

不同灌水定额对膜下滴灌玉米的生长、产量及水分利用效率的影响

胡建强¹, 赵经华¹, 马英杰¹, 杨磊², 陈凯丽¹

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 阿勒泰地区水利管理处, 新疆 阿勒泰 836500)

摘要: 探究适宜多砾石砂土地区膜下滴灌玉米高产、高效节水的灌溉制度, 针对该地区滴灌玉米缺乏相关灌溉制度的突出问题, 采用大田小区对比试验的方法, 研究不同灌水定额 (300 m³/hm² (W1)、375 m³/hm² (W2)、450 m³/hm² (W3)、525 m³/hm² (W4)、600 m³/hm² (W5)) 对玉米生理指标、产量及水分利用效率的影响。结果表明: 提高灌水定额对玉米生理指标有促进作用, 能够加速籽粒发育; 灌水定额与产量、水分利用效率呈单峰曲线变化, 与耗水量呈线性变化。灌水定额大于525 m³/hm²时, 对生理指标和产量无显著影响。灌水定额低于450 m³/hm²时, 作物生长发育受到抑制, 严重影响了产量构成要素, 使玉米最终产量受到限制。在W4处理下产量与水分利用效率达到峰值。综合试验分析表明, 在多砾石砂土地区选择灌水定额为525 m³/hm²的灌溉制度较适宜。

关键词: 灌水定额; 膜下滴灌; 玉米; 生理指标; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S274; S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0249-06

Effects of different irrigation quota on growth, yield and water use efficiency of drip irrigation maize under mulch

HU Jianqiang¹, ZHAO Jinghua¹, MA Yingjie¹, YANG Lei², CHEN Kaili¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Aletai Water Resources Management Office, Aletai 836500, China)

Abstract: In order to explore the high yield, high efficiency and water saving irrigation system of drip irrigation maize under mulch and solve the severe problem of lacking of related irrigation system in drip irrigation maize in the area of multiple gravel sandy soil, this paper studies the effect of different irrigation quota (300 m³/hm² (W1)、375 m³/hm² (W2)、450 m³/hm² (W3)、525 m³/hm² (W4)、600 m³/hm² (W5)) on physiological index, yield and water use efficiency of maize by means of field plot contrast test. The results showed that increased irrigation quota can promote physiological index of maize and accelerate grain development. Irrigation quota and yield, water use efficiency showed a single peak curve change, and have a linear relationship with water consumption. When irrigation quota was more than 525 m³/hm², physiological index and yield had no significant influence. When the irrigation norm was less than 450 m³/hm², the growth and development of crops was inhibited, the yield components were seriously affected, and the final yield of maize was restricted. Under the W4 treatment, the yield and water use efficiency reached the peak. The comprehensive test and analysis showed that the irrigation schedule with irrigation quota of 525 m³/hm² was more suitable in the multiple gravel sandy soil area.

Key words: irrigation quota; drip irrigation under mulch; maize; physiological index; yield; water use efficiency

收稿日期: 2018-03-24; 修回日期: 2018-06-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区教育厅创新项目 (XJEDU02017T004)

作者简介: 胡建强 (1993-), 男, 新疆伊犁人, 硕士研究生, 主要从事灌溉节水理论研究。

通讯作者: 赵经华 (1979-), 男, 新疆奇台人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉技术研究及教学工作。

1 研究背景

随着新疆现代化经济的发展,各行各业用水量不断增加,解决水资源短缺的问题迫在眉睫^[1]。农业作为新疆用水量最大的国民经济基础产业^[2],水资源的缺乏严重影响农业生产,限制了经济的发展^[3-5]。合理的灌溉制度在达到高产的同时,也能够节约农业用水^[6-7],是缓解干旱、半干旱地区用水矛盾的一条切实可行的途径^[8-9]。

适宜的灌溉制度有利于作物的生长发育,提高经济效益;当灌水定额过高时,会使玉米根系的呼吸作用受限,影响生理发育;当灌水定额过低时,不能满足基本生理发育,造成大幅减产^[10-11]。李蔚新等^[12]研究表明当灌水定额大于 $450\text{ m}^3/\text{hm}^2$,灌水次数超过3次时,产量、产量构成要素和水分生产效率有下降的趋势。唐光木等^[13]研究表明当灌溉定额大于 $6\ 000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,对膜下滴灌套播玉米的产量及产量构成无显著影响,赵楠等^[14]的研究表明宁夏引黄灌区膜下滴灌春玉米的产量与水分利用效率随着灌水下限的增加呈先增后减的趋势。大量研究表明,适宜的灌溉制度具有提高水分利用效率和作物产量等优点,在其应用上已相对成熟^[15-16]。

