

浅埋滴灌水氮钾互作对春玉米水分利用效率的影响

王子豪^{1,2}, 尹光华¹, 谷健¹, 王士杰³, 马宁宁¹, 周旭^{1,2}, 刘泳圻⁴, 赵旺⁴

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049;

3.江苏省徐州工程勘察院股份有限公司, 江苏 徐州 221000; 4.沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要:为揭示浅埋滴灌水肥互作对春玉米水分利用效率(water use efficiency, WUE)的影响, 采用二次回归正交设计, 以灌水量(W)、施氮量(N)、施钾量(K)为自变量, WUE为因变量, 于2017—2020年开展了不同水肥用量组合对浅埋滴灌春玉米WUE影响的田间试验。结果表明: 单因子作用下, WUE随水肥用量的提高均呈先升高后降低的变化趋势, 影响大小为 $W>N>K$; 2个因子互作时, WN、WK、NK对WUE的影响均呈1个凸面趋势变化, 且存在最大值, 影响大小为 $WN>NK>WK$; W、N、K 3个因子共同作用时, WUE随W、N、K 3个因子编码水平的共同提高呈先升高后降低的趋势变化, 中水中肥较低水低肥和高水高肥用量组合可获得较高WUE。通过模型寻优, 得出在灌溉量为43.25~58.87 mm、施氮量为229.93~382.97 kg/hm²、施钾量为104.94~148.49 kg/hm²条件下, 可获得较高WUE(≥ 25.00 kg/(hm²·mm))。研究结果可为试验区春玉米浅埋滴灌水肥优化管理、水分高效利用提供科学依据。

关键词: 浅埋滴灌; 春玉米; 水肥互作; 水分利用效率

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0316-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.039

Effects of Water, Nitrogen and Potassium Interaction on Water Use Efficiency of Spring Maize Under Shallow-buried Drip Irrigation

WANG Zihao^{1,2}, YIN Guanghua¹, GU Jian¹, WANG Shijie³,

MA Ningning², ZHOU Xu^{1,2}, LIU Yongqi⁴, ZHAO Wang⁴

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Jiangsu Xuzhou Engineering Investigation Institute Co.,

Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000; 4. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to reveal the impact of water and fertilizer interactions of shallow-buried drip irrigation on the water use efficiency (WUE) of spring maize, a field experiment on the effects of different water and fertilizers combinations on WUE of spring maize under shallow-buried drip irrigation was carried out in 2017—2020 by using quadratic regression orthogonal test design, with irrigation amount (W), nitrogen application rate (N) and potassium application rate (K) as independent variables and WUE as dependent variables. The results showed that under the action of single factor, WUE increased first and then decreased with increasing of water and fertilizer consumption, and the degree of influence followed the order of $W>N>K$. When the two factors interact, the influence of WN, WK and NK on WUE showed a convex trend, and there was a maximum value, and the degree of influence was $WN>NK>WK$. When the three factors of W, N and K interacted together, WUE increased first and then decreased with the increasing of the coding level of W, N and K. The treatments of middle-water-fertilizer could get higher WUE compared with the treatments of low-water-fertilizer and high-water-fertilizer. By the model optimization, it was concluded that higher WUE (≥ 25.00 kg/(hm²·mm)) could be obtained under the conditions of irrigation rate of 43.25 to 58.87 mm, nitrogen application rate of 229.93 to 382.97 kg/hm² and potassium application rate of 104.94 to 148.49 kg/hm². This study provided a scientific basis for optimizing the management of water and fertilizer under shallow-buried drip irrigation and obtaining high-efficiency use of water for spring maize in the experimental area.

收稿日期: 2021-12-17

资助项目: 中国科学院黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090200, XDA28120100); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC1907106); 中国博士后基金项目(2018M641708)

第一作者: 王子豪(1997—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事农业生态学研究。E-mail: 804592739@qq.com

通信作者: 尹光华(1972—), 男, 甘肃天水人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事节水农业研究。E-mail: ygh006@163.com

Keywords: shallow-buried drip irrigation; spring maize; water and fertilizer interaction; water use efficiency

辽西地区是辽宁省重要的玉米生产区,在保障辽宁粮食安全和区域生态安全方面具有重要作用^[1]。然而,该地区属于典型的半干旱类型区,农业生产中灌溉施肥问题较多:一是用水管理松散、技术相对落后,造成水资源浪费巨大,水分利用效率低^[2];二是土壤肥力偏低^[3],主要表现在土壤结构性差,耕层逐年变薄,犁底层加厚,严重影响作物的产量和经济效益^[4]。水、肥高效利用一直被视为我国旱地农业生产的核心^[5],也是影响辽西地区粮食安全的重要因素。先进的滴灌节水技术是提高该区水分养分高效利用的有效措施。目前,膜下滴灌节水增产效果和机理的研究较多^[6-8],技术也比较成熟。但应用膜下滴灌不仅增加地膜投入成本,而且因难以回收干净的残膜,导致严重污染土壤环境,降低土壤质量,已引起众多学者的关注^[9-11]。

浅埋滴灌是近年来开始研究应用的一项先进节水灌溉施肥技术^[12],已在辽西地区得到深入研究。该技术能够将水肥更好地传输到作物根系,为作物生长提供更适宜的肥水环境。浅埋滴灌技术能显著降低无效蒸发,提高氮肥利用效率和作物产量^[13-14],也避免残膜污染问题的发生。有研究^[15-16]发现,滴灌水肥耦合有利于提高水分利用效率和作物产量;刘泳圻等^[17]研究发现,浅埋滴灌施氮磷钾肥可显著增产并提高水肥利用效率。但目前的文献将研究重点放在浅埋滴灌肥水互作对作物产量和叶片光合作用的影响上,且多以旱棚控制试验或短期试验为主,而对水分利用效率的研究较少且不深入,并缺少连续多年的田间定位试验研究。因此,本研究在自然降雨条件下,选取辽西半干旱区的阜新蒙古族自治县开展连续多年的浅埋滴灌定位试验,研究水氮钾交互作用对春玉米水分利用效率的影响,寻找水肥优化组合模式,为试验区浅埋滴灌玉米水分高效利用生产提供理论依据和技术支撑。

