

半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究

邢维芹^{1,2}, 王林权², 骆永明¹, 李立平¹, 李生秀²

(1. 中国科学院南京土壤研究所; 2 西北农林科技大学)

摘要: 在半干旱地区的杨凌, 通过对大田夏玉米在拔节期和抽雄期进行灌溉水和氮肥的不同数量和空间耦合处理, 研究了不同耦合方式对玉米生理特性和产量的影响及其节水效果, 结果表明: 在全生育期灌水量为 $1\ 125\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 的水平下, 均匀施肥交替灌水、水肥同区交替灌水、水肥异区交替灌水 3 种水肥空间耦合方式的产量之间不存在显著差异 ($P < 0.05$); 玉米全生育期灌水量从 $2\ 250\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 下降到 $600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 玉米产量下降幅度小于 15.26%; 在相同灌水量下, 水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水的根系活力、光合速率、产量和灌溉水利用效率较高; 在试验范围内, 灌水量越高, 水分利用效率越低。以上结果表明, 在杨凌地区夏玉米生产中仍有较大的节水潜力; 在试验条件下, 每次灌水 $562.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水处理是较好的水肥空间耦合方式。

关键词: 半干旱地区; 夏玉米; 水肥空间耦合; 产量; 生理指标; 效应

中图分类号: S147.265

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2002)06-0046-04

北方旱农地区是我国农业用水的严重亏缺区, 水分不足是该地区农业发展的主要限制因素。同时实践证明, 旱作农业中, 肥料的增产作用不仅在于肥料本身, 更重要的还在于与土壤水分的互作^[1]。因此, 对有限的灌溉水和肥料进行耦合是干旱半干旱地区节约用水, 提高水分利用率, 争取作物高产的重要途径。

国内外已有文献报道了水肥空间耦合对作物的影响。不同部位施磷和不同部位供水能明显改善冬小麦的根系分布^[2,3]。同时研究也表明施磷部位对光合作用有较明显的作用^[4]。以上研究的是土壤纵向剖面的水肥空间耦合, 生产上实施需要一定的工程技术。Benjamin 等研究了隔沟灌溉带状施肥对玉米生长和氮肥吸收的影响, 认为在干旱年份, 氮肥施在不灌水沟, 氮肥吸收降低 50%, 在相对湿润年份, 灌水沟和不灌水沟之间肥料吸收无差异^[5]。Skinner 等报道了隔沟灌溉施肥对玉米根系分布的影响: 不灌水沟与灌水沟相比, 根生物量增加了 26%, 若生长季早期湿度合适, 灌水沟和不灌水沟上下根层根量都增加, 氮的吸收也因此而增加^[6]。但该研究对相应处理的产量效应及生理机制等方面略显不足。

邢维芹等对杨凌地区玉米水肥空间耦合的研究表明, 在亏缺灌溉条件下, 水肥异区交替灌溉可节水一半, 而产量下降幅度较小, 相关的生理指标也表现较好^[7]。对于不同灌水量下玉米水肥空间耦合及其机理, 还需进一步深入地研究。

本研究针对陕西关中地区的农业水资源现状及现有灌水数量及方式, 通过大田试验, 对夏玉米在不同灌水量的水肥空间耦合下的根系活力、光合速率、产量及灌溉水利用效率进行了研究, 以探索干旱半干旱地区非

充分灌溉条件下玉米水肥空间耦合的较好方式, 并对不同耦合方式下作物的生理指标的反应进行测定, 从而探索半干旱地区肥料和灌溉水的更有效的利用途径, 为旱地水肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

