

## 膜下滴灌条件下温室青椒的水氮耦合效应

程明瀚<sup>1,2,3</sup>, 郝仲勇<sup>1,3\*</sup>, 杨胜利<sup>1,3</sup>, 缴锡云<sup>2</sup>, 范海燕<sup>1,3</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;

3. 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048)

**摘要:**【目的】通过不同灌水量和施氮量的耦合来探寻温室青椒的水肥耦合效应。【方法】试验设置了W1(70%  $\theta_{fc}$  (田间持水率))、W2(80%  $\theta_{fc}$ ) 2组灌水下限处理和F1(50 kg/hm<sup>2</sup>)、F2(85 kg/hm<sup>2</sup>)、F3(120 kg/hm<sup>2</sup>) 3组施氮处理, 并设置常规灌水施肥处理作对照, 共计7个处理, 监测了青椒株高、茎粗、叶面积指数等生长指标, 净光合速率、蒸腾强度等生理指标, 以及总产量、水分生产效率、氮肥偏生产力和相关品质指标。【结果】在120 kg/hm<sup>2</sup>施氮量处理下青椒的产量明显高于其他处理。运用主成分分析法各水肥处理下的10项指标进行降维, 并通过降维所得的3个主成分对7组处理综合评价, 发现7组处理高低排序为:W1F3处理>W2F3处理>CK>W2F2处理>W1F1处理>W1F2处理>W2F1处理。【结论】在70%  $\theta_{fc}$ 的灌水下限和120 kg/hm<sup>2</sup>施氮量的组合处理是本试验所探寻的最优水肥处理。

**关键词:**水氮耦合; 总产量; 水分生产效率; 主成分分析

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20170004

程明瀚, 郝仲勇, 杨胜利, 等. 膜下滴灌条件下温室青椒的水氮耦合效应[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 50-56, 68.

### 0 引言

水肥耦合效应机理的研究与应用, 对提高农业生产力、提高水肥利用效率以及改善农业土壤环境具有重大意义。相对于传统水肥独立作用于田间的方式, 水肥协同耦合能促进肥料的扩散与吸收, 也能提高土壤的保墒性能<sup>[1]</sup>。不同的水肥管理制度对作物的产量、品质、生长指标以及土壤环境的影响都具有显著的差别<sup>[2-5]</sup>, 合理的水肥制度能提高水肥利用率<sup>[6-7]</sup>。

氮肥是影响作物生长与土壤环境的主要因素之一, 也是温室气体的主要来源, 我国目前水肥管理制度还不够完善, 没有一个全面系统的合理灌溉施肥制度做指导, 既浪费资源, 又破坏土壤环境。根据中国氮肥协会数据统计, 我国2016年氮肥产量已经达到4 458万t, 但氮肥生产力相较发达国家依然偏低, 氮肥的利用效率还亟待提高。据水利部水资源公报显示, 2016年我国农业用水量占总用水量的62.4%, 而灌溉水利用系数仅为0.536。水肥是农业生产的2大重要可控因子, 是提高我国农业生产的关键。

青椒在国内适应性比较强, 大部分地区都有种植, 果型大, 产量高, 是我国栽培的主要蔬菜之一。前人研究不同肥料<sup>[8-10]</sup>、不同灌溉方式<sup>[11]</sup>以及不同灌水量<sup>[12]</sup>对青椒生长的影响, 但针对青椒对水肥耦合作用的响应研究较少。兹通过对温室青椒进行试验, 探讨分析不同灌水量与施氮量的耦合效应, 进而对水肥合理调控提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验区概况

试验于2017年2月在北京市灌溉试验中心站(北纬39°20'、东经116°20')5号温室内进行, 该地多年平均降水量为565 mm, 多年平均水面蒸发量为1 140 mm, 多年平均气温为11.5 °C。温室内土壤为壤土, 种植前

收稿日期:2017-11-29

基金项目:北京市百千万人才工程资助项目(KY-2016-01); 科技部项目京津冀耗水管理与资源节水技术研发示范(2016YFC0401403);

北京市科技计划项目都市农业用水监测评价和管理平台研究与示范(D151100004115004)

作者简介:程明瀚(1994-), 男, 安徽安庆人。硕士研究生, 主要从事农业水土方面的研究工作。

通信作者:郝仲勇(1972-), 男, 天津宁河人。教授级高工, 主要从事农业水土方面的研究工作。

测定土壤硝态氮质量分数为37.55 mg/kg, 铵态氮质量分数为50.72 mg/kg, pH值为7.78。土壤田间持水率(体积含水率)为30%, 表层20 cm土壤体积质量为1.36 g/cm<sup>3</sup>, 20~40 cm土层土壤体积质量为1.62 g/cm<sup>3</sup>。