1 试验区概况

试验在辽宁省西部的阜新蒙古族自治县(41°44′—42°34′N,121°01′—122°26′E)进行。该地区平均海拔 235 m,年平均气温 7.10~7.60 ℃,降水量 493.10 mm,干燥度 3.70。试验年(2017—2020 年)降水量见图 1,其中 2017 年和 2018 年为欠水年,2019 年为丰水年,2020 年为平水年,4 年平均为平水年。作物生育期平均气温 20.20 ℃,≥10.00 ℃积温日数 169 天,有效积温 3 298.30 ℃,无霜期 144 天,生理辐射量 284.30 kJ/cm²(占年总 49%),生育期日照时间 1 295.80 h(占年总日照时间 45.20%)。试验区土壤类型为褐土,耕作层容重 1.42 g/cm³,田间持

水量为 23.00%。土壤 pH 6.15,全氮含量 0.76 g/kg,碱解氮含量 119.50 mg/kg,速效磷含量 8.12 mg/kg,全钾含量 17.73 g/kg,速效钾含量 104.66 mg/kg,有机质含量 15.67 g/kg。

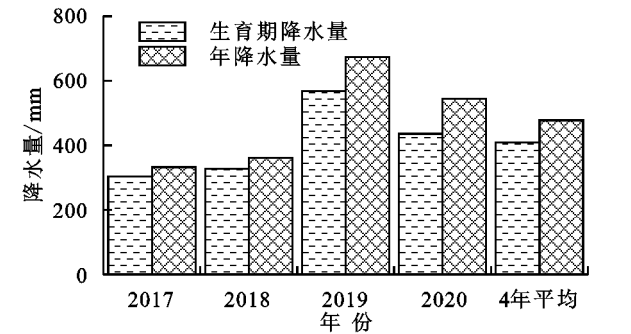


图 1 试验区降水量

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验采用二次回归正交设计方法。设水、氮、钾 3 个因子,5 个水平,共 17 个处理,重复 3 次,随机区组排列,小区面积 10 m×6 m。编码水平为 0 的灌溉量采用试验区玉米滴灌补灌量 45 mm,施氮、钾量均采用试验区常规施纯氮、钾量。各因子水平值见表 1。其中根据该地区多年月平均降水量及春玉米月平均耗水量,灌水量按播种后滴灌 10 mm,其余水量于拔节期、吐丝期、灌浆期 3 次等量滴灌;根据春玉米的需肥量并结合当地的经验施肥量,氮钾肥均采用随滴灌水施入土壤的方式,在播种期施全量的 40.00%,剩余 60.00%按拔节期 1/2、吐丝期 1/4、灌浆期 1/4 追施。氮肥选用尿素(含 N 46.00%),钾肥选用硫酸钾(K₂O ≥50.00%)。

表 1 试验因子水平值

因子	变量设计水平				
	-1.353	-1	0	+1	+1.353
滴灌量/mm	24.7	30	45	60	65.3
N/(kg·hm ⁻²)	0	61.5	235.5	409.5	471
K/(kg·hm ⁻²)	0	31.5	121.5	211.5	243

2.2 试验材料

试验于 2017—2020 年的 5—10 月开展。玉米品种为“裕丰 303”和“郑单 958”,年际间交替使用,宽窄行种植,宽行 60 cm,窄行 40 cm,密度为 60 000 株/hm²,浅埋滴灌带专用铺设一体机进行播种。灌溉方式采用浅埋滴灌,滴灌带选用内镶式滴灌带(新疆天业公司生产),铺设在窄行中间距离地表 3~5 cm 处。恒压水泵供水,流量 6 m³/h。

2.3 观测指标与方法

2.3.1 土壤含水量 采用烘干法测定土壤含水量。分别在播种期、苗期、拔节期、灌浆期及收获期在行向

2 株玉米之间位置土钻取土,深度为 140 cm,每 20 cm 为 1 层,共取 7 层,用烘箱 105 ℃ 烘干至恒重,计算出质量含水率为土壤含水量。

2.3.2 作物耗水量 玉米生育期耗水量采用水量平衡方程计算^[18]:

$$ET_a = P_r + C_r + I_r - R_f - D_w - \Delta S \tag{1}$$

式中: ET_a 为作物耗水量(mm); P_r 为降雨量(mm); C_r 为地下水毛管上升水量(mm); I_r 为地表径流量(mm); D_w 为深层渗漏量(mm); ΔS 为取土时间段内土壤水分的变化量(mm)。因试验地块平整、土层深厚,灌水方式为滴灌,所以公式中 R_f 、 D_w 可忽略不计。试验地地下水埋深>8 m,所以 C_r 也可以忽略不计。

2.3.3 水分利用效率 水分利用效率(WUE)由籽粒产量和耗水量算得,计算公式^[18]为:

$$WUE = Y / ET_a \tag{2}$$

式中:WUE 为水分利用率(kg/(hm²·mm)),即作物消

耗单位面积水量所形成的籽粒产量(kg/hm²); ET_a 为作物生育期耗水量(mm); Y 为籽粒产量(kg/hm²)。

2.3.4 籽粒产量 成熟期测产,用谷物水分测定仪(PM8188)测定籽粒含水量,折算为含水率 14%的公顷籽粒产量(kg/hm²)。

2.4 数据处理

采用 Excel 2019 数据整理和计算,SPSS 19.0 软件进行多元回归和方差分析,Matlab 2019 软件作图。

3 结果与分析

3.1 处理间 WUE 差异

表 2 为试验具体设计下各处理的 WUE 及产量值。分析可知,当 W 因子编码值一定时,WUE 均差异显著;当固定 N、K 因子编码水平时,WUE 间同样存在明显差异。说明因子互作对 WUE 有显著影响,灌水或施肥量的变化均可导致 WUE 发生变化。各处理产量分析可得相同结论,表明各试验处理所得 WUE 和产量数据结合较好。

