

负压水肥一体化灌溉对黄瓜产量和水、氮利用效率的影响

李生平¹, 武雪萍^{1*}, 龙怀玉¹, 张淑香¹, 王相玲¹, 梁国鹏¹, 高丽丽¹,
李景¹, 王碧胜¹, 郝秀钗², 李建波², 张胜爱²

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;
2 河北省藁城区农业技术推广中心, 河北石家庄 052160)

摘要:【目的】本试验采用自行设计的新型负压水肥一体化灌溉系统, 进行了系统供水负压对土壤硝态氮分布和黄瓜水氮利用效率影响的研究, 以期为实际应用和管理提供理论依据和技术参考。【方法】在遮雨网室内进行了供水和施氮双因素盆栽试验。以常规灌溉为对照(CK), 设4个供水水平: 0(W1)、-5(W2)、-10(W3)和-15 kPa(W4), 2个施氮水平(N1, N 0.3 g/kg 土; N0, 不施氮), 共10个处理。分析检测了黄瓜生育期内0—25土壤水分变化动态、土壤硝态氮的空间分布特征, 计算了黄瓜的水、氮利用效率。【结果】随着黄瓜耗水量的增加, 系统供水量也增大, 系统累计供水量与黄瓜累计耗水量之间存在极显著线性关系 $y = 0.96x + 3.4$ ($R^2 = 0.99$, $P < 0.01$)。不同供水负压对同一时期土壤含水量变化有极显著影响 ($P < 0.01$), 当供水负压设定在0、-5、-10和-15 kPa时, 土壤平均质量含水量分别为28.7%、22.7%、20.0%和15.6%, 而在同一系统供水负压下黄瓜整个生育期土壤含水量保持相对稳定, 其变化属于弱变异(变异系数 $CV \leq 0.1$)。负压灌溉水肥一体化能显著提高0—25 cm土壤氮素分布的均匀性, 土壤硝态氮沿垂直方向的平均变差系数分别比常规灌溉降低了58.6%~71.2%。同一系统供水负压下, 施氮处理(N1)黄瓜植株干物质质量、产量和水分利用效率比不施氮处理(N0)分别提高了4.6%~256.1%、12.6%~196.6%和7.76%~86.27%。当供水负压为-5 kPa时, 黄瓜植株平均干重和产量均为最高, 分别为153 g/pot和1406 g/pot, 黄瓜平均水分利用效率和氮肥表观利用率分别比常规灌溉提高了136.8%和52.32%。【结论】适宜的供水负压下, 负压灌溉系统通过土壤水分平衡供应机制, 实现了作物对水分的连续自动获取, 黄瓜整个生长期, 灌溉系统可以保持平稳均匀与适时适量供水, 因而, 负压灌溉水肥一体化显著提高了黄瓜的水、氮利用效率。本试验条件下, 系统供水负压为-5 kPa更有利于黄瓜的产量和氮素利用率的提高。

关键词: 负压水肥一体化灌溉; 黄瓜; 水分利用效率; 氮肥利用率

Water and nitrogen use efficiencies of cucumber under negatively pressurized fertigation

LI Sheng-ping¹, WU Xue-ping^{1*}, LONG Huai-yu¹, ZHANG Shu-xiang¹, WANG Xiang-ling¹, LIANG Guo-peng¹,
GAO Li-li¹, LI Jing¹, WANG Bi-sheng¹, HAO Xiu-chai², LI Jian-bo², ZHANG Sheng-ai²

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2 Extension Centre of Agricultural Technology, Shijiazhuang, Hebei 052160, China)

Abstract: 【Objectives】 This study aimed to search suitable combination of irrigation and fertilizer through the distribution of nitrate nitrogen and water and nitrogen use efficiencies of cucumber. 【Methods】 A complete two factor pot experiment was conducted. Irrigation included five levels: 0, -5, -10, -15 kPa and conventional irrigation, recorded as W1, W2, W3, W4 and CK in turn; N input rates of 0 (N0) and 0.3 g/kg soil(N1) were