## 1.2 试验设计

供试青椒为甜椒F1杂交, 采用穴播育苗、幼苗移栽, 灌溉方式为膜下滴灌, 于2017年2月26日移植, 2017年6月20日拉秧, 4月中旬开始结果, 根据实际生长情况约2~3周采摘1次。试验共设置灌水下限和施氮量2个因素详见表1。灌水下限共设置2个水平, W1(70%  $\theta_{fc}$ )、W2(80%  $\theta_{fc}$ ); 种植前施基肥, 分别施有机肥(鸡粪, 含氮量2.14%)4 000 kg/hm<sup>2</sup>和复合肥(金正大, 含氮量为21%)1 000 kg/hm<sup>2</sup>, 幼苗期不做处理, 借鉴前人的研究成果设置了3组施氮量处理<sup>[2,13]</sup>, F1(50 kg/hm<sup>2</sup>)、F2(85 kg/hm<sup>2</sup>)、F3(120 kg/hm<sup>2</sup>), 氮肥平均分为2次追施, 分别在开花期(4月上旬)和盛果期(5月中旬), 通过尿素(含氮量46%)施放。每个处理设置1个小区, 小区尺寸为6.8 m×5.2 m, 每区辖四垄, 垄的断面尺寸见图1。每垄种植2行, 每行13株, 滴灌带设置为1带1行, 植株株距40 cm, 同一垄行距为35 cm, 相邻垄行距为95 cm, 为宽窄行种植。每个小区都有独立的支管灌水控制单元, 设有水表、闸阀、压力表。灌溉方式为膜下滴灌, 覆膜为全覆盖种植, 滴头间距30 cm, 为内镶式压力补偿滴头, 额定工作压力0.1 MPa, 设计流量1.38 L/h。施肥方式为随水施入, 灌溉水源为地下水, 灌水量由机械水表控制。

表1 试验处理设置

处理	灌水上下限	施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
W1F1	70% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	50
W1F2	70% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	85
W1F3	70% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	120
W2F1	80% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	50
W2F2	80% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	85
W2F3	80% $\theta_{fc}$ ~100% $\theta_{fc}$	120
CK	按当地农户灌水、施肥经验(灌水量约27~30 mm/周、施氮量85 kg/hm <sup>2</sup> )	

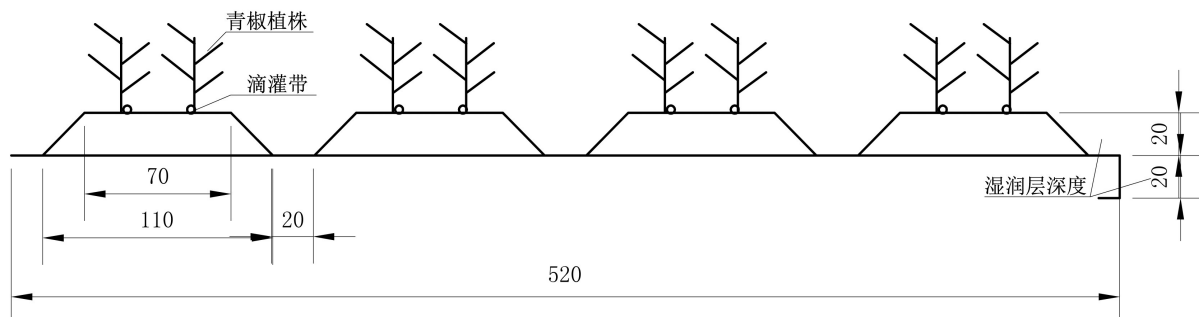


图1 种植小区横断面尺寸图(单位:cm)

## 1.3 观测项目与方法

### 1.3.1 设备监测指标

1)土壤含水率:采用 minitraser 土壤水分测量仪测定各小区土壤体积含水率, 每20 cm为1层, 自地表至地下60 cm深处, 每周测定3次, 灌水前后加测。

2)生长指标:每区选中间2垄, 每垄选取长势平均的植株3株, 利用直尺测定青椒植株的株高; 游标卡尺测定植株的茎粗, 采用十字交叉法量取青椒基部茎秆直径, 测量部位始终位于茎秆基部第3节间处。利用直尺测量青椒植株的叶长叶宽, 利用公式推算叶面积指数。

3)生理指标:采用 Li6400 光合作用仪测定净光合速率、蒸腾速率。测定日期为2017年5月15日, 该日为日照强度较高的典型日, 进行全天的跟踪监测, 此时处于青椒盛果期。测量部位选取植株冠层完全展开的叶片。

4)产量:果实成熟后, 每次采摘按不同小区(各垄单独计数)记录果实产量, 每垄果实数量, 拉秧后计算总产量。

5)品质指标:测定各处理青椒的典型品质指标。通过 Thermo 紫外/可见分光光度计测定可溶性糖质量分数; 通过折射仪测定可溶性固形物质量分数; 通过养分测定仪(OK-Q)测定硝态氮质量分数; 通过烘干称质量法测定土壤含水率。每个处理3个重复, 分别在盛果期和尾果期各测定1次。

### 1.3.2 公式换算指标

#### 1) 耗水量

通过水量平衡法计算青椒的耗水量,其计算式为:

$$ET=P+I+R-D-\Delta W, \quad (1)$$

式中: $\Delta W$ 为土壤储水量变化量(mm); $P$ 为有效降水量(mm); $I$ 为农田灌溉量(mm); $R$ 为地表径流(mm); $D$ 为深层渗漏(mm); $ET$ 为蒸腾蒸发量(mm)。

