

# 基质栽培黄瓜生长、产量及品质对 不同灌水下限的响应

吕 剑,金 宁,郁继华,金 莉,张国斌,肖雪梅,胡琳莉

(甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**本试验以黄瓜品种“博特 209”为试材,采用基质盆栽,共设置 4 个灌水下限处理,分别为田间持水量的 50%(A)、60%(B)、70%(C)、80%(D),灌水上限统一设定为田间持水量的 90%,研究不同灌水下限对基质栽培黄瓜生长、产量和品质的影响,并运用主成分分析法对 4 个处理黄瓜的生长、产量及品质相关的 22 个指标进行了综合评价。结果表明:处理 D 的株高和叶面积显著高于处理 A、B 和 C,株高增幅分别为 56.50%、22.51%和 11.04%,叶面积增幅分别为 92.61%、61.35%和 27.87%;处理 C 的茎粗最大,相较于处理 A、B、D 分别增加了 28.36%、16.91%和 18.49%;单果重、单株果数、单株产量及灌水量均以处理 D 最大;水分利用率以处理 C 最高,相较于处理 A、B、D 分别增高了 33.14%、13.23%和 10.30%。处理 C 与处理 D 的瓜粗、含水量及商品瓜率无显著差异,但相对于处理 A 和 B 则分别显著增加了 19.17%和 10.81%、0.98%和 0.45%、66.70%和 18.21%。处理 C 的可溶性蛋白和可溶性糖含量显著高于其他处理,而硝酸盐含量显著低于其他处理;黄瓜果实中全 K 和全 Ca 含量以处理 C 最高,相较于处理 A、B 和 D,其全 K 和全 Ca 的增幅分别为 35.20%和 11.19%、3.81%和 11.19%、1.06%和 6.43%。经主成分分析及综合评价,4 个处理的得分从高到低依次为:处理 C、处理 D、处理 B、处理 A。

**关键词:**黄瓜;基质栽培;灌水下限;生长;品质;产量;水分利用效率

**中图分类号:**S642.2;S274.3 **文献标志码:**A

## Response of cucumber growth, yield and quality to different irrigation lower limits in substrate culture

LV Jian, JIN Ning, YU Jihua, JIN Li, ZHANG Guobin, XIAO Xuemei, HU Linli

(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** In this experiment, the cucumber variety, Bote 209, was used as test material, and four irrigation water limit treatments were set in potted medium. They were 50%, 60%, 70%, and 80% of field water holding capacity. The irrigation water limit was set to 90% of field water holding capacity by A, B, C, and D. The effects of different irrigation water limits on the growth, yield, and quality of cucumber under substrate cultivation were studied. In order to evaluate and select the suitable irrigation water limits for cucumber under substrate cultivation more scientifically and reasonably, the principal component analysis was used to evaluate 22 indexes related to the growth, yield and quality of cucumber under four treatments. The results showed that the plant height of treatment D was significantly higher than that of treatment A, B, and C by 56.50%, 22.51%, and 11.04%, respectively. The leaf area of treatment D was also significantly higher than that of treatment A, B, and C by 92.61%, 61.35%, and 27.87%. Compared with treatment A, B, and D, the stem diameter of treatment C was the largest, which increased by 28.36%, 16.91%, and 18.49%, respectively. The single fruit weight, fruit number per plant, yield per plant, and irrigation amount of treatment D were the largest, while the water use efficiency of treatment C was the highest, which increased by 33.14%, 13.23%, and 10.30% compared with treatment A, B, and D. Compared with

收稿日期:2020-02-10

修回日期:2020-08-28

**基金项目:**甘肃省科技重大专项计划项目(17ZD2NA015);国家现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-23-C-07);国家自然科学基金项目(31660584);甘肃省引导科技创新发展专项资金项目(2018ZX-02);甘肃省自然科学基金项目(1610RJZA098)

**作者简介:**吕剑(1986-),男,陕西蒲城人,讲师,主要从事蔬菜栽培生理与生长调控研究。E-mail:lvjian@gsau.edu.cn

**通信作者:**郁继华(1961-),男,江苏无锡人,教授,博导,主要从事设施蔬菜逆境生理与生长调控研究。E-mail:yujihua@gsau.edu.cn

treatment A and B, the three indexes of treatment C were significantly increased by 19.17% and 10.81%, 0.98% and 0.45%, 66.70% and 18.21%, respectively. The contents of soluble protein and soluble sugar in treatment C were significantly higher than those in other treatments, while nitrate content was significantly lower in treatment C. Compared with treatment A, B, D, the contents of total K and Ca increased by 35.20% and 11.19%, 3.81% and 11.19%, 1.06% and 6.43%, respectively. After principal component analysis and comprehensive evaluation, the scores of the four treatments from high to low were as follows: C, D, B, and A.

**Keywords:** cucumber; substrate culture; irrigation lower limit; growth; quality; yield; WUE

中国是世界上干旱灾害发生最为频繁和严重的国家之一,平均每年有 667 万~2 667 万  $\text{hm}^2$  农田因旱受灾,最高年份受灾面积达 4 000 万  $\text{hm}^2$ ,每年造成的粮食减产从数百万吨到 3 000 多万  $\text{t}^{[1]}$ 。中国西北大部分地区处于干旱和半干旱气候区,气候干燥,植被稀少,蒸发量大,是中国最容易发生干旱灾害的区域,每年干旱造成的经济损失高达 GDP 的 4%~6%,远远高于中国其他地区。水资源短缺造成的干旱胁迫正严重威胁着中国粮食和生态安全,已成为制约中国社会经济可持续发展的重要因素之一<sup>[2]</sup>。戈壁农业是指在符合国家有关生态保护法律法规政策的前提下,在戈壁滩、砂石地、盐碱地等非耕地上,以高效节能日光温室为载体,发展设施基质栽培的蔬菜及瓜果等特色农产品的新型农业发展业态。它能够充分发挥可利用的戈壁沙地等闲置土地资源的比较优势,并通过现代化农业科技手段,尽最大可能地精准用水,相当于使更多戈壁荒地变为耕地<sup>[3]</sup>。

