西黄土区间作系统经济效益进行研究时发现:第 17 年苹果农作物间作系统的年经济效益均大于苹果单作系统。多元回归分析结果显示,当全生育期氮肥施用量为 $289 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥施用量为 $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥施用量为 $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,间作系统可获得较高的产量,理论最大值分别为 $10\ 133.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $10\ 205.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张发明^[47]的研究结果显示:玉米高产的最适宜的施肥量为:氮肥 $285 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥 $130 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,钾肥 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,这与本试验的研究结果十分相近。孙文涛^[32]和张玉峰^[48]的试验也得到类似的结果。在低施肥量的条件下,采用少量灌水(50%Fc)的水肥制度可使间作系统经济效益最大,净收益可达 $10\ 470.38 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。综上,采用当地施肥量 70% 的施肥制度最利于间作系统产量和经济效益的提高,张珂珂^[49]的研究在黄淮区小麦生产大量投入氮肥(纯氮 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上)的基础上,降低了 25% ~ 30% 的施氮量,结果显示减氮处理明显改善了小麦群体结构和冠层内的光分布状况,显著提高产量和氮肥利用率。这与本试验研究结果类似,说明晋西黄土区目前或许也存在过量施肥的情况。

合理的灌溉和施肥可以提高肥料利用率,避免不必要的环境污染和资源浪费,同时可以获得较高的作物产出,实现农业生产可持续化以及环境影响最小化。通过本研究可知,拔节期不施肥,抽雄期施肥 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌浆期施肥 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,灌水上限设定为田间持水量的 50% 时,可使晋西黄土区苹果//玉米间作系统净收益最大。所以在水资源短缺、土壤肥力匮乏的晋西黄土地区,采用全生育期灌水上限为田间持水量的 50%,总施肥量 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水肥管理制度,不仅可以满足提高经济收入的要求,同时对该地区环境保护也有着重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 云 雷,毕华兴,马雯静,等.晋西黄土区果农间作土壤养分空间分布[J].农业工程学报,2010,26(S1):292-299.
- [2] Miller A W, Pallardy S G. Resource competition across the crop-tree interface in maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri[J]. Agroforestry Systems, 2011,53:247-259.
- [3] Jose S, Gillespie A R, Seifert J R. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA[J]. Agroforestry Systems, 2000,48:41-59.
- [4] Casper B B, Jakson R B. Plant competition underground[J]. Annual

Review of Ecology and Systematics, 1997,28:545-570.