以往的研究多集中在砂土、壤土和黏土等土壤的灌溉制度研究,但对多砾石砂土的灌溉制度研究鲜有报道。由于阿勒泰灌区水低地高,土壤质地为多砾石砂土,土壤持水能力差;而且水利设施不完善,农业灌溉技术落后,造成渗漏损失严重;年均降水量 121 mm ,年蒸发量在 $1\ 844.4\text{ mm}$ 以上,存在地域差异及气候差异^[17]。特殊的地理位置与气候条件等原因,使玉米生长发育的环境与其他地区存在一定差异,而玉米作为该地区的支柱产业,对其滴灌灌溉制度的研究具有十分重要的实际意义。因此本

文对阿勒泰地区膜下滴灌灌溉条件下玉米的生理指标、产量与水分利用效率进行研究。以期揭示滴灌玉米不同灌水定额条件的适宜度,为阿勒泰地区玉米高效节水研究与示范平台提供可靠依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验地概况

2017年4-10月在阿勒泰浑沃尔海试验站进行试验,地理位置为 $\text{N}47^{\circ}00'56''\sim 47^{\circ}01'56''$ 、 $\text{E}87^{\circ}35'56''\sim 87^{\circ}36'01''$ 、海拔高度 550 m 。年均太阳辐射总量 $564.7\text{ kJ}/\text{cm}^2$,年均日照时数 $2\ 778\text{ h}$,年均气温 4°C ,大于等于 10°C 的积温为 $2\ 882.4^{\circ}\text{C}$,年均降水量 121 mm ,年蒸发量为 $1\ 844.4\text{ mm}$ 以上;年平均相对湿度在 $50\%\sim 70\%$,作物生长期日平均相对湿度低于 30% 。该站区 $0\sim 50\text{ cm}$ 深度的土壤质地以沙土和沙壤土为主,土壤肥力贫瘠, 50 cm 以下为砂砾石,土壤渗透系数为 $8.78\text{ mm}/\text{d}$,透水性强,带碱性。土壤有机质含量 0.213% ,全氮 0.027% ,速效氮 $19.5\text{ mg}/\text{kg}$,速效磷 $9.0\text{ mg}/\text{kg}$,速效钾 $92.4\text{ mg}/\text{kg}$ 。土壤干容重 $1.75\sim 1.79\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2.2 试验设计

供试玉米为先玉1331号,5月13日播种,10月3日收获,采用一膜一管二行种植,株距 20 cm ,行距 $(40-60-40\text{ cm})$,滴灌带布设在膜中间。滴头流量 $3.6\text{ L}/\text{h}$,滴头间距 0.3 m 。试验共设5个处理,每个处理设3个重复。

试验采用变灌水定额,其灌溉制度如表1所示。为保证试验合理性,本试验小区随机布置,各小区之间均设有隔离带以防止水分交互作用。玉米在全生育期采用滴施方式施加尿素4次; $225\text{ kg}/\text{hm}^2$ (7月5日); $225\text{ kg}/\text{hm}^2$ (7月12日); $225\text{ kg}/\text{hm}^2$ (7月19日); $225\text{ kg}/\text{hm}^2$ (8月9日)。

表1 玉米灌水方案设计

| 生育期 | 日期 | 灌水次数 | m^3/hm^2 | | | | |
|-------|-------------|------|--------------------------|------|------|------|------|
| | | | W1 | W2 | W3 | W4 | W5 |
| 苗期 | 05-24-05-28 | 1 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 拔节期 | 05-29-06-14 | 1 | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 |
| 喇叭口期 | 06-15-07-15 | 2 | 300 | 375 | 450 | 525 | 600 |
| 抽雄散粉期 | 07-16-08-06 | 3 | 300 | 375 | 450 | 525 | 600 |
| 乳熟期 | 08-07-08-26 | 3 | 300 | 375 | 450 | 525 | 600 |
| 完熟期 | 08-27-09-25 | 1 | 300 | 375 | 450 | 525 | 600 |
| 全生育期 | 05-24-09-25 | 11 | 3375 | 4050 | 4725 | 5400 | 6075 |