与戈壁农业相关的亏缺灌溉是应对水资源短缺的有效措施之一,它是基于根冠通信理论<sup>[4]</sup>、生长冗余理论<sup>[5]</sup>、生长补偿效应<sup>[6]</sup>、气孔调节理论<sup>[7]</sup>和作物有限水量最优分配理论<sup>[8]</sup>发展起来的生理节水技术。黄瓜是设施农业中种植面积最大的蔬菜种类之一,同时也是耗水量较大的蔬菜作物,发展黄瓜节水灌溉意义重大,而黄瓜在不同水分条件下的生长、产量及品质响应机理是其节水灌溉的理论基础<sup>[9]</sup>。国内外研究发现,黄瓜产量随着灌水量的增加而增加,但水分利用效率与品质呈抛物线变化趋势<sup>[10-12]</sup>;而在黄瓜开花期和初瓜期保持 80%~90% 田间持水量,盛瓜期保持 90%~100% 田间持水量和生育后期降至 70%~80% 田间持水量的土壤水分处理,能同时实现最高产量和最大水分利用效率<sup>[13]</sup>。

蔬菜的生长、产量及品质是水管理参数中最主要的响应指标,如何根据不同水分处理的生长、产量和品质测算结果来推荐合理的灌水方案,分析评价方法尤为重要。黄瓜的品质分为外观品质和

营养品质,不同品质因素间存在着密切的相关性<sup>[13]</sup>,简单的对比分析方法不能充分考虑多个指标因子间的关系,而主成分分析法可将多个具有一定相关性的观测指标转化为少数几个新的指标,再依据各处理的因子得分进行综合评价,使评价结果更加客观、合理,现已广泛运用在农作物的数量性状分析和综合评价中<sup>[14-16]</sup>,而鲜见其用于基质栽培黄瓜灌水下限的研究中。

综上,在干旱半干旱气候条件及发展戈壁农业的大背景下,探索基质栽培黄瓜生产中的节水灌溉制度,对其灌水下限进行研究,并借助主成分分析方法充分考虑多个指标间的内在联系,具有实际意义。本试验以黄瓜“博特 209”为试材,研究不同灌水下限对基质栽培黄瓜生长、产量及品质的影响,并采用主成分分析法对各处理的优劣进行综合评价,以期为基质栽培黄瓜节水灌溉制度的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2019 年 3—7 月在甘肃农业大学温室内进行。供试黄瓜品种为“博特 209”,购于甘肃省农业科学院。2019 年 3 月 20 日在甘肃农业大学人工气候箱育苗,2019 年 4 月 20 日定植于玻璃温室中,栽培方式为基质盆栽,定植基质为“绿能瑞奇”(甘肃绿能科技股份有限公司生产),基质:草炭:蛭石比为 2:1:1,基质田间最大持水量为 61.03%,容重为  $521.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,pH 7.8,EC(电导率)  $2.1 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,全氮  $1.612 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $498.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $136.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $346.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。定植盆高为 20 cm,直径为 26 cm。

### 1.2 试验设计

试验从缓苗 8 d 后开始进行水分处理,共设 4 个处理,每个处理 3 个重复,每个重复 15 盆。4 个处理的灌水下限各为田间持水量的 50%、60%、70%、80%,分别用 A、B、C、D 表示,灌水上限统一设定为 90% 田间持水量。用 TDR350 水分速测仪监测

基质含水量,待含水量到下限时灌水至上限,单株单次每盆灌水量如表 1 所示,灌水量计算公式<sup>[17]</sup>如下:

$$M = S \times r \times h \times Q \times (q_1 - q_2)$$

式中, $M$  为每盆灌水量( $\text{m}^3$ ); $S$  为每盆盆栽面积( $0.053 \text{ m}^2$ ); $r$  为基质容重( $521.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $h$  为计划湿润层深度( $0.2 \text{ m}$ ); $Q$  为最大田间持水量( $61.03\%$ ); $q_1$ 、 $q_2$  分别代表灌水上、下限(田间持水量百分比)。

表 1 不同处理盆栽单株单次灌水量

Table 1 Irrigation amount per plant per time for potted plants with different treatments

处理 Treatment	内容 Content	灌水量/(L·pot <sup>-1</sup> ) Irrigation amount
A	50%田间持水量 50% of field capacity	1.35
B	60%田间持水量 60% of field capacity	1.01
C	70%田间持水量 70% of field capacity	0.68
D	80%田间持水量 80% of field capacity	0.34

### 1.3 指标测定

1.3.1 生长指标 随机标记长势一致的 15 株黄瓜植株,在盛果期测定如下生长指标:

(1)株高(cm):取植株的茎基部到生长点的总长度,用钢卷尺测量。

(2)茎粗(mm):取植株下部向上第 5~6 节间处的直径,用数显游标卡尺测量。

(3)叶面积( $\text{cm}^2$ ):取植株下部向上第 5、6、7 片叶的叶面积平均值。直尺测量植株叶片的叶长( $L$ )和叶宽( $W$ ),按如下公式<sup>[18]</sup>计算叶面积:

$$\text{叶面积} = 14.61 - 5.00L + 0.94L^2 + 0.47W + 0.63W^2 - 0.62LW$$

### 1.3.2 产量指标

(1)单果重(kg)、单株果数、单株产量(kg):在黄瓜植株拉秧后分别统计每个处理 45 株黄瓜的果实总重量及总个数,根据其平均值计算单果重、单株果数和单株产量。

(2)单株总灌水量( $\text{m}^3$ ):记录每个处理灌水总次数,然后分别乘以对应处理的单株单次灌水量。

### 1.3.3 品质指标

盛果期,随机选取 15 个大小均匀的黄瓜果实,测定其外观及营养品质:

(1)外观品质:瓜长用直尺测量;瓜粗用游标卡尺测量;烘干法测定果实含水量。

$$\text{商品瓜率} = \text{商品瓜数} / \text{总瓜数} \times 100\%$$

(2)营养品质:可溶性蛋白含量采用考马斯亮

蓝 G-250 溶液法测定;可溶性糖含量采用蒽酮法测定;Vc 含量采用 2,6-二氯酚靛酚钠染色法测定;硝酸盐含量采用沸水浸提、紫外分光光度法测定<sup>[19]</sup>。黄瓜果实全 P 和全 K 的前处理采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮法消解,全 Ca、Mg、Cu、Fe、Mn 及 Zn 前处理采用干法灰化法,全 P 采用钼锑抗比色法测定,全 K、Ca、Mg、Cu、Fe、Mn 及 Zn 均采用原子吸收光谱仪测定<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据分析