青椒为温室种植,降水量为0,不产生径流,深层渗漏可忽略不计,故青椒的耗水量计算可简化为:

$$ET=I-\Delta W. \quad (2)$$

#### 2) 叶面积指数计算式为:

$$LAI=\Sigma(0.75l \cdot h)/(a \cdot b), \quad (3)$$

式中: $LAI$ 为叶面积指数,无量纲; $l$ 、 $h$ 为叶长、叶宽(cm); $a$ 、 $b$ 为行距和株距,分别取65、40 cm。

#### 3) 水分生产效率计算式为:

$$YUE=Y/(10ET), \quad (4)$$

式中, $YUE$ 为水分生产效率( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $Y$ 为产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

#### 4) 氮肥偏生产力计算式为:

$$WUE=Y/M, \quad (5)$$

式中: $WUE$ 为氮肥偏生产力( $\text{kg}/\text{kg}$ ); $M$ 为施氮量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 形态指标

图2、图3分别为青椒全生育期的株高、茎粗的变化过程。W1处理下的株高大于W2处理。W1处理平均株高为72.11 cm, W2处理为69.72 cm; W1处理下的平均茎粗为14.41 mm, W2处理为14.49 mm,二者差距不大。低灌水下限虽然会使土壤含水率处在较低的水平,但并不会抑制作物的生长<sup>[14]</sup>。从图2可以看出,在W1处理下,追肥前青椒株高的平均生长速度为0.571 cm/d, 3月末进行追肥,各处理株高生长速度明显提高,达到1.092 cm/d。在W2处理下,这2个数值分别为0.699、0.984 cm/d。这也反映了施肥对作物株高生长具有明显的促进作用。茎粗也呈现相同的规律,在W1处理下,追肥前茎粗的生长速度为0.161 mm/d,追肥后至生长趋于稳定时,生长速度达到0.27 mm/d。W2处理下追肥前后茎粗生长速度分别为0.173、0.238 mm/d。茎粗的大小影响着植株的耗水量<sup>[15]</sup>,是根系向冠层运输水分的通道,这也说明了水肥的耦合对作物的生长形态存在影响。

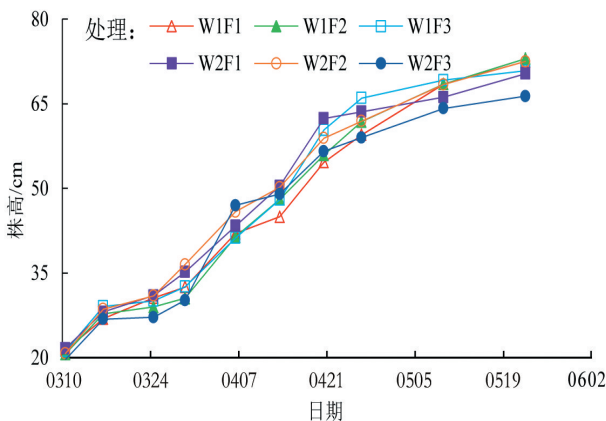


图2 青椒生育期株高变化过程

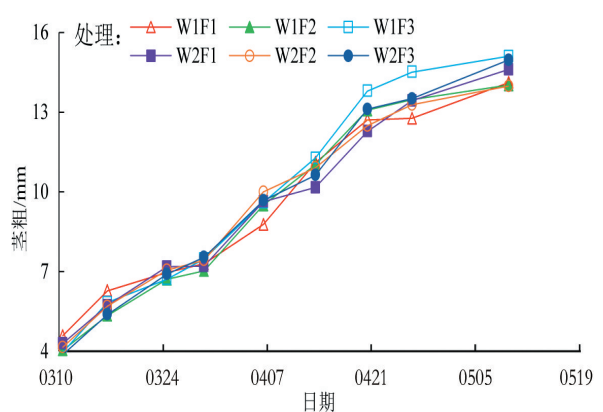


图3 青椒生育期茎粗变化过程

低灌水下限条件下株高、茎粗在追肥前后的生长速度增量高于高灌水下限条件下的,追肥前,W1处理株高、茎粗的生长速度低于W2处理,而追肥使得W1处理的生长速度超过了W2处理,这说明低灌水下限下作物生长对氮肥的响应更为明显。

叶面积指数是指单位面积上植物叶面积的总和<sup>[16]</sup>。图4为青椒全生育期叶面积指数变化过程,由图4可知,各处理作物的叶面积指数增长趋势基本一致,呈现前期长势快,后期变缓。W1F3处理在追肥后生长速

度增加最明显,之后涨幅逐渐变缓,该处理下青椒的生长对氮肥的反应最明显。W2F2处理下对氮肥响应最差。W2F1处理在生育期末的叶面积指数明显大于其他处理。

## 2.2 光合指标

光合指标的监测结果如图5和图6所示。从图5可以看出,各处理下的净光合速率变化趋势一致,在11:00,植株的净光合速率达到最大值;在07:00和17:00植株的净光合速率较小。各处理日平均净光合速率以W2F3处理最大( $P < 0.05$ )。