表 2 不同试验处理的产量和 WUE

处理	各因子编码			各因子实施水平			产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
	W	N	K	W/ mm	N/ (kg·hm ⁻²)	K/ (kg·hm ⁻²)		
W ₂ N ₂ K ₂	-1	-1	-1	30	61.5	31.5	8178.85fg	21.21hij
W ₂ N ₂ K ₄	-1	-1	1	30	61.5	211.5	8466.52defg	22.14ghij
W ₂ N ₄ K ₂	-1	1	-1	30	409.5	31.5	8378.65efg	21.87hij
W ₂ N ₄ K ₄	-1	1	1	30	409.5	211.5	8917.10cdef	23.34def
W ₄ N ₂ K ₂	1	-1	-1	60	61.5	31.5	8100.62g	21.16ij
W ₄ N ₂ K ₄	1	-1	1	60	61.5	211.5	8623.48defg	22.53efgh
W ₄ N ₄ K ₂	1	1	-1	60	409.5	31.5	9475.37abc	24.81bc
W ₄ N ₄ K ₄	1	1	1	60	409.5	211.5	10114.40a	26.44a
W ₁ N ₃ K ₃	-1.353	0	0	24.7	235.5	121.5	8056.08g	21.06j
W ₅ N ₃ K ₃	1.353	0	0	65.3	235.5	121.5	9814.16ab	25.60ab
W ₃ N ₁ K ₃	0	-1.353	0	45	0	121.5	8587.55defg	22.35fghi
W ₃ N ₅ K ₃	0	+1.353	0	45	471.0	121.5	9205.85bcd	24.13cd
W ₃ N ₃ K ₁	0	0	-1.353	45	235.5	0	8902.17cdef	23.28defg
W ₃ N ₃ K ₅	0	0	+1.353	45	235.5	243	9086.57cde	23.67cde
W ₃ N ₃ K ₃	0	0	0	45	235.5	121.5	9484.00abc	24.80bc
W ₃ N ₃ K ₃	0	0	0	45	235.5	121.5	10057.81a	26.27a
W ₃ N ₃ K ₃	0	0	0	45	235.5	121.5	9840.14ab	25.67ab

注:因子编码中数字代表各处理对应的水平值;数字后不同字母表示在 0.01 水平上差异显著。

3.2 模型建立与分析

以水肥投入量为自变量,以 WUE 为因变量,建立 W、N、K 三因子的 WUE 模型:

$$WUE = 25.376 + 1.085W + 1.018N + 0.507K + 0.663WN + 0.038WK - 0.063NK - 0.897W^2 - 0.951N^2 - 0.815K^2 \quad (R^2 = 0.924) \tag{1}$$

对模型(1)进行拟合度检验得: $F_{\text{拟}} = 2.791 < F_{0.05}(6, 2) = 19.3$,不显著,说明模型拟合较好。显著性检验得: $F_{\text{回}} = 29.53 > F_{0.01}(9, 7) = 6.72$,差异显著,

表明构建的模型能够较好地反映 W、N、K 三因素与 WUE 之间的关系。对模型的回归系数进行 F 检验得: $F_1 = 9.71^{**}$, $F_2 = 9.43^{**}$, $F_3 = 4.25^{*}$, $F_4 = 5.63^{*}$, $F_5 = 0.03$, $F_6 = 0.07$, $F_7 = 8.71^{**}$, $F_8 = 9.02^{**}$, $F_9 = 8.67^{**}$ ($F_{0.05}(9, 7) = 3.68$, $F_{0.01}(9, 7) = 6.72$)。可见,除 WK、NK 交互项的系数不显著外,其余各项的系数均达到显著水平,表明一次项 W、N、K、交互项 WN 及二次项 W²、N²、K²均对 WUE 影响显著。

3.2.1 主因子效应 模型(1)中的一次项、交互项和

二次项系数之间都是不相关的,因子系数均已无量纲化和标准化处理,因此用偏回归系数绝对值的大小直接反映各因素对 WUE 的影响,系数正负号反映各因素对 WUE 的作用方向。

分析模型(1)可得,单因子作用对 WUE 影响大小为 $W>N>K$,且单因子对 WUE 均为正向促进作用。两因子互作时,WN、WK、NK 对 WUE 的影响大小为 $WN>NK>WK$,交互项 WN、WK 的系数为正,表明 WN 和 WK 的两因子互作均相互促进,存在协同效应,即增加灌溉量需要提高施氮量才能显著提高 WUE,增加灌溉量也需要提高施钾量才能更有效发挥因子的互作效应。NK 交互项系数为负,表明 NK 互作具有替代作用,即在施氮量不足的情况下可以增加施钾量或施钾量不足时增加施氮量,可以获得较高的 WUE。二次项系数均为负,表明 WUE 随水肥因子编码水平的增加均呈开口向下的抛物线趋势变化。在取得最大值前,WUE 随灌溉量或施肥量的增加而增加;达到最大 WUE 后,随着灌溉量或施肥量的增加 WUE 逐渐减小,三因子均存在一个获得最大 WUE 的对应水或肥用量值。

3.2.2 单因子的 WUE 效应 对 WUE 模型(1)分别控制其中 2 个因子的编码水平为零,得出 W、N、K 的单因子效应模型(2)~(4):

W: $WUE=25.376+1.085W-0.897W^2$ (2)

N: $WUE=25.376+1.018N-0.951N^2$ (3)

K: $WUE=25.376+0.507K-0.815K^2$ (4)