2.3 测定项目与方法

(1)株高与叶面积指数:每小区在玉米生育初期选取5株长势均匀的玉米,并标记,采用卷尺(0.1 cm)在拔节期和乳熟期各测量一次株高,喇叭口期与抽雄散粉期各测量3次株高;玉米株高在抽雄散粉期之前为玉米基部至玉米顶端两片叶子的交汇处的高度,抽雄散粉期至乳熟期为玉米基部至雄穗尖端的高度。测量株高的同时,采用卷尺分别测定5株玉米叶片的长和宽,采用长宽系数法计算玉米叶面积,经验系数取0.75^[18],叶面积指数(LAI)的计算见公式(1)。

$$LAI = \text{玉米的叶面积} / \text{玉米的占地面积} \quad (1)$$

(2)耗水量:采用TRIME-IPH测定土壤含水量。每小区设3根测管,布设位置距滴灌带0、20、40 cm。测定深度为60 cm,每10 cm一测。测定时间分别为:播种前、收获后、灌前和灌后。如遇降雨、生育阶段转变时,需进行加测。通过测定计算玉米生育期内各阶段的土壤含水量与有效降雨量,计算作物耗水量,耗水量的计算公式为^[19]:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n (\gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2})) + M + P_0 + K \quad (2)$$

式中: ET_{1-2} 为阶段耗水量,mm; i 为土壤层次号数; n 为土壤层次总数; γ_i 为第*i*层土壤干容重, g/cm^3 ; H_i 为第*i*层土壤厚度,cm; θ_{i1} 为第*i*层土壤阶段初含水量, θ_{i2} 为第*i*层土壤阶段末含水量,均以占干土重的百分数计; M 为时段内的灌水量,mm; P_0 为时段内降水量,mm; K 为时段内的地下水补给量,mm;本试验地的地下水埋深较深,地下水补给量视为0。

(5)水分利用效率:水分利用效率的计算公式^[20]为:

$$WUE = Y_a / ET_a \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率, $kg/(hm^2 \cdot mm)$; Y_a 为玉米产量, kg/hm^2 ; ET_a 为玉米生育期间实际耗水量,mm。

(6)产量与产量构成要素:每个试验小区随机选取5株玉米,分析平均穗长、秃尖长、每穗粒数、百粒重、结棒高,当籽粒晾晒至含水率14%时称重换算出单位面积的产量^[21]。

(7)气象数据:使用HOBO小型自动气象站全天候自动观测气温、辐射、降雨等常用气象数据,15 min测定一次。

2.4 数据处理

采用Excel2010绘制图标,DPS数据处理系统

对数据进行显著性检验和相关性分析。

3 试验结果与分析

3.1 不同灌水定额对膜下滴灌玉米株高的影响

图1为不同灌水定额的玉米株高随时间变化趋势。由图1可知,玉米株高呈S型曲线变化,6月15日之前采用相同灌水定额保证充分蹲苗,促使玉米根系纵向发展,使植株基部茎节粗壮,增强抗旱和抗倒伏的能力,避免因茎折影响叶片向果穗输送光合产物^[22],因此玉米株高基本无差异。6月15日之后株高随气温升高、日照时间增加和灌水定额不同出现差异。7月6日-7月23日差异明显且生长速率最快,该时段的平均株高比7月6日前高74.97%。说明该时段为玉米株高生长关键期,因为该时期在根茎叶旺盛生长的同时雌雄穗快速分化发育,对水分的需求量最大,应该加强水分管理。7月23日至8月4日增长速率减慢,但低灌水处理仍在以一定的速率生长,说明灌水定额过小将增加根茎叶的生长周期,影响后期玉米籽粒的生长发育。8月4日之后,株高变化不明显甚至有下降的趋势,因为该时期以玉米籽粒的生殖生长为主。李凯等^[23]研究表明玉米株高是影响玉米产量的重要性状。因此适宜的灌溉制度将确保玉米株高达到最优状态,为后期的高产奠定物质基础。

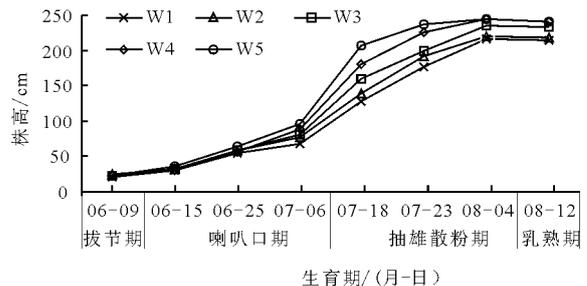


图1 不同灌水定额对玉米株高的影响

3.2 不同灌水定额对膜下滴灌玉米叶面积指数的影响

图2为不同灌水定额的玉米叶面积指数随时间变化趋势。如图2所示,玉米叶面积指数(LAI)呈单峰趋势变化,6月15日之后因灌水定额不同出现明显差异,6月15日-7月19日叶面积指数斜率最大,该时段平均叶面积指数比6月15日之前高85.11%,说明此阶段是玉米叶片增长的关键时期,应加强水分管理促进叶面积的生长,保证干物质积累为后期高产提供保障。此阶段出现分段生长现象,灌水定额大于W3处理与小于W3处理的差幅