试验于 2000 年在西北农林科技大学西农校区农作一站裸地进行, 无防雨措施, 供试土壤为红油土, 其基本性状为: 有机质 $11.19\ \text{g}/\text{kg}$, 全氮 $0.72\ \text{g}/\text{kg}$, 碱解氮 $56.24\ \text{mg}/\text{kg}$, 速效磷 $23.93\ \text{mg}/\text{kg}$, 速效钾 $100.27\ \text{mg}/\text{kg}$, pH (H₂O) 7.78。所用氮肥为尿素, 含氮量为 46%。供试作物为陕单 9 号玉米, 共设 10 个处理 (见表 1), 重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积 $18.0\ \text{m}^2$ ($4.0\ \text{m} \times 4.5\ \text{m}$), 种植密度为 $0.6 \times 0.3\ \text{m}^2$, 保护行宽 $1.0\ \text{m}$ 。6 月 11 日播种, 7 月 4 日定苗, 10 月 4 日收获。玉米全生育期共施纯 N $248.1\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 分 3 次平均施入: 播种期、拔节期、抽雄期各 $1/3$ 。分别于 7 月 21 日 (拔节期) 和 8 月 12 日 (抽雄期) 进行施肥灌水处理: 开沟施肥, 沟深 $15\ \text{cm}$ 左右, 施入肥料后覆土。

表 1 试验处理

Table 1 Treatments of the experiment

处理号	灌水方式	每次灌水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$
1	自然肥力自然降水(CK)	0
2	均匀施肥均匀灌水	600
3	均匀施肥均匀灌水	1 125
4	均匀施肥交替灌水	600
5	均匀施肥交替灌水	300
6	均匀施肥交替灌水	562.5
7	水肥同区交替灌水	300
8	水肥同区交替灌水	562.5
9	水肥异区交替灌水	300
10	水肥异区交替灌水	562.5

各处理的具体实施方法为: 均匀施肥均匀灌水: 每一沟都施肥灌水; 均匀施肥交替灌水: 每一沟都施肥, 拔节期相邻两沟一沟灌水, 另一沟不灌水, 抽雄期交换灌

收稿日期: 2002-05-09 修订日期: 2002-10-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“水分养分优化耦合对提高产量的效应”(编号 49890330)的部分内容

作者简介: 邢维芹 (1972-), 女, 河南安阳人, 博士生, 主要从事植物营养调控和环境污染修复方面的研究。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008

水位置; 水肥同区交替灌水: 每次都在施肥沟灌水, 隔沟灌水, 抽雄期交换灌水位置; 水肥异区交替灌水: 每次都在不施肥沟灌水, 隔沟灌水, 抽雄期交换施肥灌水位置。

在试验所处的杨凌地区, 玉米生长期一般灌水两次(拔节期和抽雄期), 普通灌水量为每次约 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 部分经济条件较好的农户或水资源较充裕的地区, 每次灌水可达 $1\ 125 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

1.2 测定项目及方法

每次处理一周后采样, 用于各项目分析。具体的采样及测定方法为:

光合速率: 每小区随机测五株玉米的倒三叶, 用 Li-6200 型光合测定仪(美国产) 不离体于晴天上午 10 点测定, 用 3 个测定值的平均值表示该小区的光合速率。

根系活力: 上午 8 点于每小区随机采 3 株玉米根系作为混合样, TTC(氯化苯基四氮唑) 还原法测定, 测定值作为该小区的根系活力, 测定步骤见参考文献[8]。

产量: 玉米收获时, 每小区随机采样 10 株, 连根挖起, 玉米穗单独采下, 籽粒剥下晒干称重, 并计算含水率, 用于小区产量的计算。其余部分烘干后称重, 以此估算全小区总干物质量。每小区新鲜玉米穗全部采下后称重, 换算为干质量。

灌溉水利用效率 = (处理产量 - 对照产量) / 该处理两次灌水量之和。

1.3 数据处理

对测定结果用 PLSD 法进行方差分析, 相同字母者表示在 0.05 水平上差异不显著。

2 结果与分析

2.1 不同耦合方式对玉米根系活力的影响

TTC 法测定植物根系活力是基于无色的 TTC 能被根系还原为红色的物质, 产物的多少与根系的琥珀酸脱氢酶活性成正比, 而琥珀酸脱氢酶是根系内的重要酶之一, 因此可用单位时间内单位质量的根系还原的 TTC 的量(单位为 $\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$) 来表示根系活力的强弱^[8]。