利用模型(2)~(4)绘制 W、N、K 对 WUE 的单因子效应图 2。由图 2 可以看出,在试验编码水平范围内,随着 W、N、K 单因子用量的增加,WUE 的变化均为开口向下的抛物线型,呈先递增后递减的趋势。其中,随着 W、N 用量的增加,WUE 递增幅度均大于递减幅度,且随 W 用量的增加,递增递减幅度大于 N 用量的。而随 K 用量的增加,WUE 递增幅度小于递减幅度。计算得知,随 W、N、K 单因子用量的增加,WUE 的变化范围分别为 22.27~25.70,22.26~25.65,23.20~25.45 $kg/(hm^2 \cdot mm)$ 。在编码值均小于 0 时,相同编码值水平施用量的 K 较 W、N 可获得更高的 WUE,施钾更有效地促进 WUE 的提高。而在编码水平均大于 0 时,W 更高,N 次之,K 最弱,灌水能够保障玉米需水,减缓 WUE 降低。在编码水平均为 -1.353 时,W、N、K 单因子的 WUE 取值分别为 22.27,22.26,23.20 $kg/(hm^2 \cdot mm)$,增加编码值水平到 0 时,WUE 均提高到 25.38 $kg/(hm^2 \cdot mm)$,继续增加 W、N、K 单因子编码水平分别为 0.605,0.535,0.311 时,得到对应的 WUE 最大值分别为 25.70,26.65,25.45 $kg/(hm^2 \cdot mm)$,较最小值分别提高 15.44%,15.23%,9.73%。以此为界点,W、N、K 单因子

用量进一步增加对 WUE 的提高起到负向作用,当编码值增加到试验设计的最大值 1.353 时,对应的 WUE 分别降低到 25.20,25.01,24.57 $kg/(hm^2 \cdot mm)$ 。表明只有采用适量的 W、N、K 投入,才能对春玉米 WUE 的提高获得正向促进作用。

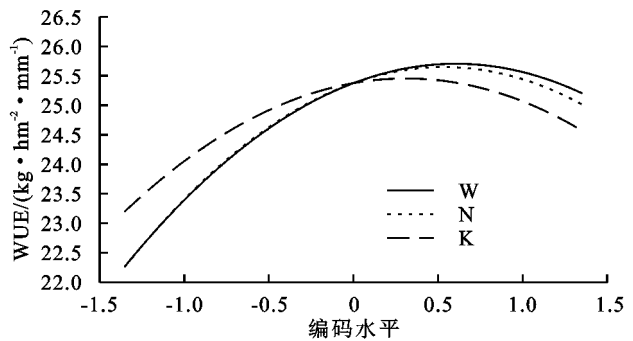


图 2 单因子的 WUE 效应

3.2.3 两因子互作的 WUE 效应 对 WUE 模型(1)分别控制其中 1 个因子的编码值为 0,依次得到 W 与 N 互作、W 与 K 互作及 N 与 K 互作的效应模型(5)~(7),并分别绘制对应的互作图(图 3)。

WN: $WUE=25.376+1.085W+1.018N+0.663WN-0.897W^2-0.951N^2$ (5)

WK: $WUE=25.376+1.085W+0.507K+0.038WK-0.897W^2-0.815K^2$ (6)

NK: $WUE=25.376+1.018N+0.507K-0.063NK-0.951N^2-0.815K^2$ (7)

(1)水氮互作。图 3a 为 W、N 两因子互作的 WUE 变化,图 3a1 是空间中呈向上突起的凸面型。为了对数据直观分析,将图 3a1 简化为图 3a2 的平面等值线图。可以发现,W、N 两因子共同作用时,对 WUE 相互影响,且存在最优 W、N 用量的配比。在编码值取 -1.353 时,WUE 取得试验设计编码值范围内的最小值为 20.36 $kg/(hm^2 \cdot mm)$ 。在 W、N 编码水平增加至 0.921 和 0.856 时,WUE 迅速增大并取得最大值为 26.31 $kg/(hm^2 \cdot mm)$,较最小值提高 29.22%,表明低 W 低 N 配合只能获得低 WUE。在 WUE 取得最大值后,W、N 编码值的增加不能使 WUE 继续升高。当 W、N 两因子编码水平均增加到 1.353 时,WUE 减小至 26.05 $kg/(hm^2 \cdot mm)$ 。进一步分析,在 W、N 取不同编码值,可计算出相应的 WUE 值及 WUE 的变化率,所得结果见表 3。由表 3 可以看出,WUE 随着编码水平的提高呈先升高后降低的趋势;在取低编码水平时,WUE 变化率的绝对值较大,在接近编码值为 1 时 WUE 变化率绝对值较小。

在试验设计编码范围内,当 W、N 两因子的编码水平分别为 -1.353 和 1.353 时,WUE 值最小,仅有 20.69 $kg/(hm^2 \cdot mm)$ 。在 W、N 两因子的编码水平分别为 1.353 和 -1.353 时,WUE 取值同样处于较低

水平,为 20.87 kg/(hm² · mm)。表明无论是高 W 低 N 还是低 W 高 N 组合都不利于获得较大的 WUE,只有适宜水平的 WN 因子互作时,更有利于获得更大的 WUE。图 3a 也表明,试验编码范围内

等值线的 WUE 变化似以 W、N 编码值为 0.921 和 0.856 为最高值点(26.31 kg/(hm² · mm))向四周发散的“椭圆”。W、N 两因子共同作用时,对 WUE 的影响为交互协同作用,促进 WUE 的提高。