从图5可以看出,青椒蒸腾速率整体变化趋势一致,在13:00达到最大。但各处理间变化趋势有所差异,W2F3处理全天蒸腾速率明显高于其他处理( $P < 0.05$ ),13:00蒸腾速率达到 $12.17 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。经方差分析,W2F3处理的日平均蒸腾速率显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。本试验采取膜下滴灌的方式,株间蒸发较小,整体灌水量较小,深层渗漏可忽略不计,温室种植不考虑降雨和径流,故植株蒸腾是作物的主要耗水项,各处理的蒸腾速率也从一定程度上反映了植株的耗水规律<sup>[17]</sup>。

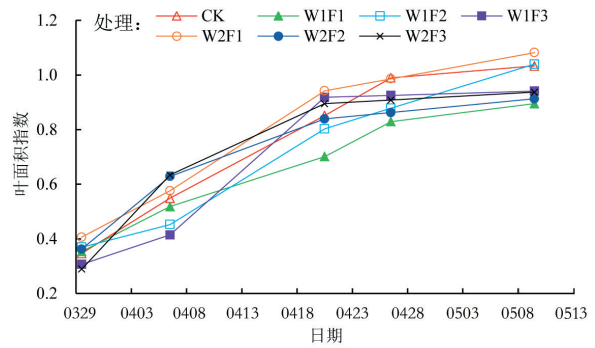


图4 青椒生育期叶面积指数变化过程

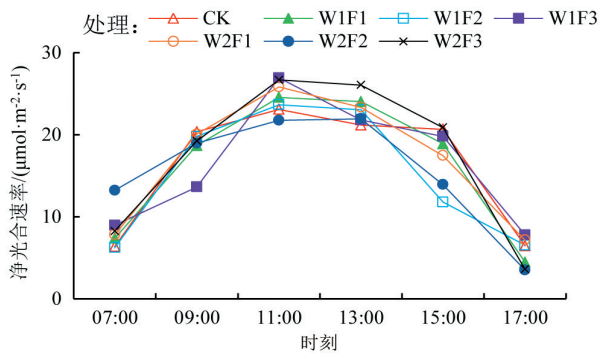


图5 青椒典型日净光合速率变化趋势

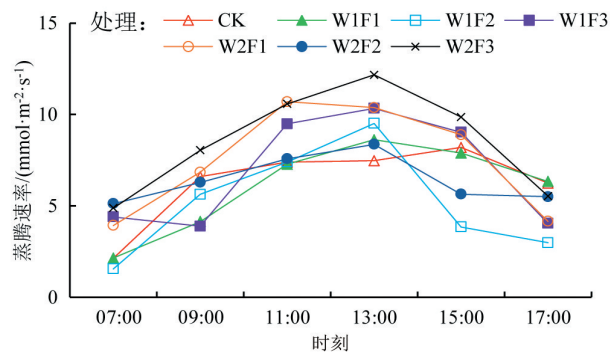


图6 青椒典型日蒸腾速率变化趋势

图7、图8分别为净光合速率、蒸腾速率与土壤含水率的散点图。从图7、图8可以看出,青椒的净光合速率、蒸腾速率与含水率呈现明显的正相关关系,并通过SPSS进行皮尔逊相关性分析,净光合速率与土壤含水率的决定系数达到0.817,蒸腾速率与土壤含水率的决定系数达到0.876,都呈现极显著的正相关关系。对比不同灌水下限青椒的蒸腾速率得出,W2处理下的蒸腾速率要高于W1处理,这是由于高灌水下限的处理使得土壤水分维持在一个较高的水平,土壤含水率越高,土壤与大气间的水势差越大,植株作为SPAC系统中一环,也起到土壤与大气水分转移的媒介作用,蒸腾速率也因此更高。W1F3处理下的光合速率高于平均水平,这可能是由于在高施氮量水平下能提升土壤的保墒性能,使得W1F3处理的土壤水分较高。