- [5] Bazie J H R, Bayala G, Zombre J, et al. Separating competition - related factors limiting crop performance in an agroforestry parkland system in Burkina Faso[J]. Agroforestry Systems, 2012,84:377-388.
- [6] 刘作新,郑昭佩,王 建.辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J].应用生态报,2000,11(4):540-544.
- [7] 李发永,王 龙,王兴鹏,等.适宜滴灌定额提高枣棉间作中棉花产量和土地生产效率[J].农业工程学报,2014,30(14):105-113.
- [8] 刘秀珍,张阅军,杜慧玲.水肥交互作用对间作玉米、大豆产量的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):80-82.
- [9] 张礼军,张恩和,郭琢琢,等.水肥耦合对小麦-玉米系统根系分布及吸收活力的调控[J].草业学报,2005,14(2):102-108.
- [10] 赵 英,张 斌,王明珠.农林复合系统中物种间水肥光竞争机理分析与评价[J].生态学报,2006,26(6):1792-1801.
- [11] 孟 平,张劲松.梨麦间作系统水分效应与土地利用效应的研究[J].林业科学研究,2004,17(2):167-171.
- [12] Singh R P, Ong C K, Saharan N. Above and below ground interaction in alley cropping in semi-arid India[J]. Agroforestry Systems, 1989, 9:259-274.
- [13] Odhiambo H O, Ong C K, Deans J D, et al. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semi-arid agroforestry system in Kenya[J]. Plant and Soil, 2001,235:221 - 233.
- [14] Wanvestraut R H, Jose S, Nair P K R, et al. Competition for water in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States[J]. Agroforestry Systems, 2004,60:167-179.
- [15] 肖自添,蒋卫杰,余宏军.作物水肥耦合效应研究进展[J].作物杂志,2007,(6):18-22.
- [16] 周 冉.华北地区主要作物施肥的资源环境影响评价[D].保定:河北农业大学,2012.
- [17] 邓勋飞,张后勇,何 勇,等.水稻叶水势与不同水分处理定量关系研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2005,31(5):581-586.
- [18] 杨小振,张 显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.
- [19] 王进鑫,张晓鹏,高保山.水肥耦合对矮化富士苹果幼树的促长促花作用研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(3):47-50.
- [20] 杨培林,彭 俊,钟新才.不同水分处理下防护林树种叶水势、茎水势及土水势的研究[J].新疆农业科学,2012,49(2):273-278.
- [21] 付爱红,陈亚宁,李卫红,等.干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展[J].中国沙漠,2005,25(5):744-749.
- [22] 王克鹏,张仁陟,董 博,等.长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J].生态学报,2014,34(13):3752-3761.
- [23] 向友珍,张富仓,Mohamed A Rashad,等.灌溉施肥对尼罗河三角洲玉米产量和水分利用率的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):116-126.
- [24] 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等.滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J].中国农业科学,2006,39(3):563-568.
- [25] 仲 爽,李严坤,任 安,等.不同水肥组合对玉米产量与耗水量的影响[J].东北农业大学学报,2009,40(2):44-47.

(下转第 37 页)

and yield stability in an old and a modern winter wheat cultivar[J]. *Plant Soil*, 2011,347:7-23.

[17] 张 荣,张大勇.半干旱区春小麦不同年代品种根系生长冗余的比较实验研究[J].*植物生态学报*,2000,24(3):298-303.

[18] 韩 娟,廖允成,贾志宽,等.半湿润偏旱区沟垄覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].*作物学报*,2014,40(1):101-109.

[19] 张 玉,韩清芳,成雪峰,等.关中灌区沟垄集雨种植补灌对冬小麦光合特征、产量及水分利用效率的影响[J].*应用生态学报*,2015,26(5):1382-1390.

[20] Palta J A, Chen X, Milroy S P, et al. Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environment? [J]. *Plant Biology*, 2011,38:347-354.

[21] King J, Bingham I, Gregory P, et al. Modeling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum[J]. *Annals of Botany*, 2003,91:383-390.

[22] 刘自华.冬小麦叶面积校正系数及叶面积指数的研究[J].*河北农业科学*,1996,(1):12-14.

[23] Malezieux E, Crozat C, Dupraz M, et al. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009,29:43-62.

[24] Wolfe M S. Crop strength through diversity[J]. *Nature*, 2000,406:681-682.

[25] 陈 欣,唐建军.农业系统中生物多样性利用的研究现状与未来思考[J].*中国生态农业学报*,2013,21(1):54-60.

[26] 袁 焱,刘国华,陈立云.作物混种研究进展[J].*作物研究*,2008,22(5):381-385.

[27] 刘 琳,李凤民,徐炳成,等.单播与混播对两个冬小麦品种产量和水分利用效率的影响[J].*应用生态学报*,2008,19(1):93-98.

[28] 权文利,陈志明,连利叶,等.不同株高品种混播对青海春小麦产量的影响[J].*西北农业学报*,2013,22(8):15-20.

[29] 刘克礼,翟利剑,高聚林,等.春小麦源库特性及其关系的研究(Ⅱ)——群体库源比及其与产量的关系[J].*麦类作物学报*,2003,23(4):63-65.

[30] 郭文善,封超年,严六零,等.小麦开花后源库关系分析[J].*作物学报*,1995,21(3):334-340.