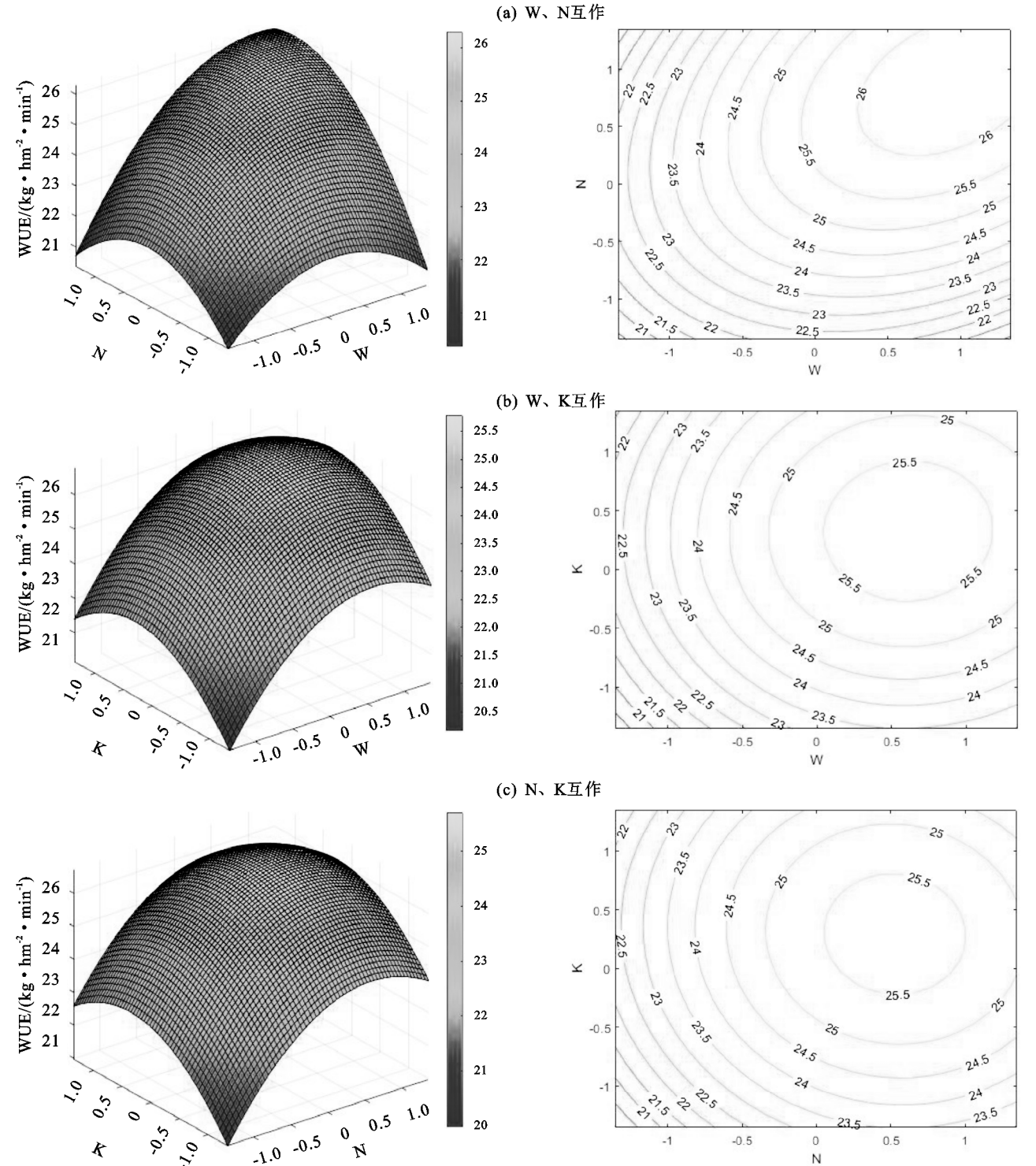


图 3 两因子互作的 WUE 效应

(2)水钾互作。图 3b 为 W、K 两因子共同作用下的 WUE 变化图,图 3b1 表现为向上突起的凸面型。与 W、N 两因子作用相似,在 W、K 两因子共同作用下,WUE 的变化呈先增大后减小的趋势,且存在最优 W、K 配比。WUE 在 W、K 两因子由-1.353

同步增长至 1.353 的变化过程中,低 W 低 K 限制 WUE 提高。随着 W、K 编码值的分别提高至 0.612 和 0.325,WUE 取值由最小值 20.16 kg/(hm² · mm)升高至最大 25.79 kg/(hm² · mm),提高 27.93%。与 W、N 两因子作用不同,W、K 两因子交互作用下,WUE 的变

化幅度更小,表明对 WUE 数值的影响方面,W、K 互作对 WUE 数值提升的幅度弱于 W、N 互作。表 4 所列为 W、K 取不同编码水平时计算所得 WUE 数值变化。对比分析可得,W、K 互作的 WUE 数值及变化率与 W、N

互作呈相似的变化趋势,但在 WUE 最大值点后,随着 W、K 编码水平的进一步升高,WUE 的降低更快、更明显。在 W、N 两因子取 1.353 时,WUE 为 24.47 kg/(hm² · mm),较最大值降低 5.11%。

表 3 W、N 两因子交互作用的 WUE 变化

指标	编码水平						
W	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
N	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
WUE	20.36	22.09	24.03	25.38	26.13	26.29	26.05
WUE 的变化率	—	+4.90	+3.88	+2.70	+1.50	+0.32	−0.68

注:WUE 和 WUE 的变化率单位为 kg/(hm² · mm),WUE 的变化率指 WUE 变化量与编码水平变化量的比值。下同。

表 4 W、K 两因子交互作用的 WUE 变化

指标	编码水平						
W	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
K	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
WUE	20.16	22.11	24.16	25.38	25.75	25.29	24.47
WUE 的变化率	—	+5.52	+4.10	+2.44	+0.74	−0.92	−2.32

W、K 两因子互作对 WUE 的提高呈正向促进作用,但弱于 W、N 互作,在图 3b 中表现为 W、N 两因子等值线图更近似于椭圆,而 W、K 两因子等值线图更接近于圆。

(3)氮钾互作。图 3c 为 N、K 两因子共同作用下的 WUE 变化图。由图 3c2 可以看出,在 N、K 两因子共同作用下 WUE 的等值线形状近似于圆形,表明 N、K 互作效应较弱。在 N、K 两因子的编码水平分别为 −1.353 和 1.353 时,WUE 的取值为全试验编码