收稿日期: 2016-05-13 接受日期: 2016-10-27

基金项目: 国家“863”计划(2013AA102901); 国家重点研发计划支持项目(2016YFD0201001); 国家科技支撑计划(2015BAD22B03)资助。

作者简介: 李生平(1991—), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 15652036734@163.com

* 通信作者 E-mail: wuxueping@caas.cn

included in each water treatment. Soil water and nitrate nitrogen contents were investigated in different depth and different growing stages, the water and nitrogen use efficiencies of cucumber were calculated. **【 Results 】** Water supply was highly significant and positively correlated with the water consumption of cucumber in all the treatments ($y = 0.96x + 3.4$, $R^2 = 0.99$, $P < 0.01$), so the water supply in the negatively pressurized irrigation system was dominated by the crop water consumption, and in this way the system was able to keep a balance between water consumption and water supply. The average soil water content was significantly affected by water supply pressure. The soil water contents under irrigation pressure of 0, -5, -10 and -10 kPa were respectively 28.7%, 22.7%, 20.0% and 15.6%, and the soil water contents were stable with the coefficient of variation less than 0.1 during cucumbers growth period. The negatively pressurized fertigation system could extremely increase distribution uniformity of soil water and nitrogen within 0–25 cm soil layer. The average coefficient of variation (*CV*) of the vertical distribution of soil nitrate was decreased by 58.6%–71.2% compared with CK. Compared with the N0 treatment, the plant dry weight, yield and water use efficiency under N1 treatment were respectively increased by 4.6%–256.1%, 12.6%–196.6% and 7.76%–86.27% at the same water supply pressure of the fertigation system. Under treatment of W2 (-5 kPa), the average plant dry weight and yield were all the highest, which were 153 and 1406 g/pot respectively, and the water and nitrogen use efficiencies were increased by 136.8% and 52.32% respectively. **【 Conclusions 】** The negatively pressurized fertigation system shows advantages in steady and timely water supply, and even nitrate distribution in 0–20 cm soil layer during the whole growing season of cucumber than conventional irrigation system. The optimal water supply pressure was the negative pressure of -5 kPa for cucumber.

Key words: negative pressurized fertigation; cucumber; water use efficiency; nitrogen use efficiency

作物高产与资源高效利用, 是目前学术界研究的热点问题^[1-6]。采用先进的灌水技术、合理管理水肥、有效提高水肥利用效率^[7], 是保障设施蔬菜可持续发展的关键^[8]。负压灌溉是一种将灌水器埋于地下的新型自动补给节水灌溉技术, 该系统无需动力加压设备, 通过控制系统的供水负压, 可以实现作物对水分的连续自动获取, 有效降低了水分棵间蒸发和渗漏, 水分利用效率得到极大的提高, 节水又高效^[9]。王相玲等^[10]采用新型负压灌溉装置, 通过网室盆栽试验研究了不同供水负压对小白菜产量品质的影响, 研究表明适宜供水负压能显著提高小白菜的产量、改善品质。也有学者通过研究不同供水条件下负压灌溉对盆栽玉米^[11]、黄瓜^[12-13]和裸燕麦^[14]等作物生长发育的影响, 表明负压灌溉条件下适宜的供水负压可以显著提高作物的水分利用效率。

水肥一体化是提高水分、养分利用效率, 促进作物增产的重要手段^[15]。与畦灌冲肥相比, 设施黄瓜采用水肥一体化滴灌技术具有较好的节水节肥效果, 能够提高黄瓜产量和水分利用率^[16]。邢英英等^[17]通过研究水肥耦合对温室番茄水氮利用效率的影响, 得出滴灌水肥一体化施肥技术比常规灌溉增加番茄产量 31.04 t/hm², 水分利用效率和氮肥利用效率分别增加 46.4% 和 76.5%。李静等^[18]研究表明不同的