运用 Excel 2010 对数据进行处理及作图,并用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析及主成分分析,并运用 Duncan's 检验法对显著性差异( $P < 0.05$ )进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌水下限对黄瓜植株生长指标的影响

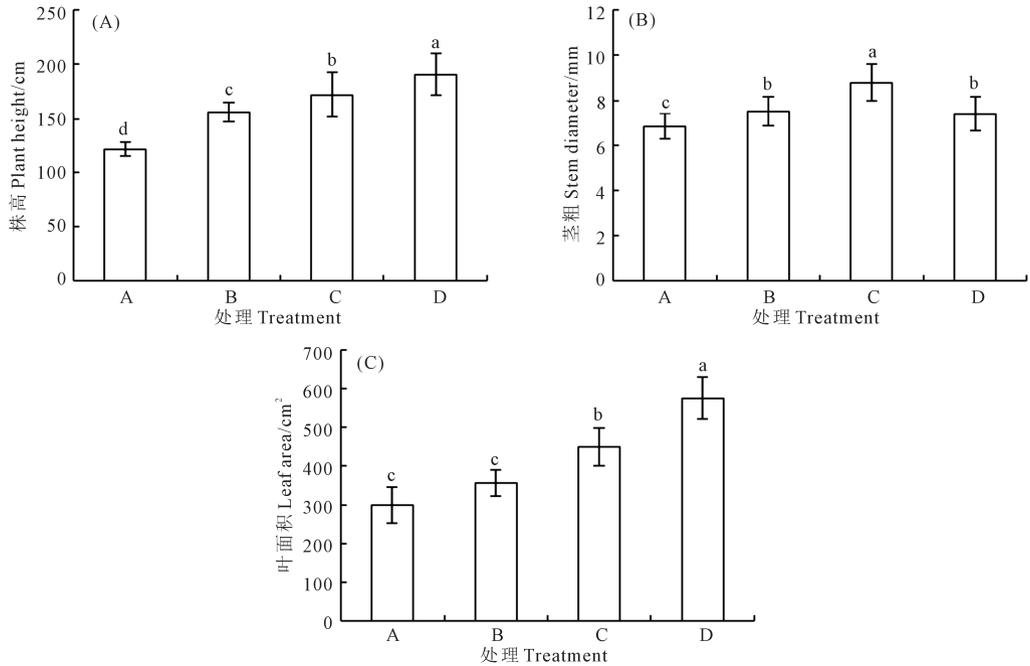
从图 1 可以看出,随着灌水下限的提高,黄瓜株高和叶面积呈逐渐上升趋势,黄瓜茎粗则呈先上升后下降的趋势。其中,处理 D 的株高显著高于处理 A、B 和 C,增幅分别为 56.50%、22.51% 和 11.04%;处理 D 的叶面积也显著高于处理 A、B 和 C,增幅分别为 92.61%、61.35% 和 27.87%,处理 A 和处理 B 之间无显著性差异;而处理 C 的茎粗最大,显著高于处理 A、B 和 D,增幅分别为 28.36%、16.91% 和 18.49%,处理 B 和处理 D 之间无显著性差异。

### 2.2 不同灌水下限对黄瓜产量及水分利用效率的影响

由表 2 可知,随着灌水下限的提高,单果重、单株产量及单株总灌水量均呈现逐渐上升的趋势,然而水分利用效率却呈现先上升后下降的趋势。其中,处理 C、D 的单果重均显著高于处理 A 和处理 B;处理 D 的单株果数显著高于处理 A、B 及 C,增幅分别为 97.73%、55.96% 及 12.58%;处理 C 的单株产量也显著高于处理 A 和 B,增幅分别为 66.94% 和 33.95%,处理 C 和 D 之间无显著差异;处理 D 的灌水量显著高于处理 A、B 和 C,增幅分别为 38.03%、30.67% 和 10.49%;处理 C 的水分利用效率最高,且显著高于处理 A、B 和 D,增幅分别为 33.14%、13.23% 和 10.30%。

### 2.3 不同灌水下限对黄瓜果实外观品质的影响

由表 3 可知,随着灌水下限的提高,黄瓜果实的瓜长、瓜粗、含水量及商品瓜率均呈现逐渐上升的趋势。其中,处理 D 的瓜长显著高于处理 A、B 和 C,处理 B 和处理 C 之间无显著差异;处理 C 和处理 D 的瓜粗、含水量及商品瓜率均显著大于处理 A 和



注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图 1 不同灌水下限对黄瓜株高(A)、茎粗(B)及叶面积(C)的影响

Fig.1 Effect of different irrigation lower limits on plant height(A), stem diameter (B), and leaf area (C) of cucumber

表 2 不同灌水下限对黄瓜产量及水分利用效率的影响

Table 2 Effect of different irrigation lower limits on cucumber yield and water use efficiency

处理 Treatment	单果重/kg Single fruit weight	单株果数 Number of fruits per plant	单株产量/kg Yield per plant	单株总灌水量/m³ Total irrigation amount per plant	水分利用效率/(kg·m⁻³) WUE
A	0.18±0.005c	3.51±0.12d	0.5122±0.018d	0.0162±0.002d	31.62±2.48d
B	0.20±0.005b	4.36±0.16c	0.6383±0.023c	0.0172±0.002c	37.18±3.15c
C	0.23±0.005a	6.04±0.08b	0.8551±0.011a	0.0203±0.003b	42.10±4.08a
D	0.23±0.006a	6.20±0.07a	0.8565±0.016a	0.0224±0.003a	38.17±3.98b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: In the same column, different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

处理 B, 处理 C 及处理 D 之间上述 3 个指标均无显著差异; 处理 C 较处理 A、B 的含水量增幅分别为 0.98%、0.45%, 处理 D 较处理 A、B 的含水量增幅分别为 1.00%、0.48%; 处理 C 较处理 A 和 B 的商品瓜率增幅分别为 66.70% 和 18.21%, 处理 D 较处理 A 和 B 的商品瓜率增幅分别为 66.98% 和 18.40%。