受不同水肥空间耦合方式处理影响最直接的是玉米植株的根系, 土壤水分、养分状况不同, 势必影响植株根系活力、根系吸收作用的发挥。如图 1 所示, 不同水肥耦合方式对作物根系活力产生了明显的影响, 但同一处理的根系活力在两次测定间差异较小。拔节期处理后, 水肥异区交替灌水在每次 300 和 $562.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水量下根系活力分别高于相同灌水量下的水肥同区交替灌水处理, 而后者又分别高于相同灌水量下的均匀施肥交替灌水(处理 10 > 处理 8 > 处理 6, 处理 9 > 处理 7 > 处理 5); 均匀施肥均匀灌水在每次 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 灌水量下根系活力高于均匀施肥交替灌水(处理 2 > 处理 4), 而在每次 $1\ 125 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的灌水量下, 其根系活力并非最高, 表明土壤含水率过高不利于根系生长和代谢。

抽雄期处理后, 各处理根系活力的的大小顺序与拔

节期基本相同。其中, 均匀施肥均匀灌水(处理 2 和处理 3) 下降幅度最大。水肥同区交替灌水和水肥异区交替灌水(处理 7、8、9、10) 下降幅度较小, 表明这两种处理方式有利于玉米根系保持较高的活力, 在后期不早衰。

对照处理的根系活力在两个时期都最低, 表现出水肥严重亏缺条件下不利于根系的生长发育。处理 4、5、6 虽然抽雄期比拔节期略有上升, 但与其它处理相比, 根系活力仍较低。

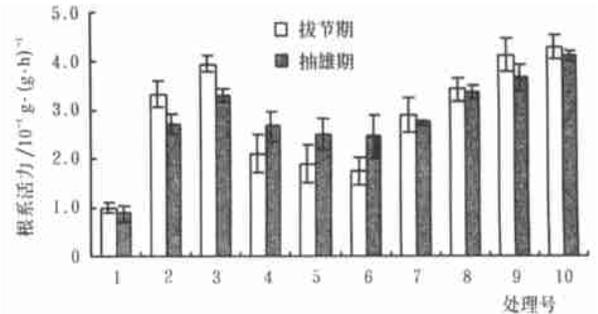


图 1 不同处理的根系活力

Fig 1 Root activity of different treatments

2.2 不同耦合方式对玉米叶片光合速率的影响

图 2 显示了不同处理方式下玉米叶片光合速率的两次测定结果。不同处理的光合速率的差异小于根系活力的差异, 这进一步证实了不同土壤水肥条件对根系的影响最大的判断。对照处理在两个时期的光合速率都最低, 表现了低水低肥对玉米光合作用的抑制。但抽雄期与拔节期相比, 各处理光合速率均有不同程度上升。

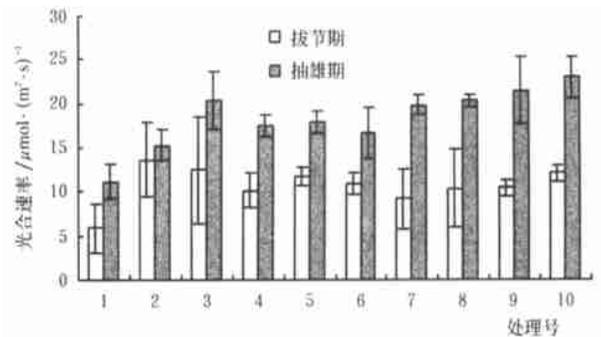


图 2 不同处理玉米叶片光合速率

Fig 2 Photosynthesis rate of corn leaves of different treatments

拔节期处理后, 处理 2、3 光合速率最高, 其余处理均较低且相互间差异较小。7 到 10 各处理表现出水肥耦合方式相同, 光合速率随灌水量增加而增加的趋势。这种趋势与根系活力的变化相同, 表明光合速率的变化与根系活力有一定关系。因为植物根系活力不同, 为光合作用供应的水分和养分的多少不同, 而且在不同的灌水量下, 根系吸收的水分不同, 叶片的气孔导度有所差异, 影响吸收 CO_2 的多少, 从而会影响植株的光合速率。该时期叶片光合速率(因变量)与根系活力(自变量)的线性相关系数达到 0.05 的差异显著水平。