在13.98% ~ 21.65%之间。说明水分短缺将抑制了玉米叶面积的增长。7月23日之后玉米叶面积指数有减小现象,因为该时期叶片干物质向玉米籽粒转移,导致植株底部叶片干黄衰落且中上部叶片外边缘干黄,因此叶面积指数有减小趋势。8月4日之后下降趋势最明显,但W4与W5处理下降趋势较小,说明当灌水定额大于W4处理时会一定程度上延缓叶片枯萎,增加干物质的积累量。合理的灌溉制度既保证了干物质的积累影响最终产量,又节约灌溉水量。

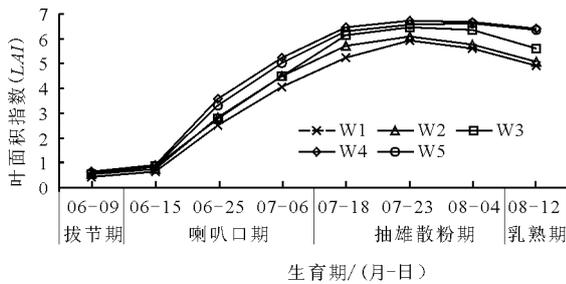


图2 不同灌水定额条件下玉米全生育期叶面积指数变化曲线

3.3 不同灌水处理对玉米产量构成要素的影响

为探究产量与产量构成要素的相关性,表2用LSD法分析了产量与其构成要素的相关程度。分析可知,产量与百粒重相关性不显著,与秃尖长呈负相关,与其他构成要素在0.01水平呈极显著相关;这与张淑杰等^[24]的研究基本一致。因此理想的产

量构成因素是最终产量的保障。

产量构成因素又受水分的影响,理想的产量构成需合理的灌溉制度。表3用LSD法分析了不同灌水定额间各产量构成要素的差异性。分析可知,以W3处理为界,除百粒重之外低灌水与高灌水的产量构成要素差异显著。说明灌水定额小于W3处理时,因水分亏缺,将导致玉米穗长较小每穗粒数减少且秃尖长较长,从而影响最终的产量。但与高灌水处理相比,低灌水处理的水分能满足较少每穗粒数的水分需求,因此处理间的百粒重差异不显著。W4处理的产量构成要素最大,W4处理的穗长与W5、W3、W2、W1处理的差幅分别为:2.25%、5.1%、9.21%、14.69%;W4处理下的每穗粒数与W5、W3、W2、W1处理的差幅分别为:2.04%、6.29%、14.29%、22.11%;W4处理下的百粒重与W5、W3、W2、W1处理的差幅分别为:1.71%、5.61%、6.70%、9.03%。以上分析表明,灌水定额过大对产量构成要素的影响并不明显,因此适宜的灌溉制度可以达到理想的产量构成要素而且可以节约灌溉用水。

表2 产量与产量构成要素之间的相关分析

| 百粒重 | 每穗粒数 | 秃尖长 | 穗长 | 穗位高 |
|-------|---------|--------|---------|---------|
| 0.631 | 0.969** | -0.078 | 0.884** | 0.822** |

注: *表示显著性水平达0.05, **表示显著水平达0.01。

表3 不同灌水定额处理下滴灌玉米产量构成要素指标

| 试验处理 | 穗长/cm | 每穗粒数 | 百粒重/g | 穗位高/cm | 秃尖长/cm |
|------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| W1 | 15.56 ± 0.13e | 458 ± 7.50c | 29.20 ± 0.80b | 74.4 ± 1.34c | 2.00 ± 0.15c |
| W2 | 16.56 ± 0.11d | 504 ± 12.00b | 29.95 ± 0.75ab | 79.4 ± 1.00b | 1.61 ± 0.20b |
| W3 | 17.31b ± 0.21c | 551 ± 3.31ab | 30.30 ± 0.50ab | 87.6 ± 0.20a | 0.87 ± 0.19a |
| W4 | 18.24 ± 0.02a | 588 ± 12.00a | 32.10 ± 0.90a | 88.1 ± 0.30a | 0.80 ± 0.08a |
| W5 | 17.86 ± 0.01ab | 576 ± 12.50a | 31.55 ± 0.05ab | 86.5 ± 0.10a | 0.77 ± 0.08a |