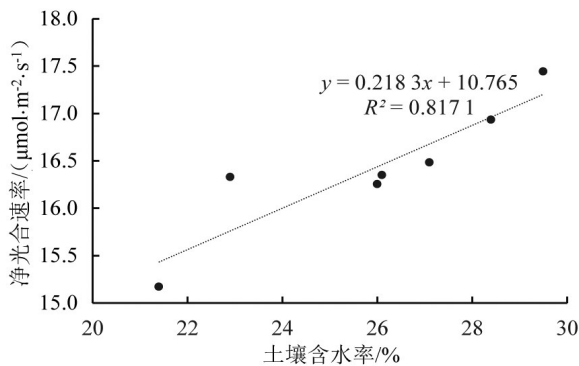


图7 典型日各处理平均净光合速率

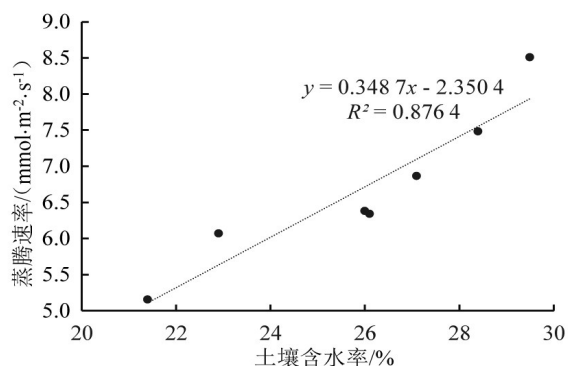


图8 典型日各处理平均蒸腾速率

## 2.3 青椒耗水规律

图9为各处理青椒日均耗水量。从图9可以看出,各处理日均耗水量都呈现出先增后降的趋势,耗水强度多在盛果期达到峰值。W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2、W2F3处理全生育期内累计耗水量分别为

288.47、238.87、328.21、344.25、256.78、376.36 mm,CK全生育期耗水量为325.64 mm。低施氮量、中施氮量、高施氮量下高灌水下限的耗水量比低灌水下限的耗水量分别多了39.74、17.91、32.11 mm。对比高、低灌水下限不同施氮量对青椒耗水量的影响,都呈现高施氮量>低施氮量>中施氮量。

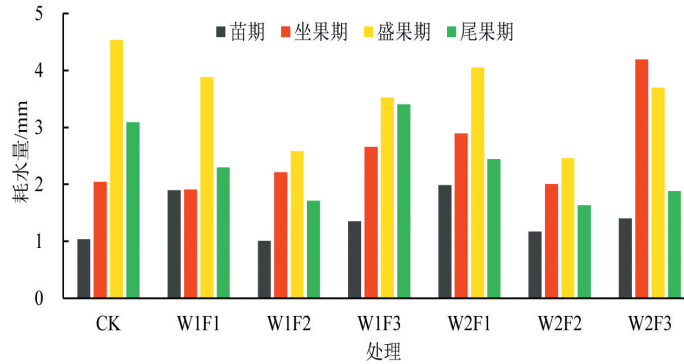


图9 各生育期日均耗水量对比

## 2.4 品质指标

可溶性糖和可溶性固形物是影响青椒口感与营养价值的重要指标。各处理青椒产量与品质分析结果见表2。各处理下可溶性糖的质量分数在3.35%~4.01%之间,但各处理间差距不显著( $P<0.05$ );可溶性固形物质量分数最高为W1F1处理(4.97%),最低为W2F3处理(4.41%),二者存在显著性差异( $P<0.05$ )。硝态氮是评价青椒果实安全的重要指标,各处理间硝态氮质量分数无显著差异,且都在安全标准之内。各处理青椒果实的含水率也无显著差异。

表2 不同处理下青椒产量与品质指标对比

处理	可溶性糖质量分数/%	可溶性固形物质量分数/%	硝态氮质量分数/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	含水率/%
CK	4.01±1.33 a	4.69±0.21 abc	53.25±3.61 a	89.70±2.92 a
W1F1	3.78±0.53 a	4.97±0.33 a	61.08±4.82 a	91.19±2.78 a
W1F2	3.92±0.63 a	4.92±0.31 ab	56.74±6.36 a	91.46±1.79 a
W1F3	3.48±0.27 a	4.58±0.19 abc	56.36±2.46 a	91.28±2.67 a
W2F1	3.62±0.37 a	4.65±0.21 abc	51.70±2.13 a	87.15±9.22 a
W2F2	3.42±0.3 a	4.48±0.36 bc	47.18±2.29 a	90.07±5.47 a
W2F3	3.35±0.26 a	4.41±0.43 c	48.60±7.49 a	91.14±2.35 a

注 表中数值为平均值±标准差,相同字母表示在同一显著性水平下( $P<0.05$ )无显著差异。

W1处理下的青椒果实可溶性糖质量分数和可溶性固形物质量分数高于W2处理,低灌水下限并没有造成作物大量减产,反而增加了部分干物质的积累<sup>[18]</sup>。而高灌水下限则降低了果实中硝态氮质量分数,这可能是因为高灌水下限的处理使得土壤水分维持在较高的水平,降低了硝态氮,从而降低果实硝态氮的过分累积。

## 2.5 各处理产量对比

从表3可见,W1F3、W2F3处理的产量分别为64.89、64.93  $\text{t}/\text{hm}^2$ ,明显高于其他处理,单果质量也是这2个处理最大。在低灌水下限条件下,青椒的产量随施氮量呈增长趋势,而在高灌水下限条件下,产量与施氮量并没有明显的正相关关系,在适当的灌水条件下,追施氮肥能最大化氮肥的增产效益。经相关性分析,产量与灌水量相关系数为0.909,存在较为明显的正相关关系。