灌水量与施氮量对滴灌条件下的温室黄瓜有显著性影响, 其产量随着灌水量的增加而增加, 且最大产量在高水高氮获得, 但其水分利用效率和灌溉水利用效率明显小于中水处理。近年来, 水肥一体化技术在滴灌和微灌方面得到了较快发展^[19-20], 但在负压灌溉方面的应用鲜有报道。

前人对负压灌溉的研究大多局限于供水水头单一因素对作物生长、生理特性及产量和品质的研究^[10-12], 而对水氮双因素作用下土壤水氮分布与作物氮肥利用的研究报道较少。为此, 本试验采用新型负压灌溉水肥一体化系统, 研究了不同水氮处理对土壤水分在黄瓜生育期内变化动态、土壤硝态氮的空间分布特征及水氮利用效率的影响, 探讨了系统供水与黄瓜耗水之间的定量化关系, 以为负压灌溉水肥一体化系统的应用和管理提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验采用中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研发的一种新型负压灌溉系统, 于 2015 年 6~10 月在中国农业科学院遮雨网室内进行, 试验地

位于东经 116.3°, 北纬 39.9°, 属于典型的暖温带半湿润大陆性气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 年平均气温 10~12°C, 年无霜期 180~220 d。供试作物为一代杂交品种“中农 106 号”。供试土壤为中国农业科学院廊坊国际高新技术产业园的表层土 (0—20 cm), 土壤为潮土, 质地为砂壤土, 土壤容重为 1.44 g/cm³, 田间持水量为 25.7% (质量百分比), 有机质含量为 10.04 g/kg, 全氮为 0.61 g/kg, 硝态氮、铵态氮、速效钾、速效磷分别为 51.71、6.88、112.33、21.48 mg/kg, pH 值为 8.28。试验用长 41.5 cm、宽 25 cm、高 25 cm 的长方体塑料盆, 每盆装过 2 mm 筛的土 30 kg。

试验为双因素随机设计, 设 5 个供水处理: 0 kPa (W1)、-5 kPa (W2)、-10 kPa (W3)、-15 kPa (W4)、常规灌溉 (CK), 其中常规灌溉采用浇灌并利用称重法 (每 2 天对整个盆进行称重) 使土壤相对含水量保持在 80%~90% 范围内。5 个供水压力下设不施氮 (N0) 和施氮 0.3 g/kg 土 (N1), 共 10 个处理: W1N0、W2N0、W3N0、W4N0、CKN0、W1N1、W2N1、W3N1、W4N1、CKN1。每个处理 6 次重复, 共 60 盆。各处理磷、钾肥用量相同, P₂O₅ 用量为 0.2 g/kg、K₂O 用量为 0.3 g/kg。供试肥料为尿素、过磷酸钙与硫酸钾, 其中 40% 的氮肥和钾肥作为基肥、60% 的氮肥和钾肥作为追肥。负压灌溉在结果初期 (8 月 14 日)、结果盛期 (8 月 28 日) 和结果末期 (9 月 11 日) 平均分 3 次将肥料按一定浓度加入供水桶, 施氮处理施肥浓度为尿素 0.38 g/L、硫酸钾 0.34 g/L, 不施氮处理施肥浓度为硫酸钾 0.34 g/L 进行追肥, 磷肥全部作为基肥施入。常规灌溉的肥料用量和施肥时间与负压灌溉相同, 并将尿素和硫酸钾溶于灌溉水中进行浇灌。6 月 24 日对黄瓜进行育苗, 7 月 8 日黄瓜 2 叶一心时进行定植, 一盆一株。