注:数值后不同小写字母a、b、c表示处理间在0.05水平差异显著,下表同。

3.4 不同灌水处理对玉米产量及水分利用效率的影响

表4分析了不同灌水定额间产量、耗水量和水分利用效率的差异性。由表4可知,W4处理产量达到最高,为14134.04 kg/hm²。W4处理的产量与W1、W2、W3、W5差幅分别为44.89%、32.47%、9.54%、2.18%。经LSD法分析表明,产量在W3、W4、W5灌水水平下差异不显著,它们分别与W1、W2灌水水平差异显著。说明在玉米生长过程中水分短缺将抑制玉米产量的增长。

经LSD法分析表明,耗水量在W4、W5灌水水平下无显著差异,与其他灌水水平差异显著。说明灌水定额小于W4处理时,满足不了玉米的需水量,水分亏缺将制约玉米的产量。当灌水定额为W4处理时,基本上已经满足玉米的需水量,增加灌水定额不仅会造成水资源浪费,而且最终产量出现下降的趋势。

水分利用效率在W1、W2灌水水平下与其他处理差异显著,在W4处理利用效率最优,为34.00 kg/(hm²·mm)。与W4相比,W3、W5处理的水分

利用效率分别下降了3.00%、5.96%。随着灌水定额的增加,水分利用效率和产量均出现下降的趋势,

说明适宜的灌溉制度在满足玉米耗水量的同时既可达到高产又可以提高水分利用效率。

表4 不同处理对玉米产量、耗水量及水分利用效率的影响

| 试验处理 | 实际产量/(kg·hm ⁻²) | 全生育期耗水量/mm | 水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹) |
|------|-----------------------------|----------------|---|
| W1 | 7789.16 ± 190.76b | 303.71 ± 3.79d | 25.64 ± 0.31c |
| W2 | 9544.27 ± 184.37b | 331.78 ± 4.72c | 28.90 ± 0.84b |
| W3 | 12785.37 ± 87.48a | 389.26 ± 0.31b | 32.84 ± 0.25ab |
| W4 | 14134.04 ± 132.59a | 415.64 ± 1.85a | 34.00 ± 0.56a |
| W5 | 13826.27 ± 167.86a | 430.86 ± 0.57a | 32.08 ± 1.30ab |

4 结 论

(1)研究表明,在所研究地区的土壤气候条件下,玉米生长速率最快的阶段出现在喇叭口期至抽雄散粉期,在该时段应加强水分管理。当灌水定额小于525 m³/hm²时,因水分亏缺,将抑制玉米株高、叶面积增长,在一定程度上增加了玉米的营养生长时间,推迟了玉米的受精与籽粒的发育,从而影响最终的产量。当灌水定额大于525 m³/hm²时,不仅促进玉米的生长而且有利于玉米籽粒的发育与干物质的积累,为后期高产奠定基础。

(2)经LSD法分析表明,尽可能地减小秃尖长,增加果穗的粒数、长度与高度将达到较理想的产量构成,为最终产量提供保障。但水分短缺将导致玉米果穗长度与粒数减少且秃尖长增加,对百粒重影响不明显。可能是因为每穗粒数的减少导致每个籽粒的灌浆得到保障,因此处理间百粒重无明显差异。而且在喇叭口期至乳熟期干旱对产量构成影响最严重,应在该时期加强水分管理,避免水分亏缺,与黄晓俊等^[25]的研究结果一致。因此适宜的灌溉制度将减小秃尖长,增加果穗的粒数、长度与高度得到理想的产量构成。

(3)灌水定额增加相同的梯度时,与耗水量呈线性变化,但与产量呈单峰曲线变化。这将导致水分利用效率呈单峰曲线变化。因此产量达到峰值时,水分利用效率也将达到峰值。灌水定额525 m³/hm²时,产量达到最大。为了使经济效益最大化,W4处理(即灌水定额525 m³/hm²)是最有利于阿勒泰地区节水增产的灌溉制度。该试验结果可为阿勒泰地区膜下滴灌玉米制定最优的灌溉制度提供合理的理论依据。

参考文献:

[1] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用

评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6):104-108.