## 2.4 不同灌水下限对黄瓜果实营养品质的影响

2.4.1 不同灌水下限对黄瓜果实可溶性蛋白、可溶性糖、维生素 C 及硝酸盐含量的影响 如图 2 所示, 黄瓜果实中可溶性蛋白、可溶性糖随着灌水下限的提高呈现出先上升后下降的趋势, 其中, 处理 C 的可溶性蛋白和可溶性糖含量最高, 且与处理 A 及处理 B 间差异显著, 处理 C 的可溶性蛋白是处理 A 的 1.13 倍, 较处理 B 的增幅为 52.38%; 处理 C 的可

表 3 不同灌水下限对黄瓜果实形态指标的影响

Table 3 Effect of different irrigation lower limits on the morphological indexes of cucumber fruits

处理 Treatment	瓜长/cm Melon length	瓜粗/mm Melon thickness	含水量/% Water content	商品瓜率/% Commodity rate of cucumber
A	28.67±0.67c	30.62±0.60c	95.82±0.37c	54.06±3.67c
B	30.99±0.21b	32.93±1.01b	96.33±0.29b	76.24±3.25b
C	32.11±0.22b	36.49±0.22a	96.76±0.32a	90.12±2.16a
D	33.84±0.72a	36.43±0.17a	96.80±0.33a	90.27±2.35a

溶性糖相较于处理 A 和 B 的增幅分别为 57.09% 和 13.03%; 黄瓜果实中的 Vc 含量随着灌水下限的提高呈逐渐上升的趋势, 处理 B、C、D 均显著高于处理 A, 但处理 B、C、D 之间无显著性差异; 处理 C 黄瓜果实中硝酸盐的含量最低, 且与处理 A、B、D 存在显

著性差异,降幅分别为 20.69%、25.55%和 20.08%,处理 A、B、D 之间的硝酸盐含量并无显著性差异。

2.4.2 不同灌水下限对黄瓜果实矿质元素含量的影响 为了解不同灌水下限对黄瓜矿质营养吸收的影响,本试验测定了人们关注度较高的黄瓜果实中全 K、P、Mg、Ca、Cu、Fe、Mn 和 Zn 8 种矿质元素的含量。如表 4 所示,随着灌水下限的提高,黄瓜果实中全 K 和全 Ca 含量呈现先上升后下降的趋势,处理 C 的全 K 和全 Ca 含量最高,且显著高于处理 A、B 和 D,处理 C 的全 K 含量比处理 A、B、D 分别增加了 35.20%、3.81%、1.06%,全 Ca 含量比处理 A、B、D 分别增加了 11.19%、11.19%、6.43%;黄瓜果实中全 Mg、Fe 及 Cu 含量则随着灌水上限的提高呈现逐渐上升的趋势,其中,处理 D 的全 Mg 含量与处理 A、B 和 C 均存在显著差异,处理 D 的全 Fe 和全 Cu 含量与处理 A 和 B 的差异达到显著水平,但与处理 C 差异不显著;处理 B 的全 P 含量显著高于处理 A、C 和 D,而处理 A、C 和 D 之间无显著差异;处理 B、C 和

D 的全 Zn 含量均显著高于处理 A,而处理 B、C 和 D 之间差异不显著。

## 2.5 不同灌水下限对黄瓜产量品质影响的主成分分析及综合评价

本试验将 4 个处理的 22 个与黄瓜生长、产量及品质有关的指标作为分析指标进行主成分分析,得到主成分特征值、贡献率和累积贡献率(表 5)。研究中按照特征值大于 1 及累计贡献率大于 85%的原则,提取了 3 个主成分。结果如表 5 所示,第 1 主成分特征值为 16.693,代表 4 个处理 22 个指标的 75.875%的信息;第 2 主成分的特征值为 2.971,代表 4 个处理 22 个指标 13.503%的信息;第 3 主成分的特征值为 2.337,代表 4 个处理 22 个指标 10.622%的信息,前 3 个主成分累计方差贡献率为 100%,说明这 3 个主成分反映了原始变量 100%的信息。因此提取前 3 个主成分代替原 22 个指标评价不同灌水下限对黄瓜生长、产量及品质的影响,达到了降维的目的。

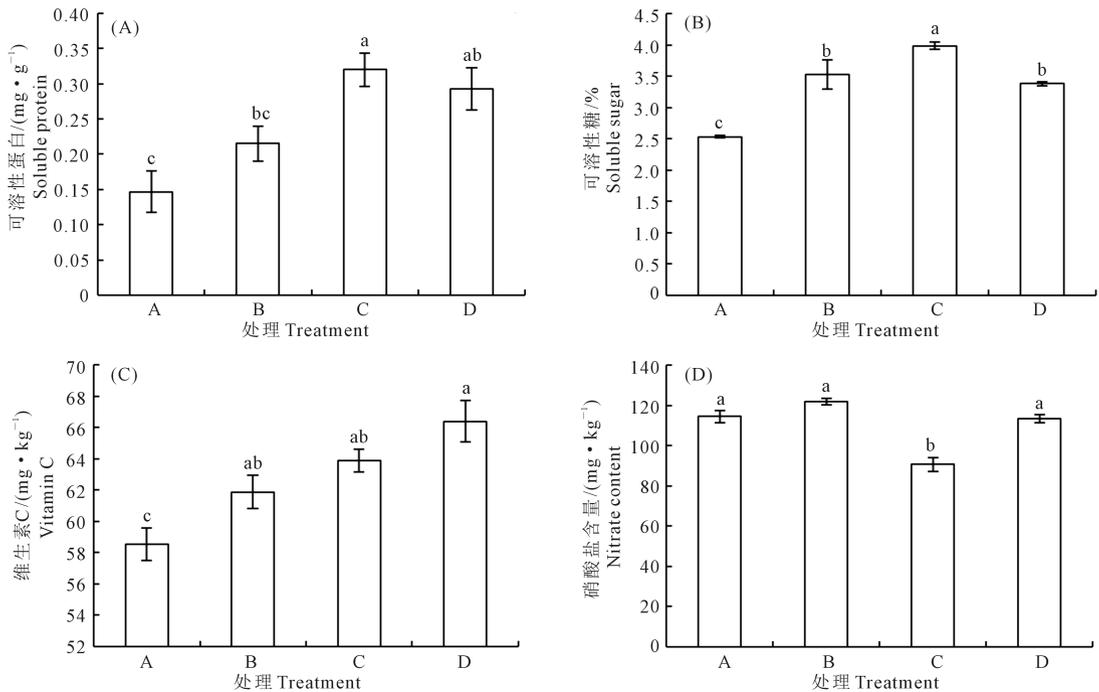


图 2 不同灌水下限对黄瓜果实可溶性蛋白(A)、可溶性糖(B)、Vc(C)及硝酸盐含量(D)的影响  
Fig.2 Effect of different irrigation lower limits on soluble protein (A), soluble sugar (B), Vc (C), and nitrate content (D) in cucumber fruits