范围内最低为 21.57 kg/(hm² · mm)。可见,在氮肥不足的情况下,增加施钾量也能获得一定 WUE。

由表 5 可以看出,在 N、K 两因子由 −1.353 同步增长至 1.353 的变化过程中,WUE 数值及变化率变化趋势与 W、K 交互作用时相似。通过对模型求解得出,N、K 两因子编码水平分别为 0.526 和 0.291 时,WUE 取得最大值 25.72 kg/(hm² · mm),较两因子编码值均取 −1.353 或 1.353 时分别提高 28.90% 和 6.77%。

表 5 N、K 两因子交互作用的 WUE 变化

指标	编码水平						
N	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
K	−1.353	−1	−0.5	0	+0.5	+1	+1.353
WUE	19.96	22.02	24.16	25.38	25.68	25.07	24.09
WUE 的变化率	—	+5.84	+4.28	+2.44	+0.60	−1.22	−2.78

3.2.4 三因子互作的 WUE 效应 图 4 是在试验编码范围内,W、N、K 对 WUE 的三因子效应图,左侧是三因子编码水平分别为 −1,−0.5,0,0.5,1 时的切片图。为了更明显地观察三因子不同编码下的 WUE 数值变化,简化左侧图为右侧的等值线图。分析图 4 得出,总体上,随着 W、N、K 三因子编码水平的同时提高,WUE 呈先提高后降低的趋势动态变化,且存在获得最大 WUE 的 W、N、K 配比。

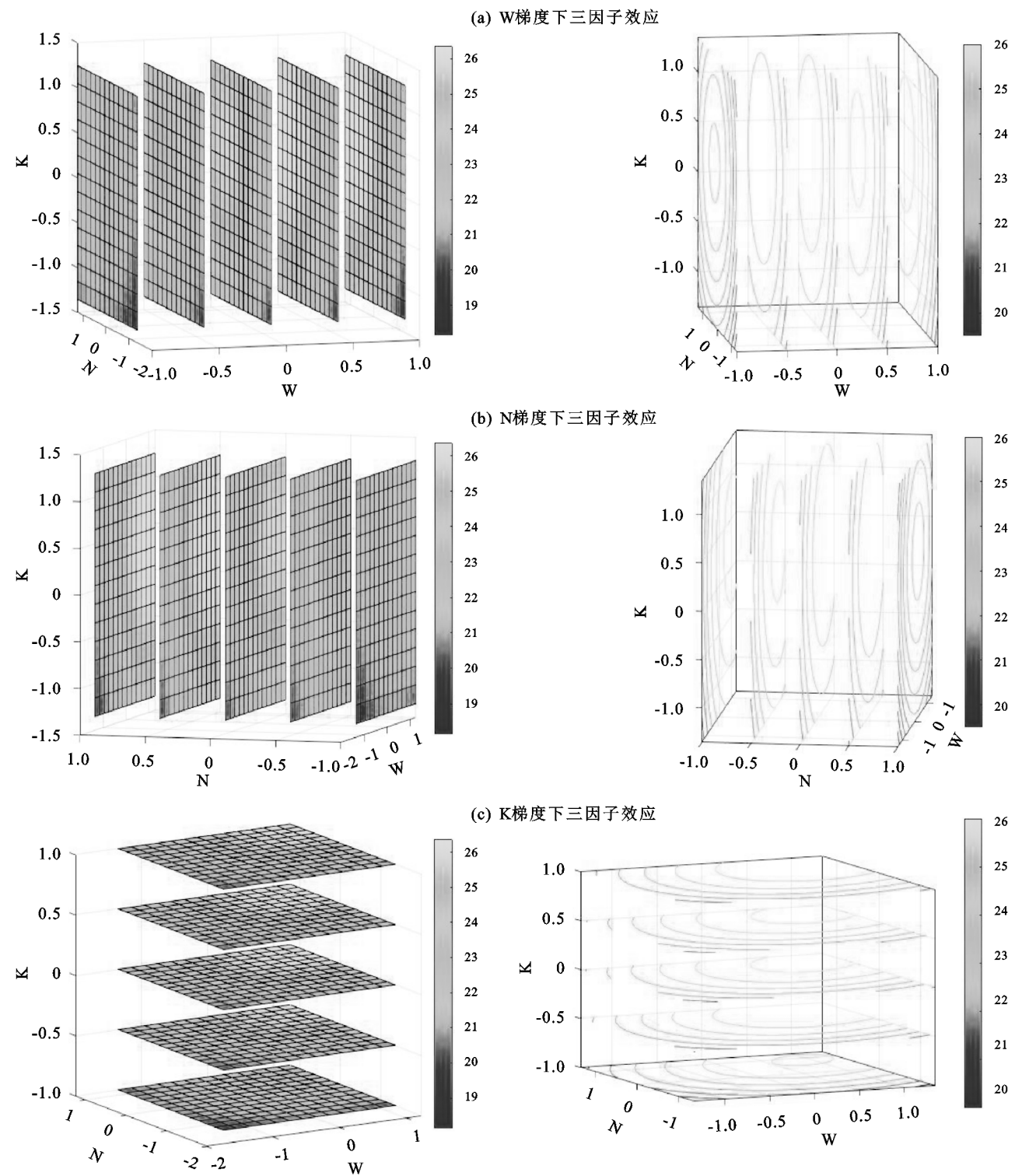
图 4a 表示在 W 的不同编码梯度时三因子对 WUE 的影响。由图 4a1 可以看出,随着 W、N、K 三因子编码水平的不断增大,可取得较高 WUE(图中浅色区域)的区域面积明显地由小变大再变小,通过对回归模型的求解也得出同样的结果,即在 W 编码水平分别为 −1.353,−1,−0.5,0,0.5,1,1.353 时,对应的 N、K 编码水平分别为(0.054,0.277),(0.177,0.280),(0.351,0.286),(0.526,0.291),(0.700,

0.296),(0.874,0.301),(0.997,0.304)时可获得最大 WUE,分别为 22.33,23.49,24.80,25.72,26.24,26.38,26.24 kg/(hm² · mm)。W 梯度的不断增加,取得最大 WUE 的 N、K 梯度也在随之提高,而各梯度下的最大 WUE 呈先增加后降低的趋势。同样,在 N、K 梯度上分别模拟分析三因子效应时,得到相似的结论,不再重复。