[2] 钱正安,吴统文,宋敏红,等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展, 2001(1): 28-38.

[3] 张江辉,白云岗,张胜江,等. 新疆农业高效节水技术发展现状与重点研究的问题[J]. 新疆水利, 2010(1):33-39.

[4] GIACOMONI M H, KANTA L, ZECHMAN E M. Complex adaptive systems approach to simulate the sustainability of water resources and urbanization[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2013, 139(5):554-564.

[5] 贾嶸,沈冰. 水资源可持续开发利用与管理研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 85-89.

[6] 李真朴,刘学军,翟汝伟,等. 宁夏半干旱区玉米滴灌灌溉制度试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):242-246.

[7] 董宝娣,张正斌,刘孟雨,等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9):27-33.

[8] 段爱旺,张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4):41-44.

[9] 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11):60-67.

[10] 周伟,徐宝山. 不同水分处理对玉米生理生长指标及产量的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 2016, 52(3):11-14.

[11] 牛晓丽,胡田田,刘亭亭,等. 适度局部水分胁迫提高玉米根系吸水能力[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 80-86.

[12] 李蔚新,王忠波,张忠学,等. 膜下滴灌条件下玉米灌溉制度试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1):196-200.

[13] 唐光木,何红,杨金钰,等. 灌溉定额对膜下滴灌玉米生理性状及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):293-297.

[14] 赵楠,黄兴法,任夏楠,等. 宁夏引黄灌区膜下滴灌春

- 玉米需水规律试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 31-34.
- [15] 蔡焕杰, 康绍忠. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [16] EL-HENDAWY S E, EL-LATTIEF E A A, AHMED M S, et al. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 836-844.
- [17] 江水艳. 浅谈阿勒泰地区节水灌溉可持续发展[J]. 新疆水利, 2009(6): 17-18+23.
- [18] 李余良, 郑锦荣, 胡建广, 等. 水分胁迫对甜玉米主要农艺性状及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 217-221.
- [19] 王小燕, 褚鹏飞, 于振文. 水氮互作对小麦土壤硝态氮运移及水、氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 992-1002.
- [20] 刘浩, 孙景生, 张寄阳, 等. 耕作方式和水分处理对棉花生产及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 164-168.
- [21] 宫亮, 孙文涛, 隗英华, 等. 补充灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2017(1): 9-11+15.
- [22] 柴孟竹, 李钊, 秦东玲, 等. 乙烯利对玉米茎秆抗倒伏性的调控效应[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 63-72.
- [23] 李凯, 张晓祥, 管中荣, 等. 玉米株高和穗位高的全基因组关联分析[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 1-7.
- [24] 张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 水分胁迫对玉米生长发育及产量形成的影响研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 68-72.
- [25] 黄晓俊, 于飞, 敖芹. 干旱对玉米生长及产量影响的试验研究[J]. 贵州气象, 2012, 36(6): 25-28.

(上接第248页)

- [5] 王旭, 高翔, 曹蕾, 等. 水足迹视角下的宁夏中卫市农业水资源利用评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 619-624.
- [6] 代稳, 张美竹, 秦趣, 等. 六盘水市水资源安全的水足迹分析[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(5): 38-42.
- [7] 徐梦珂, 陈星, 王好芳, 等. 青岛市水生态文明建设评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 109-114.
- [8] 孙世坤, 刘文艳, 刘静, 等. 河套灌区春小麦生产水足迹影响因子敏感性及其贡献率分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2751-2762.
- [9] 赵慧, 潘志华, 韩国琳, 等. 气候变化背景下武川主要作物生产水足迹变化分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 406-416.
- [10] 张丽琼, 赵雪雁, 郭芳, 等. 黑河中游不同生计方式农户的水足迹分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 356-362.
- [11] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 1020-1025.
- [12] 段青松, 何丙辉, 字淑慧, 等. 两种玉米的生产水足迹研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 78-82.
- [13] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003-2011年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1133-1141.
- [14] 徐长春, 黄晶, Ridoutt B G, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 873-880.
- [15] 胡婷婷, 黄凯, 金竹静, 等. 滇池流域主要农业产品水足迹空间格局及其环境影响测度[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3719-3729.
- [16] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较——基于“总量-相关指标-结构”分析框架[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 76-87.
- [17] ZHAO Chunfu, CHEN Bin, HAYAT T, et al. Driving force analysis of water footprint change based on extended STIRPAT model: Evidence from the Chinese agricultural sector[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 43-49.