表 4 不同灌水下限对黄瓜果实矿质元素含量的影响

Table 4 Effect of different irrigation lower limits on the content of mineral elements in cucumber fruits

处理 Treatment	全钾 Total K / (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P / (g·kg <sup>-1</sup> )	全镁 Total Mg / (g·kg <sup>-1</sup> )	全钙 Total Ca / (g·kg <sup>-1</sup> )	全铜 Total Cu / (mg·kg <sup>-1</sup> )	全铁 Total Fe / (mg·kg <sup>-1</sup> )	全锰 Total Mn / (mg·kg <sup>-1</sup> )	全锌 Total Zn / (mg·kg <sup>-1</sup> )
A	47.76±3.50c	6.85±0.04b	3.07±0.02c	1.34±0.02c	7.23±0.08c	53.93±0.93b	17.11±0.22a	60.47±1.36b
B	62.20±6.33b	7.55±0.14a	3.20±0.06c	1.34±0.05c	7.80±0.09b	57.20±3.77b	15.95±0.09b	64.78±0.12a
C	64.57±1.86a	7.01±0.04b	3.64±0.01b	1.49±0.01a	8.21±0.06a	75.45±3.21a	15.93±0.06b	64.30±1.30a
D	63.89±1.82b	7.03±0.15b	3.88±0.05a	1.40±0.03b	8.21±0.12a	79.32±2.97a	18.39±0.08a	65.35±0.90a

主成分的载荷矩阵旋转之后载荷系数若更接近 1 或更接近 0, 这样得到的主成分能够更好地解释变量。由表 6 结果可知, 主成分 1 (F1) 主要综合了株高 (因子载荷为 0.960)、叶面积 (因子载荷为 0.993)、单果重 (因子载荷为 0.886)、单株果数 (因子载荷为 0.954)、产量 (因子载荷为 0.881)、瓜长 (因子载荷为 0.977)、瓜粗 (因子载荷为 0.875)、含水量 (因子载荷为 0.887)、可溶性蛋白 (因子载荷为 0.803)、Ve (因子载荷为 0.978)、全 K (因子载荷为 0.752)、全 Mg (因子载荷为 0.957)、全 Cu (因子载荷为 0.864)、全 Fe (因子载荷为 0.910)、全 Mn (因子载荷为 0.556) 和全 Zn (因子载荷为 0.796) 这 16 个指标的信息; 主成分 2 (F2) 主要综合了茎粗 (因子载荷为 0.928)、水分利用效率 (因子载荷为 0.721)、可溶性糖 (因子载荷为 0.689) 及全 Ca (因子载荷为 0.866) 这 4 个指标的信息; 主成分 3 (F3) 主要综合了全 P (因子载荷为 0.991) 及硝酸盐含量 (因子载荷为 0.337) 这 2 个指标的信息, 由于因子负荷均为正值, 位于正向分布, 所以因子得分越高, 所对应的指标的得分越高。

如表 6 所示, 用各指标的主成分载荷除以相对应主成分特征值的平方根, 得到 3 个主成分中每个指标所对应的系数即特征向量, 以特征向量为权重

构建 3 个主成分的表达函数式:

$$Y_1 = 0.235X_1 + 0.076X_2 + 0.243X_3 + 0.217X_4 + 0.234X_5 + 0.216X_6 + 0.149X_7 + 0.239X_8 + 0.214X_9 + 0.217X_{10} + 0.126X_{11} + 0.197X_{12} + 0.239X_{13} - 0.043X_{14} + 0.184X_{15} - 0.001X_{16} + 0.234X_{17} + 0.117X_{18} + 0.212X_{19} + 0.291X_{20} + 0.556X_{21} + 0.796X_{22}$$

$$Y_2 = 0.115X_1 + 0.538X_2 + 0.039X_3 + 0.264X_4 + 0.17X_5 + 0.274X_6 + 0.418X_7 + 0.083X_8 + 0.279X_9 + 0.243X_{10} + 0.4X_{11} + 0.34X_{12} + 0.095X_{13} - 0.536X_{14} + 0.227X_{15} - 0.079X_{16} + 0.144X_{17} + 0.502X_{18} + 0.256X_{19} + 0.217X_{20} - 0.359X_{21} + 0.086X_{22}$$

表 5 主成分分析的特征根及方差贡献率

Table 5 Characteristic root and variance contribution rate of principal component analysis

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution
主成分 1 (F1) Principal component 1	16.693	75.875	75.875
主成分 2 (F2) Principal component 2	2.971	13.503	89.378
主成分 3 (F3) Principal component 3	2.337	10.622	100

表 6 主成分分析的旋转载荷矩阵及特征向量

Table 6 Rotational load matrix and eigenvectors of principal component analysis

指标 Index	F1		F2		F3	
	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector	载荷值 Load value	特征向量 Eigenvector
株高 Plant height	0.960	0.235	0.198	0.115	0.199	0.130
茎粗 Stem diameter	0.309	0.076	0.928	0.538	0.209	0.137
叶面积 Leaf area	0.993	0.243	0.067	0.039	-0.094	-0.062
单果重 Single fruit weight	0.886	0.217	0.455	0.264	0.087	0.057
单株果数 Number of fruits per plant	0.954	0.234	0.293	0.170	-0.060	-0.039
产量 Yield	0.881	0.216	0.473	0.274	0.030	0.020
水分利用效率 WUE	0.610	0.149	0.721	0.418	0.329	0.216
瓜长 Melon length	0.977	0.239	0.142	0.083	0.159	0.104
瓜粗 Melon thickness	0.875	0.214	0.480	0.279	0.058	0.038
含水量 Water content	0.887	0.217	0.418	0.243	0.194	0.127
可溶性糖 Soluble sugar	0.513	0.126	0.689	0.400	0.512	0.335
可溶性蛋白 Soluble protein	0.803	0.197	0.587	0.340	0.101	0.066
维生素 C 含量 Ve	0.978	0.239	0.164	0.095	0.129	0.085
硝酸盐 Nitrate	-0.177	-0.043	-0.925	-0.536	0.337	0.221
全钾 Total K	0.752	0.184	0.392	0.227	0.53	0.346
全磷 Total P	-0.003	-0.001	-0.135	-0.079	0.991	0.648
全镁 Total Mg	0.957	0.234	0.249	0.144	-0.148	-0.097
全钙 Total Ca	0.476	0.117	0.866	0.502	-0.155	-0.101
全铜 Total Cu	0.864	0.212	0.441	0.256	0.241	0.158
全铁 Total Fe	0.910	0.223	0.374	0.217	-0.181	-0.118
全锰 Total Mn	0.556	0.136	-0.619	-0.359	-0.555	-0.363
全锌 Total Zn	0.796	0.195	0.148	0.086	0.587	0.384