1.2 灌溉设备

图 1 为负压控水盆栽装置示意图, 该系统由灌水器、输水管、储水桶和负压发生器 4 部分组成, 其中本试验采用的灌水器 (A) 是一种“透水不透水”的陶土管 (内径 11 mm, 外径 18 mm, 长 250 mm), 埋入土壤表面以下 10 cm 处, 并且将其置于盆中间处, 储水桶上面安装有水位管用于测量桶内水位 h_1 的变化。负压发生器主要由 3 部分组成 (电磁阀、控压开关和气体罐), 控压开关用于设置一定的压强, 当气体罐中的压强达到控压开关设定的负压值而继续下降时, 控压开关触发电磁阀, 使得外界一定量空气进入气体罐, 当罐内压强达到控压开关设置值时, 电磁阀关闭, 由此保证气体罐内部压强稳定。由于整个装置是密封的且 C 到 D 段管道和气体罐中充满空气, 因此气体罐中所设置的压强 $P_{\text{设}} = P_D = P_C = P_B = P_A$, 其中 P_A 为陶土管内部的压强。依据土壤水动力学原理, 将陶土管埋于土壤中, 依靠土壤与陶土管之间的水势梯度差, 陶土管中的水流进入土壤, 储水桶中的水位 h_1 下降, 导致桶内压强减小, 当小于一定压强时, 负压发生器中的气体进入储水桶, 使得整个系统压强维持一个动态平衡状态^[21]。其中把 $P_{\text{设}}$ 的值称为供水水头, 通过改变 $P_{\text{设}}$ 的值来控制土壤含水量的多少。

1.3 取样与分析方法

1) 日供水量测定: 在黄瓜生育期内每天下午六点读取供水桶上的水位刻度。

2) 生育期内土壤含水量测定: 每天 5:00~6:00 pm 用 TZS-1K 型 (浙江托普仪器有限公司) 土壤水分速测仪对土壤含水量进行测量。

3) 不同时期黄瓜耗水量 (ET_i) 按下式计算:

$$ET_i = M_i - (W_i - W_{i-1}) \quad (1)$$

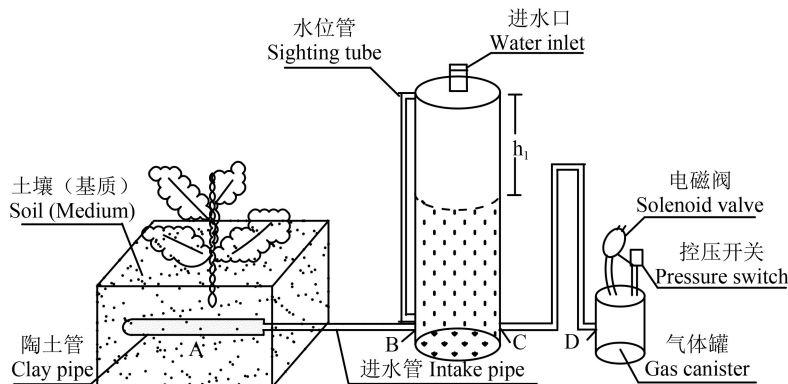


图 1 负压供水盆栽装置示意图

Fig. 1 Sketch scheme of the negative pressure water supplying pot device

式中, ET_i 为第 i 时刻耗水量 (L); M_i 为第 i 时刻灌水量 (L), 由灌溉系统水位刻度读出; W_i 为第 i 时刻土壤储水量 (L); W_{i-1} 为第 i 上一时刻土壤储水量 (L), 其中土壤储水量 (L) = 盆内土质量 (kg) × 土壤质量含水量 (%)。

4) 土壤硝态氮测定: 在每次追肥前 1 天, 在距陶土头 5 cm 处, 分三层 (0—7 cm、7—14 cm、14—21 cm) 取样, 将所取新鲜土样放入冰箱, 最后供流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

5) 干物质测定: 将根、茎、叶、果分别放进烘箱保持 105℃ 杀青 30 min, 然后调恒温 75℃ 烘至恒重。

6) 植株全氮测定: 黄瓜拉秧期根、茎、叶三部分分别取样, 烘干粉碎, 过 0.5 mm 筛。烘干后的根、茎、叶、果经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后, 用凯氏法测定全氮含量。

1.4 数据计算与处理

土壤氮的空间分布状况: 用变异系数 CV 反映其离散分布状况和空间变异程度, 若 $CV \leq 0.1$ 为弱变异性, $0.1 < CV < 1$ 为中等变异性, $CV \geq 1$ 则为强变异性^[22], 按下式计算 (土壤含水量随时间变化的变异系数 CV 按同样的计算公式):