表3 不同处理下青椒各产量指标对比

处理	单果质量/g	总计质量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	水分生产效率/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	氮肥偏生产力/( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
CK	101.38±13.0 ab	51.71±2.63 abc	15.88±3.24 bc	134.29±6.84 cd
W1F1	91.36±5.3 bc	42.12±0.54 c	14.6±0.75 b	120.33±1.55 c
W1F2	82.28±5.2 b	46.84±2 bc	19.61±3.37 ab	121.66±5.22 cd
W1F3	105.16±6.4 a	64.89±2.18 a	21.93±2.67 a	154±5.21 b
W2F1	100.31±3.6 ab	62.42±1.07 a	18.13±1.24 abc	178.32±3.05 a
W2F2	101.18±5.6 ab	56.93±1.55 ab	22.13±2.45 a	147.88±4.08 c
W2F3	105.27±6.4 a	64.93±2.02 a	17.26±2.15 bc	154.6±4.83 b

注 表中数值为平均值±标准差,相同字母表示在同一显著性水平下( $P<0.05$ )无显著差异。

利用MATLAB构建的青椒产量与灌水量、施氮量的关系曲面,如图10所示。由图10可知,产量在灌水量和施氮量因素上都存在极值,当灌水量为520 mm、施氮量为104 kg/hm<sup>2</sup>时,产量达到极大值70.08 t/hm<sup>2</sup>,灌水量接近边界值,当灌水量和施氮量超过该值时,产量会呈现下降的趋势。W1F3、W2F2处理下水分生产效率明显高于其他处理,且在低灌水下限处理下的水分生产效率表现为F3处理>F2处理>F1处理。W2F1处理的氮肥偏生产力最大,这是因为W2F1处理下高灌水量在一定程度上弥补了低氮量对青椒增产效益的不足,使产量达到一个较高水平,其次W1F3、W2F3处理的产量具有明显优势使得其氮肥偏生产力处于较高水平。

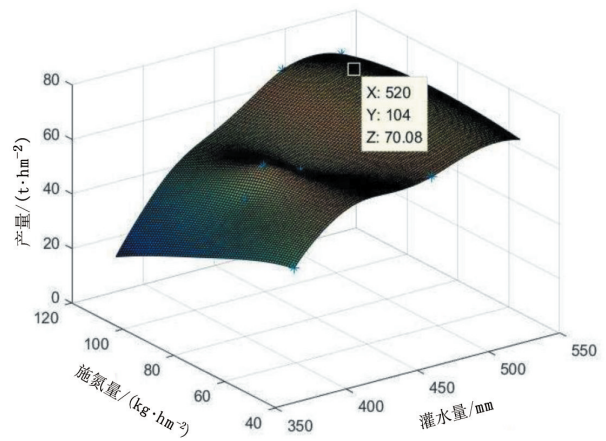


图10 青椒产量与灌水施氮量关系

### 2.6 利用主成分分析法对灌溉制度综合评价

选取青椒的产量、单果质量、水分生产效率、氮肥偏生产力、可溶性糖量、可溶性固形物量、果实含水率、植株株高、茎粗和叶面积指数等10项青椒主要生长指标。通过对各指标标准化处理、构建相关系数矩阵、进行主成分分析,通过选取累积贡献率达到80%以上且特征值大于1的前3个成分作为主成分,这3个主成分信息即可替代其他指标信息,主成分分析结果见表4。

表4 主成分贡献率及累计贡献率

成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.702	42.743	42.743
2	2.402	21.841	64.584
3	1.704	15.495	80.079

主成分分析公式<sup>[9]</sup>为:

$$Z_k = r_{k1}X_1 + r_{k2}X_2 + \dots + r_{kn}X_n, \quad (6)$$

式中: $r_{ki}$ 、 $X_i$ 分别表示第 $k$ 个主成分下第 $i$ 个特征向量及其对应的标准化数据,通过式(6)即可得到3个主成分和各指标的线性组合。

$$Z = Z_1 F_1 + Z_2 F_2 + Z_3 F_3, \quad (7)$$

式中: $F_k$ 表示第 $k$ 各主成分的贡献率,代入数据到式(7)得出各处理下的综合评分(表5),可以看出W1F3处理>W2F3处理>CK>W2F2处理>W1F1处理>W1F2处理>W2F1处理,综合来看,W1F3处理的各项指标最优,此时灌水量为499 mm,施氮量为120 kg/hm<sup>2</sup>,与前文模型曲面所得的结论接近。从主成分分析评分上来看,W2处理较W1处理的各项指标并没有明显的优势,即低灌水下限处理不仅不会抑制作物的生长,反而提高了水分利用效率;F3处理相较于F1、F2处理有明显优势,即120 kg/hm<sup>2</sup>施氮量是温室青椒生长较为合适的追肥量。

表5 不同处理下青椒各项指标综合评价

处理	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z$	排名
CK	0.30	-0.28	0.97	0.12	3
W1F1	-0.25	0.29	0.34	0.01	5
W1F2	0.02	0.02	-0.93	-0.13	6
W1F3	0.50	0.91	0.66	0.52	1
W2F1	-1.22	-1.16	-0.50	-0.85	7
W2F2	0.37	-0.25	-0.06	0.09	4
W2F3	0.29	0.46	-0.48	0.15	2