$$Y_3 = 0.13X_1 + 0.137X_2 - 0.062X_3 + 0.057X_4 - 0.039X_5 + 0.02X_6 + 0.216X_7 + 0.104X_8 + 0.038X_9 + 0.127X_{10} + 0.335X_{11} + 0.066X_{12} + 0.085X_{13} + 0.221X_{14} + 0.346X_{15} + 0.648X_{16} - 0.097X_{17} - 0.101X_{18} + 0.158X_{19} - 0.118X_{20} - 0.363X_{21} + 0.384X_{22}$$

在以上 3 个表达式中,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 、 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 、 $X_{18}$ 、 $X_{19}$ 、 $X_{20}$ 、 $X_{21}$  及  $X_{22}$  分别为 Z-score 法标准化后的 22 个指标的标准值, 同时, 在标准化的过程中对负向指标硝酸盐含量进行了取负数的正向化处理。以各个主成分对应的方差贡献率作为权重, 由主成分得分和对应的权重线性加权求和得到综合评价函数如下:

$$\text{综合得分} = 0.765Y_1 + 0.129Y_2 + 0.106Y_3$$

根据主成分综合得分模型, 可计算出 4 个处理 22 个指标的综合得分和排序 (表 7)。综合得分从高到低依次为处理 C、处理 D、处理 B、处理 A。

表 7 4 个处理黄瓜的综合得分

Table 7 Comprehensive scores of 4 processed cucumbers

处理 Treatment	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	综合得分 Score	排序 Rank
A	-4.58	-5.787	-3.101	-4.582	4
B	-0.816	-0.037	1.515	-0.463	3
C	2.448	5.370	1.026	2.689	1
D	3.445	-0.099	-0.301	2.566	2

### 3 讨 论

黄瓜是我国重要的设施栽培作物, 其对水分敏感, 具有需水量大且不耐旱的特点<sup>[21]</sup>。我国温室黄瓜种植中对水分管理缺乏科学的量化指标, 常根据经验来确定灌水量和灌水周期, 这对温室环境、水分利用效率的提高和病虫害的防治均有不利影响<sup>[22]</sup>, 因此, 在设施温室蔬菜灌溉节水方面, 国内外学者对非充分灌溉范畴内节水进行了较多研究, 如亏缺灌溉、调亏灌溉、交替隔沟灌溉、控制上下限灌溉等<sup>[23-27]</sup>。本试验针对控制灌水下限的节水灌溉模式进行了研究, 灌水下限即灌水起始点, 它决定了作物的灌水次数、灌水间隔时间及灌水量<sup>[28]</sup>。试验结果表明, 随着灌水下限的提高, 黄瓜植株的株高、叶面积呈逐渐上升的趋势, 在张宪法等<sup>[29]</sup>的研究中也表明, 控制土壤含水量在田间持水量 70% 以下时会显著降低黄瓜植株株高、减小叶片面积, 使植株营养生长受到限制; 诸葛玉平<sup>[30]</sup>的研究认为番茄的茎粗与灌水下限的关系曲线呈抛物线形状, 即只有当灌水下限控制在适宜的范围内, 才会有利于茎粗的增加。姚磊等<sup>[31]</sup>认为, 轻度水分胁迫能够增

大番茄茎粗, 其后会影响叶面积及叶色, 最终才导致株高和叶片数的改变。在本试验中黄瓜植株的茎粗随灌水下限的提高呈现出先上升后下降的趋势, 处理 C 即基质持水量为田间持水量的 70% 时, 茎粗最大, 这与前两者的研究相似, 表明了轻度的水分胁迫有利于茎粗的增大, 有利于培育壮苗。王新元等<sup>[32]</sup>研究表明黄瓜生长速率、产量与灌水量呈明显正比关系。刘军等<sup>[33]</sup>在紫花苜蓿的研究中表明轻度水分胁迫的水分利用效率 ( $WUE$ ) 显著大于充分灌溉的  $WUE$  ( $P < 0.05$ ), 表明适度水分胁迫可提高紫花苜蓿叶片的水分利用效率。本试验结果同样证明, 随着灌水量的增加, 黄瓜果实的单果重、单株果数及产量均逐渐上升, 而黄瓜的水分利用效率呈先上升后下降的趋势, 以灌水下限为田间持水量的 70% 时  $WUE$  最高。