[31] Kiaer L P, Skovgaard I M, Ostergard H. Effects of inter-varietal diversity, biotic stresses and environmental productivity on grain yield of spring barley variety mixtures[J]. *Euphytica*, 2012,185:123-138.

[32] Gallandt E R, Dofing S M, Reisenauer P E, et al. Diallel analysis of cultivar mixtures in winter wheat[J]. *Crop Science*, 2001,41:792-796.

[33] Wall G, Kanemasu E. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. Part I. Influence of canopy geometry on trends in leaf area index, light interception and instantaneous exchange rates[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990,49:81-102.

(上接第 28 页)

[26] 周振民.黄土高原丘陵沟壑区苹果园水肥耦合试验研究[J].*灌溉排水学报*,2009,28(2):109-111.

[27] 朱德兰,王文娥,楚 杰.黄土高原丘陵红富士苹果水肥耦合效应研究[J].*干旱地区农业研究*,2004,22(1):152-155.

[28] 赵可夫.玉米抽雄后不同叶位叶对子粒产量的影响及其光合性能[J].*作物学报*,1981,7(4):259-266.

[29] 许华森,毕华兴,王若水,等.晋西黄土区苹果农作物间作系统经济效益[J].*中国水土保持科学*,2014,12(4):81-85.

[30] 王 平,周道玮,张宝田.禾-豆混播草地种间竞争与共存[J].*生态学报*,2009,29(5):2560-2567.

[31] 薛 亮,周春菊,雷杨莉,等.夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J].*农业工程学报*,2008,24(3):91-94.

[32] 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等.滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J].*中国农业科学*,2006,39(3):563-568.

[33] 徐泰森,孙 扬,刘彦萱,等.膜下滴灌水肥耦合对半干旱区玉米生长发育及产量的影响[J].*玉米科学*,2016,(5):118-122.

[35] 周罕觅,张富仓, Roger Kjelgren, 等.苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J].*农业机械学报*,2015,46(4):77-87.

[36] 王翠玲.水肥耦合对草莓生长、产量品质及水肥利用效率的影响[D].泰安:山东农业大学,2010.

[37] 刘 闯.巨桉林+草间作模式中牧草产量效应及其生理生态学特征研究[D].雅安:四川农业大学,2008.

[38] 张继澍.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006:112.

[39] 陆文娟,李伏生,农梦玲.不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响[J].*生态学报*,2014,34(18):5257-5265.

[40] 陈修斌,李翊华,许耀照.温室番茄对水肥耦合的光合特性及叶绿素荧光参数响应[J].*土壤通报*,2015,46(3):687-693.

[41] 石多琴,柴 强,于爱忠.水氮互作全膜覆盖玉米光合特性和叶水势的日变化[J].*甘肃农业大学学报*,2014,49(1):54-59 + 64.

[42] 李文惠,尹光华,谷 健,等.膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J].*生态学杂志*,2015,34(12):3397-3401.

[43] 尹光华,刘作新,李桂芳,等.辽西半干旱区春小麦磷水耦合产量效应研究[J].*农业工程学报*,2005,21(1):41-45.

[44] 胡云飞,郁继华,肖雪梅,等.滴灌条件下水肥耦合对青花菜生理特性及产量和品质的影响[J].*灌溉排水学报*,2016,35(2):72-76

[45] 袁宇霞,张富仓,张 燕,等.滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(1):76-83.

[46] 于亚军,李 军,贾志宽,等.旱作农田水肥耦合研究进展[J].*干旱地区农业研究*,2005,23(3):220-224.

[47] 张发明,杨克军,李佐同,等.肥密组合对寒地半干旱区膜下滴灌玉米产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2016,34(2):32-37.

[48] 张玉峰,杨武德,白晶晶,等.冬小麦产量与子粒蛋白质含量协同变化特点及水肥调控[J].*中国农业科学*,2006,39(12):2449-2458.

[49] 张珂珂,周苏玫,张 嫚,等.减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J].*应用生态学报*,2016,27(3):863-872.