由图 4a 可知,在 W 编码水平取 0 时,WUE 的取值仅受 N、K 两因子的影响,其取值范围为 19.96~25.72 kg/(hm² · mm),WUE 变化幅度为 28.86%;由图 4b 可知,在 N 的编码水平取 0 时,WUE 的取值仅受 W、K 两因子的影响,其取值范围为 20.16~25.79 kg/(hm² · mm),WUE 变化幅度为 27.93%;由图 4c 可知示,在 K 的编码水平取 0 时,WUE 的取值仅受 W、N 两因子的影响,其取值范围为 20.36~26.31 kg/(hm² · mm),WUE 变化幅度为 29.22%。

同样方法可得,当 W、N、K 因子编码水平均取 -1 时,WUE 的取值范围依次为 18.93~23.49,19.00~23.56,19.01~25.01 kg/(hm²·mm),变化幅度分别为 24.09%,24.00%,31.56%;当 W、N、K 因子编码水平均取 1 时,WUE 的取值范围依次为 19.20~26.38,19.41~26.37,20.09~25.99 kg/(hm²·mm),

变化幅度分别为 37.40%,35.86%,29.37%。可见,三因子交互作用时,高水高肥或低水低肥配合不能获得高 WUE,而中水中肥或丰水丰肥才能获得高的 WUE,说明只有在适宜量的 W、N、K 配合才能发挥最佳的交互效应,既能获得较高 WUE,也可以实现对肥水资源的节约利用。



注:WUE 图例单位为 kg/(hm²·mm)。

图 4 三因子互作的 WUE 效应

结合图 4a~4c 可以发现,在 W、N、K 编码值从 -1.353 增大至 1.353 的过程中,WUE 取值呈先提高

后降低的趋势。在 W、N、K 编码值取 -1.353 时,WUE 取值为 18.14 kg/(hm²·mm)。低水低肥条件

明显限制 WUE 的升高。

从表 6 可以看出,中水中肥(或丰水丰肥)组合条件下可获得较高 WUE,在低水低肥组合(W、N、K 的编码值均为-1.353)和高水高肥组合(W、N、K 的

码值均为 1.353)的 WUE 取值较低。通过对模型寻优优化得出,在 W、N、K 编码值分别取 0.924,0.848,0.300 时可获得试验范围内的 WUE 最大值 26.38 kg/(hm²·mm)。

表 6 W、N、K 三因子交互作用的 WUE 变化

指标	编码水平						
W	-1.353	-1	-0.5	0	+0.5	+1	+1.353
N	-1.353	-1	-0.5	0	+0.5	+1	+1.353
K	-1.353	-1	-0.5	0	+0.5	+1	+1.353
WUE	18.14	20.74	23.56	25.38	26.17	25.96	25.20
WUE 的变化率	—	+7.37	+5.64	+3.64	+1.58	-0.42	-2.15

3.3 较高 WUE 的水肥优化方案

通过对 W、N、K 三因子耦合效应图分析,结合试验地区的生产实际,获得在满足当地春玉米丰产(产量≥8 000 kg/hm²)的同时,试验区内较高 WUE(≥25.00 kg/(hm²·mm))的 W、N、K 适宜编码范围分别为(-0.117,+0.924),(-0.032,+0.848),(-0.184,+0.300),即自然降雨条件下(年均降水量 477.74 mm,生育期降水量 408.70 mm)的适宜水肥用量为灌溉量 43.25~58.87 mm,施氮量 229.93~382.97 kg/hm²,施钾量 104.94~148.49 kg/hm²。

4 讨论

提高作物产量和降低耗水量是农业生产者与研究者的共同目标,而 WUE 是与作物产量和耗水量直接相关的一个重要指标^[19]。农田水肥管理就是协调水分与养分,使二者的关系达到最优,以便实现节水节肥高产的目标^[20]。不同水肥管理方案的作物 WUE 表现不一致。李雪等^[21]通过在遮雨棚中开展浅埋滴灌水氮耦合试验发现,在一定程度上春玉米 WUE 随着灌水量的降低呈增加的趋势。而本研究多年的田间试验发现,W、N、K 三因子用量同时增加的春玉米 WUE 呈先升高后降低的变化趋势,且存在最佳的施用量配比。因此,当水肥条件不足时,增加灌溉施肥量对作物 WUE 的提升有正向作用;水肥互动也存在阈值反应,低于阈值时增加水肥投入对 WUE 的提升效果明显,高于阈值后提升效果降低^[22]。

半干旱区水分供需矛盾突出一直是制约半干旱区玉米产量和 WUE 提高的关键因素,在辽西半干旱区也是如此^[23]。本研究发现,水肥单因子作用对 WUE 影响大小顺序为 W>N>K。氮素也是影响半干旱区玉米生长的重要养分因子,增加氮肥用量能促进根系对水分的吸收,提高作物耗水量^[24]、产量及 WUE^[25]。在二因子交互效应方面研究发现,灌水和施氮是影响作物耗水、产量和 WUE 的重要因素,只有适量合理配施才能达到高产高效^[26-27]。Si 等^[28]研究认为,增加灌溉和施氮量能显著提高冬小麦产量和 WUE,然而超过

一定施用量范围后则会抑制小麦生长,W、N 二因子交互效应图中等值线的形状可以反映因子间交互作用的强弱,形状越接近椭圆表示因子间交互作用越强,形状越接近圆则表示因子间交互作用越弱。也有研究^[29]报道,灌水、施氮以及二者交互作用对玉米 WUE 均有极显著影响。本研究表明,W、N 互动对春玉米 WUE 的影响最大,N、K 互动次之,W、K 互动最弱。其中 W、N 互动、W、K 互动对 WUE 均呈正交互作用,可促进 WUE 的提高且存在用量最佳配比。滴灌水肥耦合有利于作物根系生长和作物光合作用,提高作物产量和 WUE^[30-31]。在本研究中,两因子互动 WN、WK、NK 以及 WNK 三因子互动 WUE 最大值较最小值分别提高 29.22%,27.94%,28.82%,45.47%,表现出 W、N、K 多因子耦合作用对 WUE 取值影响大小为 WNK>WN>NK>WK。