本试验结果表明, 处理 C 和 D 的黄瓜果实瓜粗、含水量与商品瓜率无显著性差异但显著高于处理 A 和 B, 这可能是由于基质的含水量较高, 黄瓜果实充实较快, 有效地降低了畸形瓜数量<sup>[34]</sup>。可溶性蛋白和可溶性糖含量随灌水下限的提高呈先上升后下降的趋势, 灌水下限为田间持水量 70% 处理的可溶性蛋白及可溶性糖含量显著高于其他处理, 可能是因为适当的水分亏缺可以提高黄瓜的果实品质, 但灌水下限过低时, 水分胁迫过重, 造成后期植株合成碳水化合物等营养物质的功能显著降低, 从而导致黄瓜果实品质的显著下降<sup>[35-37]</sup>, 常莉飞<sup>[38]</sup>的研究同样表明灌水量对黄瓜品质有一定的影响, 随灌水量的增加, 黄瓜品质有下降的趋势, 表现在含水量的增加和蛋白质、可溶性糖含量的减少。处理 C 的黄瓜果实中硝酸盐含量显著低于其他处理, 处理 A 和 B 黄瓜果实有较高的硝酸盐积累量, 这可能是由于干旱使黄瓜体内的硝酸还原酶含量下降、活性降低, 从而导致硝酸盐的积累显著增加<sup>[39-40]</sup>。钾和钙是植物体生长、生活所必须摄取的营养元素, 首先植物的细胞膜需要钙离子来稳定, 钙离子能够调节植物细胞的渗透压, 使植物的抗逆能力得到增强; 其次, 钾可以活化植物代谢中的大部分酶; 另外, 钾还能促进氨基酸、磷酸盐以及硝酸盐的吸收转移。Yang 等<sup>[41]</sup>研究发现在干旱和盐碱条件下增加植物矿质元素的供应量能够在一定程度上减缓胁迫对植物生长的抑制作用。Maathuis 等<sup>[42]</sup>的研究也表明水分胁迫下 K 和 Ca 的摄取、积累能降低胁迫对植物生长造成的不利影响, 使植物体对水分胁迫的耐受能力增强。本试验结果同样证明, 随着灌水下限的提高, 黄瓜果实中 K 和 Ca 含量呈现

先上升后下降的趋势,处理 C 的 K 和 Ca 含量显著高于其他处理,说明适度的水分胁迫有助于矿质元素含量的吸收以增强植物对胁迫环境的耐受能力。本试验初始指标测定的是不同的生长、产量及品质指标,其量纲和数量级不同,并且据报道硝酸盐含量对综合评价属于负影响<sup>[43]</sup>。因此本研究采用 Z-score 法对初始指标数据进行标准化,对负向指标硝酸盐含量进行了取负数的正向化处理,从黄瓜植株生长、果实产量及品质性状的角度对不同灌水下限处理进行综合评价并建立适宜的评价方法,使结果更为客观、合理。

## 4 结 论

综上所述,随着灌水下限的提高,灌水量逐渐增多,黄瓜株高和叶面积呈逐渐增大的趋势,灌水下限为 80%田间持水量处理显著高于其他处理;茎粗则呈现先升高后下降的趋势,灌水下限为 70%田间持水量的黄瓜茎粗显著高于其他处理,说明适当降低灌水下限有利于茎粗的增大;黄瓜单果重、单株产量均呈现逐渐上升的趋势,然而水分利用效率却呈现先上升后下降的趋势,以 70%田间持水量灌水下限处理的水分利用效率最高;黄瓜果实的瓜长、瓜粗、含水量及商品瓜率呈现逐渐上升的趋势;黄瓜果实中可溶性蛋白、可溶性糖含量随着灌水下限的提高呈现先上升后下降的趋势,K 和 Ca 含量呈现先上升后下降的趋势,以 70%田间持水量灌水下限处理的最高。主成分分析显示不同灌水下限对黄瓜生长、产量及品质的影响评价指标由最初的 22 个降为 3 个主成分,达到了降维目的,且 3 个主成分代替了原指标 100%的信息。综合评价结果表明,各处理的得分顺序从高到低依次为 70%田间持水量、80%田间持水量、60%田间持水量、50%田间持水量的灌水下限处理。

### 参 考 文 献:

[1] 姚国章,袁敏. 干旱预警系统建设的国际经验与借鉴[J]. 中国应急管理, 2010, (3):43-48.

[2] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.

[3] 陈克恭,师安隆. 戈壁农业是生态文明背景下的农业革命探索[J]. 农业经济问题, 2019, (5):130-137.

[4] Davies W J, Zhang J H. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2003, 42(1):55-76.

[5] Reynolds M P, Acevedo E, Sayre K D, et al. Yield potential in modern wheat varieties: its association with a less competitive ideotype [J]. Field Crops Research, 1994, 37(3):149-160.

[6] 郝树荣,郭相平,张展羽,等.作物干旱胁迫及复水的补偿效应研究进展[J]. 水利水电科技进展,2009, 29(1):81-84.

[7] Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth[J]. Annuals of Botany, 2002, 89(7):907-916.

[8] 康绍忠,杜太生,孙景生,等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6):661-667.

[9] 李生平,武雪萍,高丽丽,等. 黄瓜光合特征及水分利用效率对土壤含水量的响应[J]. 中国农业科学, 2017,50(15):2993-3005.

[10] 韩建会,石琳琪,武彦荣. 水分胁迫对日光温室黄瓜产量的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2000, 22(5):395-397.

[11] 张宪法,于贤昌,张振贤. 土壤水分对温室黄瓜结果期生长与生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2002, 29(4):343-347.

[12] Mao X, Liu M, Wang X, et al. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2003, 61(3):219-228.

[13] 李生平,武雪萍,党建友,等. 负压灌溉对黄瓜产量品质及水氮利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (2):55-62.

[14] 韩泽群,姜波. 加工番茄品种多性状综合评价方法研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2):357-365.

[15] 梁梅,周蓉,邹滔,等. 番茄农艺性状与果实主要营养成分相关性分析[J]. 西北农业学报, 2013, 22(5):91-100.

[16] 钟金仙,罗英,曾仁杰,等. 黄瓜种质资源果实性状的主成分分析与综合评价[J]. 中国农学通报, 2017,33(16):46-52.

[17] 李琨,郁继华,颀建明,等. 不同灌水下限对日光温室有机生态型无土栽培辣椒生长指标的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(2):41-44.

[18] Robbins N S, Pharr D M. Leaf area prediction models for cucumber from linear measurements[J]. Hort Science, 1987, 22(6):1264-1266.

[19] 张玲. 黄腐酸和甜菜碱对苹果抗旱生理及果实产量品质的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2016.

[20] 王学征,李秋红,吴凤芝. NaCl 胁迫下栽培型番茄 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>吸收、分配和转运特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(7):1423-1432.

[21] 张振贤,程智慧. 高级蔬菜生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2008:47-61.

[22] 王巨媛,毛秀杰,翟胜. 日光温室嫁接黄瓜需水规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4):147-150.

[23] Goldhamer D A, Viveros M, Salinas M. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components [J]. Irrigation Science, 2006, 24(2): 101-114.

[24] 曹正鹏,刘玉汇,张小静,等. 亏缺灌溉对马铃薯生长产量及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4):122-131.