抽雄期处理后, 处理 3 和水肥同区交替灌水、水肥异区交替灌水的各处理(处理 7、8、9、10) 光合速率较高, 而其余处理较低。原因可能是其根系在抽雄期有较高的吸收性能, 向叶片供应了较多的光合作用所需的物

质。这一时期光合速率(自变量)与根系活力(因变量)的线性相关达到 0.01 的显著水平。与拔节期相比,水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水处理的光合速率上升幅度较大。

2.3 不同耦合方式对玉米产量和总干物质质量的影响

2.3.1 产量

表 2 显示了不同处理玉米的产量。

表 2 不同水肥空间耦合方式玉米产量和总干物质质量

Table 2 Yield and total dry biomass of the corn with different treatments

处理	产量 /kg·hm ⁻²	产量下降 幅度/%	总干物质质量 /kg·hm ⁻²	总干物质质量 下降幅度/%
1	3 812.51 c	39.13	6 835.97 d	35.29
2	5 620.00 ab	10.27	10 399.88 ab	1.55
3	6 263.43 a	—	10 564.26 a	—
4	5 446.27 b	13.05	9 823.24 abc	7.01
5	5 307.79 b	15.26	9 549.50 abc	9.60
6	5 392.72 b	13.90	9 334.07 bc	11.64
7	5 446.24 b	13.05	9 169.57 c	13.20
8	5 596.71 ab	10.64	9 731.97 abc	7.88
9	5 451.49 b	12.96	9 478.82 abc	10.27
10	5 621.58 ab	10.25	9 522.03 abc	9.86

注:某处理产量下降幅度(%)=(处理 3 产量-该处理产量)/处理 3 产量。

对照处理由于受到水、肥不足的限制,产量显著低于其它处理(表 2)。其余各处理中,以处理 3 产量为最高,其余处理与之相比,产量均有不同程度的下降,下降幅度在 10.25%~15.26% 之间。但 2、3、8、10 四个处理间产量无显著差异($P < 0.05$)。从根系活力和光合速率的测定结果看,2、3、8、10 四个处理均相对较高,这可能是其产量较高的物质基础。处理 3 虽然比 2、8、10 三个处理灌水量增加了将近 1 倍,但产量却没有显著增加,表明玉米生育期灌水量增加到 2 250 m³/hm² 已无必要。水分是影响半干旱地区玉米产量的重要因素,在本试验灌水量设计中,每次 562.5~600 m³/hm² 的灌水量是试验所处地区的常用灌水量,也是比较适宜的灌水量,这一点已被试验的产量结果所证实。处理 4、6 与处理 2、8、10 灌水量相近,但其产量与处理 3 相比有显著差异($P < 0.05$),表明不同水肥耦合方式已对玉米产量产生了影响。

均匀施肥交替灌水的处理(处理 4、5、6)及每次灌水量为 300 m³/hm² 的处理(处理 7、9)的产量与处理 3 有显著差异($P < 0.05$),表明均匀施肥交替灌水处理和灌水量过低(300 m³/hm²)均不利于玉米产量的形成。这几个处理的根系活力和叶片光合速率也较低,不利于玉米形成较强的吸收能力,从而导致叶片光合作用下降,形成的光合产物较少。

以不同处理的产量作因变量,分别将根系活力和光合速率作自变量,进行线性相关,结果表明玉米的产量与拔节期光合速率和抽雄期根系活力存在极显著正相关($P < 0.01$),与拔节期根系活力间存在显著正相关

($P < 0.05$)。但并未出现所预期的产量与抽雄期光合速率呈现正相关的结果。在每次 562.5 和 300 m³/hm² 的灌水量下,不同水肥耦合方式玉米产量的大小表现出相同的规律:水肥异区交替灌水>水肥同区交替灌水>均匀施肥交替灌水。