## 3 讨论与结论

1)低灌水下限时水氮的耦合作用更佳。在W1处理下,施氮更能促进青椒株高、茎粗、叶面积等生长,青椒枝干作为根系向冠层运输水分的通道,茎粗大小能影响青椒的耗水量大小。叶面积指数的大小能反映

冠层茂密程度,高植被覆盖能够降低土壤的温度,减少株间的蒸发,增强土壤的保墒性能<sup>[1]</sup>。但叶面积指数过高,会导致作物下部光照不足,抑制了作物的光合作用。青椒的光合指标还与土壤含水率呈明显的正相关关系。这是由于土壤含水率越高,土壤与大气间的水势差越大,导致蒸腾速率加快。

2)水氮之间的耦合在数量上具有一定的互补关系。试验结果表明,不同灌水下限处理,耗水量均表现为F3处理>F1处理>F2处理,说明F2处理的土壤养分环境较优,适当的土壤环境有利于提高土壤的保墒性能<sup>[20,21]</sup>,从而降低了作物耗水,且F2处理的水分生产效率也处于较高的水平,W2F2处理的水分生产效率为各处理中最高,施肥可以改善作物水分状况,提高作物水分生产效率,但施肥不当或过度时,会降低水分生产效率<sup>[3]</sup>。W2F1处理的氮肥偏生产力最大,穆兴民<sup>[22]</sup>提出,水肥协同耦合是指某因子数量上的不足可以从另一个因子上得到补充,从而减小了作物有该因子不足所造成的减产,这解释了低施氮量、高灌水下限的W2F1处理产量依然能达到一个较高的水平,因此氮肥偏生产力较高。

3)通过主成分分析法对各处理进行综合分析,W1F3处理为最优处理。F3处理下的产量高于F1、F2处理,与孔清华等<sup>[2]</sup>与戚智尧等<sup>[13]</sup>研究结果接近。水肥耦合对作物生长的影响存在阈值反应,低于阈值,增加水肥投入对作物增产明显,而超过阈值,增产作用减小甚至造成减产<sup>[23]</sup>。通过构建青椒产量与灌水施氮量的三维关系曲面得出,青椒的水肥阈值约为520 mm灌水量和104 kg/hm<sup>2</sup>的施氮量。灌水量较小、施氮量较大时会严重影响青椒的产量,这是由于灌水量小不利于氮在土壤中扩散,而氮在土壤中过分残留也抑制了青椒根系对水分的吸收<sup>[24]</sup>。高艳明等<sup>[25]</sup>提出,灌水对青椒的增产效应大于施肥,本研究也发现产量在灌水量的变化幅度也明显大于施氮量。

#### 参考文献:

- [1] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(3):385-388.
- [2] 孔清华, 李光永, 王永红, 等. 不同施肥条件和滴灌方式对青椒生长的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):21-25.
- [3] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21):70-80.
- [4] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10):82-90.
- [5] 高丽, 李红岭, 王铁臣, 等. 水氮耦合对日光温室黄瓜根系生长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):58-64.
- [6] 王巧仙, 张江红, 张玉星. 水肥耦合对梨园土壤养分和果实品质的影响[J]. 中国果树, 2013(4):18-23.
- [7] 滕霄, 李波, 王铁良, 等. 膜下滴灌水肥耦合效应对青椒产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2015(2):74-77.
- [8] 贯立茹, 张成军, 刘佳伟, 等. 氮肥施用量对温室彩椒产量及土壤硝酸盐含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2011, 1(22/24):104-107.
- [9] 高树涛, 黄玲, 赵凯, 等. 磷肥不同用量对辣椒品质的影响[J]. 山东农业科学, 2009(1):82-83.
- [10] 任媛媛, 张恩让, 胡华群, 等. 钾素对辣椒生长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2007, 20(5):1 044-1 047.
- [11] 李波, 王铁良, 刘伽, 等. 不同灌溉方式下温室湿度变化及对青椒生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(4):45-47.
- [12] 李晶晶, 王铁良, 李波, 等. 日光温室滴灌条件下不同灌水下限对青椒生长的影响[J]. 节水灌溉, 2010(2):24-26.
- [13] 戚智尧, 王铁良. 膜下滴灌水肥耦合对青椒维生素C含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3):144-146.
- [14] 褚丽丽, 张忠学. 氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10):2 665-2 670.
- [15] 霍海霞, 牛文全, 汪有科, 等. 灌水控制上限对辣椒生长及耗水量的影响[J]. 节水灌溉, 2012(8):1-3.
- [16] 马艳华, 任秀娟, 杨慎骄, 等. 负压供水下水氮耦合对温室辣椒品质及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5):17-20.
- [17] 杨文斌, 郝仲勇, 王凤新, 等. 不同灌水下限对温室茼蒿生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):94-98.
- [18] 朱毅, 范希峰, 武菊英, 等. 水分胁迫对柳枝稷生长和生物质品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2):59-64.
- [19] 夏建国, 李廷轩, 邓良基, 等. 主成分分析法在耕地质量评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2000, 13(2):51-55.
- [20] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应对保护地土壤硝态氮运移的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(3):32-36.
- [21] THOMPSON T L, DOERGE T A, GODIN R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: II. Agronomic, economic, and environmental outcomes.[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1):406.
- [22] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理[M]. 北京:中国林业出版社, 1999:18-19,38.
- [23] 王新, 樊华, 崔静, 等. 不同施氮水平下加工番茄植株生长和氮素积累与利用率的动态模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4):1 043-1 050.
- [24] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(3):385-388.
- [25] 高艳明, 李建设, 田军仓. 日光温室滴灌辣椒水肥耦合效应研究[J]. 农业科学研究, 2000(3):39-45.