[25] 刘小飞,费良军,段爱旺,等. 调亏灌溉对冬小麦产量和品质及其关系的调控效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):276-282, 291.

[26] 李彩霞,周新国,孙景生,等. 交替隔沟灌溉下玉米根长密度分布及水分利用[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6):81-83.

[27] Mangalassery S, Rejani R, Singh V, et al. Impact of different irrigation regimes under varied planting density on growth, yield and economic return of cashew (*Anacardium occidentale* L.) [J]. Irrigation Science, 2019, 34:483-494.

[28] 南京农业大学. 蔬菜保护地栽培(北方本)[M]. 北京:中国农业出版社, 1987:52-58.

- [29] 张宪法,于贤昌,张振贤. 土壤水分对温室嫁接和非嫁接黄瓜生长与生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1399-1402.
- [30] 诸葛玉平. 保护地渗灌土壤水分调控技术及作物增产节水机理的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2001.
- [31] 姚磊,杨阿明. 不同水分胁迫对番茄生长的影响[J]. 华北农学报, 1997, 12(2):102-106.
- [32] 王新元,李登顺. 日光温室冬春茬黄瓜产量与灌水量的关系[J]. 中国蔬菜, 1999, (1):18-21.
- [33] 刘军,齐广平,康燕霞,等. 土壤水分胁迫对紫花苜蓿光合特性及其生物量的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4):893-900.
- [34] 李邵,薛绪掌,郭文善,等. 供水吸力对温室盆栽黄瓜产量与品质的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(8):1339-1344.
- [35] 李毅杰,原保忠,别之龙,等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):132-138.
- [36] 裴芸,别之龙. 塑料大棚中不同灌水量下限对生菜生长和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):207-211.
- [37] 方栋平,张富仓,李静,等. 灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):1735-1742.
- [38] 常莉飞. 调亏灌溉对温室黄瓜(*Cucumis sativus* L.) 生长发育和产量品质的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2007.
- [39] 沈明珠,翟宝杰,东惠茹,等. 蔬菜硝酸盐累积的研究——I. 不同蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐含量评价[J]. 园艺学报, 1982, 9(4): 41-48.
- [40] 王利群,王文兵,吴守一,等. 蔬菜硝酸盐含量与硝酸还原酶活性的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(12):37-40.
- [41] Yang C W, Guo W Q, Shi D C. Physiological roles of organic acids in alkali-tolerance of the alkali-tolerant halophyte [J]. Agronomy Journal, 2010, 102(4):1081-1089.
- [42] Maathuis F J. Physiological functions of mineral macronutrients [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3):250-258.
- [43] 阮敏. 主成分方法在经济管理综合评价应用中的误区[J]. 统计与决策, 2005, (4):23-24.

(上接第100页)

- [20] Hozayn M, El Monem A A A, Ramadam A, et al. Do magnetic water affect water use efficiency, quality and yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plant under arid regions conditions? [J]. Journal of Agronomy, 2013, 12(1):1-10.
- [21] Selim A F H, El-Nady M F. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field [J]. Acta Astronautical, 2011, 69(7-8):387-396.
- [22] Sadehipour O, Aghaei P. Investigation the effect of drought stress and magnetized water on yield and yield components of mung bean [J]. Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences), 2014, 6(1):79-86.
- [23] 赵国林,曹宏,张国柱. 磁化水浸种对小麦生理代谢及增产效应的研究[J]. 西北农业学报, 1997, 6(4):42-46.
- [24] Hasan M, Alharby H, Hajar A. Effects of magnetized water on phenolic compounds, lipid peroxidation and antioxidant activity of Moringa species under drought stress [J]. The Journal of Animal and Plant Sciences, 2018, 28(3):803-810.
- [25] Fernando F P, Luis R A, Gabriel F. Response of lettuce crop to magnetically treated irrigation water and different irrigation depths [J]. African Journal of Agricultural Research, 2015, 10(22):2300-2308.
- [26] Öquist G, Anderson J M, Mc Caffery S. Mechanistic differences in photoinhibition of sun and shade plants [J]. Planta, 1992, 188(3): 422-431.
- [27] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4):444-448.
- [28] 尤鑫,龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. 西部林业科学, 2012, 41(5):90-94.
- [29] 鲍士旦. 土壤化学分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:264-271.
- [30] Hazayn M, Abdul Qados A M S. Magnetic water application for improving wheat (*Triticum aestivum* L.) crop production [J]. Agriculture and Biology Journal of North America, 2010, 1(4): 677-682.
- [31] Hazayn M, Abdul Qados A M S. Irrigation with magnetized water enhances growth, chemical constituent and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Agriculture and Biology Journal of North America, 2010, 1(4):671-676.
- [32] Sadehipour O, Aghaei P. Improving the growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) by magnetized water [J]. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 2013, 3(1):37-43.
- [33] Marei A, Rdaydeh D, Karajeh D. Effect of using magnetic brackish water on irrigated bell pepper crop (*Capsicum annum* L.) characteristics in lower Jordan Valley/West Bank [J]. Journal of Agricultural Science and Technology A, 2014, 4(10):830-838.
- [34] Turker M, Temirci C, Battal P, et al. The effects of an artificial and static magnetic field on plant growth, chlorophyll and phytohormone levels in maize and sunflower plants [J]. Phytion, Annales Rei Botanicae, 2007, 46(2):271-284.
- [35] 王俊花,邵林生,王瑞钢. 磁化水对黄瓜产量、品质的影响[J]. 耕作与栽培, 2006, 53(1):23-25.
- [36] 贾昊,李玲,曹兵. 磁化水灌溉对设施灵武长枣生长与果实品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11):2280-2286.
- [37] Radhakrishnan R, Kumari P D R. Pulsed magnetic field: A contemporary approach offers to enhance plant growth and yield of soybean [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 51(2012):139-144.
- [38] Hilal M H, Shata S M, Abdel-Dayem A A. Effect of magnetic treated irrigation water on salt removal from a sandy soil and on the availability of certain nutrients [J]. Egyptian Soil Science Society, 2002, 42: 43-55.
- [39] 张萍,刘林德,柏新富. 不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3432-3439.
- [40] Jaime A T S, Judit D. Impact of magnetic water on plant growth [J]. Environmental and Experimental Biology, 2014, 12(4):137-142.