2.3.2 总干物质质量

各处理总干物质质量测定结果(表 2)表明,不同处理对玉米总干物质质量产生的影响与对产量的影响有所不同,绝大部分处理的总干物质质量的下降幅度小于产量的下降幅度。各处理的产量平均下降幅度达 13.85%,而总干物质质量平均下降幅度只有 10.63%。处理 3 总干物质质量虽为最高,但其与处理 2、4、5、8、9、10 间的差异并未达到 0.05 的显著水平。6、7、8、9、10 五个处理都表现出灌水量降低总干物质质量也降低的趋势。但处理 5 却表现出不同的规律,虽然灌水量较少,产量下降幅度较大,但总干物质质量下降幅度却较小。关于不同水肥耦合方式对各处理的产量和总干物质质量产生的影响不同的原因还有待进一步探讨。

2.4 不同耦合方式对玉米灌溉水利用效率的影响

由图 3 可以看出,不同处理的灌溉水利用效率差异很大。在试验范围内,灌水量越大,水分利用效率越低;灌水量越少,水分利用效率越高。

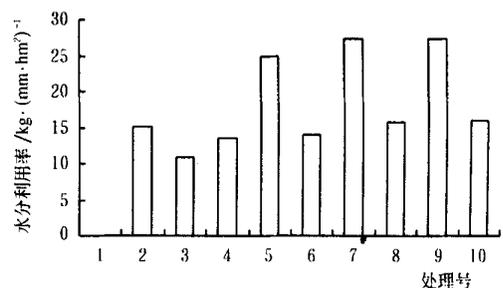


图 3 不同处理的灌溉水利用效率

Fig. 3 Irrigation water use efficiency of different treatments

灌水量最小(每次 300 m³/hm²)的三个处理(处理 5、7、9)水分利用效率最高,而灌水量最大(每次 1 125 m³/hm²)的处理 3 水分利用效率最低,其余处理的水分利用效率处于中等水平。每次灌水量从 1 125 m³/hm² 降低到 300 m³/hm²,水分减少 70% 以上,产量只降低了 15.26%,而水分利用效率却提高了一倍。在相同灌水量下,水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水的灌溉水利用效率较高,而均匀施肥交替灌水则较低。

结果也表明,虽然充分灌水的处理产量最高,但其灌溉水利用不经济。即加大灌水量可提高玉米产量,但灌溉水的利用效率低下。非充分灌溉条件下,玉米产量有不同程度的降低,但灌溉水利用效率却大幅度上升。

3 讨论与结论

从本研究结果来看,在关中杨凌地区种植夏玉米,全生育期灌水量从 2 250 m³/hm² 下降到 600 m³/hm²,玉米产量只下降了 15.26% 以下,这一结果表明在杨凌地区的夏玉米生产中,节约灌溉水用量还有很大潜力。

与杨凌地区部分农户采用的 2 250 m³/hm² 的高灌

水量相比, 灌水量减少一半, 水肥同区交替灌水和水肥异区交替灌水两种水肥耦合方式引起玉米产量的降低幅度较小, 并且后两者相互之间差异不显著; 与全生育期灌水量 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 相比, 灌水量减少一半, 均匀施肥均匀灌水、水肥同区交替灌水和水肥异区交替灌水三种水肥空间耦合方式也均未引起玉米产量的显著降低, 三者之间对产量的影响差异也不显著。由此说明, 在节水灌溉条件下, 进行水肥空间耦合对当季作物的产量影响较小。但结合玉米收获后 $1\ \text{m}$ 范围土壤氮素的残留(另文发表)来看, 水肥异区交替灌水处理的氮素在 $60\ \text{cm}$ 以上土壤层残留比均匀施肥交替灌水和水肥同区交替灌水处理高出 $1\ \text{mg}/\text{kg}$ 以上, 对土壤肥力和后作的产量必将产生一定影响。

水肥异区交替灌水、均匀施肥交替灌水与水肥同区交替灌水相比, 并未对玉米产量产生显著影响, 原因可能是这两种处理方式在整个生育期并未显著影响玉米植株吸收养分的总量, 收获后测定各处理植株吸收氮总量的结果表明, 除处理 1 和 3 外, 其余处理差异较小(另文发表)。这表明不同水肥耦合方式虽对当季玉米作物产生了一定影响, 但影响较小。因此, 在半干旱地区实行水肥空间耦合的主要意义除了节约用水、提高水分利用率外, 对于减小氮素在土壤中的残留, 从而对后作及环境产生不同影响也有一定作用。从这种意义上来说, 水肥异区交替灌溉比其它的耦合方式效果更好。