(下转第68页)

# Impact of Soil Amended with Different Materials on Phosphorus Leaching in Hetao Irrigation District

ZHAO Chunxiao, WEI Shuzhen, GAO Fanshen, GAO Wa, WANG Yingnan, ZHENG Haichun  
(Inner Mongolia Autonomous Region Soil Fertilizer and Water Saving Agricultural Workstation, Hohhot 010010, China)

**Abstract:**【Objective】 Soil amendment is a technique to improve soil productivity, and the objective of this paper is to study the change of phosphorus leaching in soil amended with different materials in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia Hetao. 【Method】 The experiment was conducted in a corn field in Hetao Irrigation District with soil amended by activated carbon, bentonite, biological fertilizer, organic fertilizer, granular polyacrylamide and polyacrylic acid potassium, and humic acid fertilizer, respectively. During the experiment, we measured the change in total phosphorus (TP) and soluble phosphorus (SP), and analyzed phosphorus leaching. 【Result】 Compared with conventional treatment, soil amended with bentonite, activated carbon, potassium polyacrylate, and polyacrylamide reduced the total soluble P by 24.76%, 21.32%, 18.36% and 17.31%, respectively; and the concentration of soluble P by 32.47%, 31.15%, 28.45% and 22.82% respectively. Compared with the conventional treatment, soil amended with biological fertilizer, humic acid and slow-released fertilizer did not have a noticeable impact on TP and SP concentration in soil water, while the soil amended with granular organic fertilizer increased phosphorus content in soil water. The phosphorus taken up by plant increased slowly with fertilizer application. Phosphorus was mainly found in the 0~40 cm soil, while below 40 cm the phosphorus content remained also unchanged. The fraction of soluble phosphorus in soil water was large, reaching 47.6% to 82.1% of TP in found soil water at an average of 67.8%. Soluble phosphorus was the main form of phosphorus in soil water. 【Conclusion】 The eight amending materials affect total phosphorus and soluble phosphorus differently, and compared with others, bentonite, activated carbon, potassium polyacrylate and polyacrylamide affected P more significantly after being amended with soil.

**Key words:** non-point source pollution; treatment measures; nutrient leaching; characteristic distribution

责任编辑:刘春成

(上接第56页)

# The Interactive Impact of Water and Nitrogen on Greenhouse Green Pepper Under Film-mulched Drip Irrigation

CHENG Minghan<sup>1,2,3</sup>, HAO Zhongyong<sup>1,3\*</sup>, YANG Shengli<sup>1,3</sup>, JIAO Xiyun<sup>2</sup>, FAN Haiyan<sup>1,3</sup>

(1. Beijing Water Science and Technology Research Institute, Beijing 100048, China; 2. Hohai University Water Conservancy and Hydropower College, Nanjing 210098, China; 3. Beijing Non-conventional Water Resources Development and Utilization and Water Saving Engineering Technology Research Center, Beijing 100048, China)

**Abstract:**【Objective】 Nitrogen fertilizer is one of important fertilizers for crop growth, and the purpose of this paper is to experimentally explore the interactive effects of water and nitrogen fertilizer on greenhouse pepper under different combined ratios of irrigation and nitrogen fertigation. 【Method】 We examined two irrigation rates: one at 70% of the field capacity (W1) and the other one at 80% of the field capacity (W2), and three nitrogen applications: 50 kg/hm<sup>2</sup> (F1), 85 kg/hm<sup>2</sup> (F2) and 120 kg/hm<sup>2</sup> (F3), with the combination of conventional irrigation and fertilization as control. Overall, there were seven treatments. In each treatment, we measured the plant height, stem diameter, leaf area index, net photosynthetic rate, transpiration rate, total yield, water use efficiency, and partial productivity of nitrogen fertilizer. 【Result】 The yield in nitrogen application of 120 kg/hm<sup>2</sup> was significantly higher than that in other treatments. The principal component analysis showed that the yield of pepper under the seven treatments was ranked in W1F3>W2F3>CK>W2F2>W1F1>W1F2>W2F1. 【Conclusion】 The combination of irrigation by keeping soil moisture at 70% of the field capacity and 120 kg/hm<sup>2</sup> of nitrogen application is the optimal irrigation and nitrogen fertilization for the greenhouse green peppers studied in this paper.

**Key words:** water-nitrogen coupling; total yield; water production efficiency; principal component analysis

责任编辑:赵宇龙