5 结论

(1)在试验编码范围内,浅埋滴灌条件下 W、N、K 单因子对 WUE 的提高均呈正向促进作用,作用大小顺序为 W>N>K。随着单因子施用量的增加,WUE 均呈开口向下的抛物线型的趋势先升高后降低变化,且随因子用量的增加 WUE 升高幅度均大于降低幅度。

(2)两因子互动的 WUE 为向上的凸面型变化,即随着两因子用量增加 WUE 呈先升高后降低的趋势变化。两因子互动作用大小顺序为 WN>NK>WK,其中 WN 互动显著,而 NK 互动和 WK 互动不显著。WN 互动和 WK 互动对 WUE 的提高为相互促进作用,NK 为相互替代作用。

(3)随着 W、N、K 三因子用量的同步增加,三因子互动 WUE 表现为中水中肥(或丰水丰肥)组合较高,而高水高肥或低水低肥组合不能获得高的 WUE,适量 W、N、K 配合才能发挥较高 WUE 的互动效应,实现水分的高效利用。获得较高 WUE(≥25.00 kg/(hm²·mm))的水肥施用方案为灌溉量 43.25~58.87 mm,施氮量 229.93~382.97 kg/hm²,施钾量 104.94~148.49 kg/hm²。

该水肥优化管理方案可为浅埋滴灌技术在辽西半干旱区春玉米水分高效利用生产提供技术参考。

参考文献:

- [1] 刘作新,高鹏.东北半干旱区节水农业应用基础与节水技术[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 刘江,潘宇弘,王平华,等.1966—2015 年辽宁省玉米气候生产潜力的时空特征[J].生态学杂志,2018,37(11):3396-3406.
- [3] 白伟,孙占祥,郑家明,等.辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析[J].土壤,2011,43(5):714-719.
- [4] 陈印军,易小燕,方琳娜,等.中国耕地资源与粮食增产潜力分析[J].中国农业科学,2016,49(6):1117-1131.
- [5] 杨恒山,薛新伟,张瑞富,等.灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):69-77.
- [6] 杜太生,康绍忠,夏桂敏,等.滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J].农业工程学报,2005,21(11):51-56.
- [7] 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.
- [8] 夏桂敏,汪千庆,张峻霄,等.生育期连续调亏灌溉对花生光合特性和根冠生长的影响[J].农业机械学报,2021,52(8):318-328.
- [9] 解红娥,李永山,杨淑巧,等.农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J].农业环境科学学报,2007(增刊 1):153-156.
- [10] 张建军,郭天文,樊廷录,等.农用地膜残留对玉米生长发育及土壤水分运移的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(1):100-102.
- [11] 冯晨,冯良山,刘琪,等.辽西半干旱区不同类型地膜降解特性及其对玉米产量的影响[J].中国农业科学,2021,54(9):1869-1880.
- [12] 郭金路,谷健,尹光华,等.辽西半干旱区浅埋式滴灌对春玉米耗水特性及产量的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2514-2520.
- [13] 孙仕军,杨金鑫,万博,等.不同滴灌方式对辽西半干旱区春玉米生长及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2021,52(1):32-39.
- [14] Wang J T, Du G F, Tian J S, et al. Mulched drip irrigation increases cotton yield and water use efficiency via improving fine root plasticity[J].Agricultural Water Management,2021,255:e106992.
- [15] 王士杰,尹光华,李忠,等.浅埋滴灌水肥耦合对辽西半干旱区春玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):139-147.
- [16] Fasina A S, Awe G O, Ilori A O A, et al. Effect of drip irrigation frequency and n-fertilization on yield and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus*) in Ado-Ekiti, Nigeria[J]. Research on Crops, 2021, 22(2):292-300.
- [17] 刘泳圻,谷健,孙仕军,等.辽西半干旱区浅埋滴灌水、氮、磷、锌耦合对春玉米产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(5):898-908.
- [18] 高春华,张永丽,于振文.高产条件下不同小麦品种耗水特性及籽粒产量的差异[J].麦类作物学报,2010,30(1):101-105.
- [19] 杜二小,李焕春,任永峰,等.氮肥减施对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].北方农业学报,2021,49(4):45-51.
- [20] 丛鑫,张立志,徐征和,等.水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J].农业机械学报,2021,52(3):315-324.
- [21] 李雪,尹光华,马宁宁,等.浅埋滴灌水氮运筹对春玉米产量及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):172-178.
- [22] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2):314-323.
- [23] 高砚亮,孙占祥,白伟,等.辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2017,50(19):3702-3713.
- [24] 吴金芝,黄明,李友军,等.耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):264-271.
- [25] 谢英荷,栗丽,洪坚平,等.施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1354-1361.
- [26] 吕丽华,董志强,张经廷,等.水氮对冬小麦—夏玉米产量及氮利用效应研究[J].中国农业科学,2014,47(19):3839-3849.
- [27] 邹海洋,张富仓,张雨新,等.适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J].农业工程学报,2017,33(21):145-155.
- [28] Si Z, Zain M, Mehmood F, et al. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2020,231(C):e106002.
- [29] Narender K, Amandeep S, Sanjay K. Effect of quality of irrigation water and levels of N-fertigation on nitrogen use efficiency and water use efficiency of drip irrigated tomato[J].International Journal of Agricultural Engineering,2017,10(2):461-464.
- [30] Ankush S K S. Yield, quality, nutrient and water use efficiency of tomato as affected by different fertigation rates through drip irrigation system[J].Indian Journal of Agricultural Research,2017,51(5):478-482.
- [31] 刘虎成,徐坤,张永征,等.滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响[J].农业工程学报,2012,28(增刊 1):106-111.