对于本文测定结果中出现的某些指标大小的分布规律, 水肥异区交替灌水 > 水肥同区交替灌水 > 均匀施肥交替灌水, 有必要进一步研究。

由以上分析可以得出如下结论:

1) 在杨凌地区目前的夏玉米生产和管理条件下, 较大幅度降低灌水量, 作物产量下降幅度较小, 因此节水仍有较大的潜力。

2) 在不同灌水量和水肥空间耦合方式中, 以每次灌水 $562.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 水肥同区交替灌水及水肥异区交替灌水为较好的灌溉水和氮肥的耦合方式。

3) 不同耦合方式对玉米的根系活力和光合速率有不同影响, 以水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水的根系活力、光合速率较高。不同水肥耦合方式对作物根系活力的影响大于对光合速率的影响。

4) 试验条件下, 灌水量越高水分利用效率越低。

[参 考 文 献]

- [1] 汪德水, 程宪国, 张美荣等. 旱地土壤中的肥水激励机制 [A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术 [C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995, 195~ 203
- [2] 苏德纯, 任春玲, 王兴仁. 不同水分条件下施磷位置对冬小麦生长及磷营养的影响 [J]. 中国农业大学学报, 1998, 3 (5): 55~ 60
- [3] 马瑞昆, 辜家利, 贾秀领等. 供水深度与冬小麦根系发育的关系 [J]. 干旱地区农业研究, 1991, 3: 1~ 9
- [4] 王同朝, 李凤民, 王 俊等. 分层供水施磷对春小麦光合性能、同化产物流向和水分利用效率的影响 [J]. 植物生态学报, 1999, 23(2): 177~ 185
- [5] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands [J]. Agron J, 1997, 89: 609~ 612
- [6] Skinner R H, Jon D. Hanson and Joseph G. Benjamin. Root distribution following spatial separation of supply in furrow irrigated corn [J]. Plant and Soil, 1998, 199: 187~ 194
- [7] 邢维芹, 王林权, 李生秀. 半干旱区夏玉米的水肥空间耦合效应 [J]. 农业现代化研究, 2001, 22(3): 150~ 153
- [8] 高俊凤. 植物生理学试验技术 [M]. 西安: 世界图书出版西安公司, 2000, 92~ 93

Effect of Spacial Coupling Between Irrigation Water and Fertilizer on Corn in Semiarid Area

Xing Weiqin^{1,2}, Wang Linqun², Luo Yongming¹, Li Liping¹, Li Shengxiu²

(1. Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract Field experimentation of different spacial couplings of different amounts of irrigation water and nitrogen fertilizer on corn (*Zea mays* L.) at the stages of earing and jointing was carried out in Yangling located in a semiarid area. The results indicated that (1) there was little difference between the treatments of alternate irrigation with even fertilizing, alternate irrigation with fertilizing in the irrigated furrow and alternate irrigation with fertilizing in the unirrigated furrow under two amounts of irrigation water, $1\ 250\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ and $600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$; (2) the yield decreased less than 15.26% as the amount of irrigation water of the whole growth season decreased from $2\ 250\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ to $600\ \text{m}^3/\text{hm}^2$; (3) the physiological indexes, yield and water use efficiency of the treatment of alternate irrigation with fertilizing in the irrigated furrow and alternate irrigation with fertilizing in the unirrigated furrow, were higher than other treatments; (4) more irrigation water resulted in lower water use efficiency. Results of this research suggest that there is great potential to save irrigation water in corn production in Yangling. It was shown that alternate irrigation with fertilizing in the irrigated furrow and alternate irrigation with fertilizing in the unirrigated furrow with an irrigation level of $562.5\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ is more effective than other methods of coupling.

Key words: semiarid area; summer corn; spatial coupling of irrigation water and fertilizer; yield; physiological indexes; effect