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (2)$$

$$S_x = \left\{ \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, S_x 为观测值的标准差; x_i 为盆中上、中、下三层土壤硝态氮含量; \bar{x} 为三层土壤硝态氮含量的均值; N 为盆中观测样点数。

水分利用效率 (kg/m^3) = 单株黄瓜果实鲜重

(kg)/单株黄瓜累计耗水量 (m^3) 的比值。

氮肥表观利用率^[23-24](%) = (施氮处理的氮吸收量 - 未施氮处理的氮吸收量)/氮肥用量 × 100%, 其中植株氮吸收量 = 茎含氮量 × 茎干重 + 根含氮量 × 根干重 + 叶含氮量 × 叶干重 + 果实含氮量 × 果实干重。

采用 Excel 2010 进行数据处理, Origin 8.5 软件绘图。方差分析采用 SAS 9.2 软件 ANOVA 过程处理, 并采用 Duncan method (邓肯新复极差法) 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 负压灌溉条件下黄瓜不同生育期土壤含水量变化特征

统计分析表明, 供水负压对同一时期土壤含水量变化有极显著影响 ($P < 0.01$), 而施氮水平对土壤含水量变化没有显著影响。由图 2 可以看出, 在同一施氮水平下随着供水负压减小, 土壤含水量减小, W1、W2 和 W3 处理的平均土壤质量含水量比 W4 处理分别提高 74.0%、46.8% 和 30.4%。同一供水负压下, 黄瓜整个生育期土壤含水量基本保持稳定, W1~W4 处理土壤含水量在 2 种施氮水平下随时间变化的平均变异系数 (CV) 依次分别为 0.011、0.043、0.058 和 0.061, 均属于弱变异。

2.2 负压灌溉条件下黄瓜累计耗水量特征

图 3 为两种施氮水平下 4 个负压供水处理的黄瓜累计耗水量与时间的关系曲线。分析可得, 供水 80 d 时, W1N1 和 W2N1 处理黄瓜累计耗水量比 W1N0 和 W2N0 分别高 56.6% 和 41.8%; W3N1 与 W3N0 处理无显著差异 ($P > 0.05$); 而 W4N1 处理比 W4N0 低 13.2%。这是因为供水负压较小时过低的土

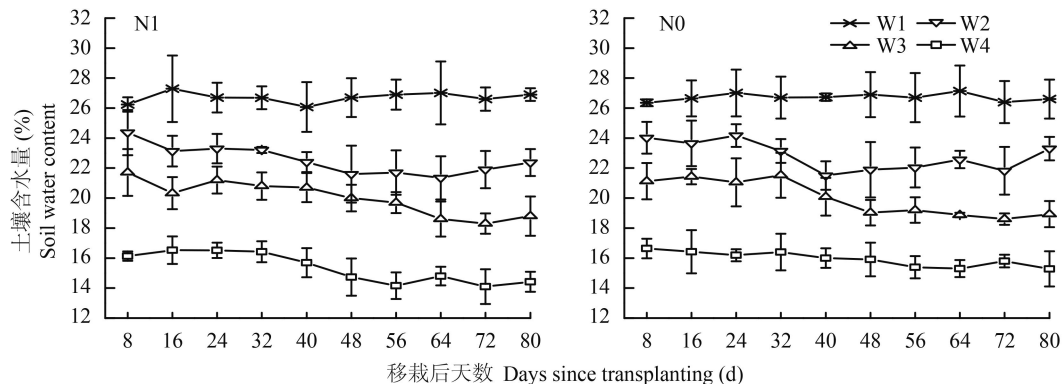


图 2 不同水氮处理黄瓜生育期内土壤含水量动态变化

Fig. 2 Changes of soil moisture contents under different water and nitrogen treatments during cucumber growth period

[注 (Note): 处理 W1~W4 表示灌溉负压分别为 0、-5、-10 和 -15 kPa.

The pressure in treatment W1-W4 was 0, -5, -10 and -15 kPa respectively.]

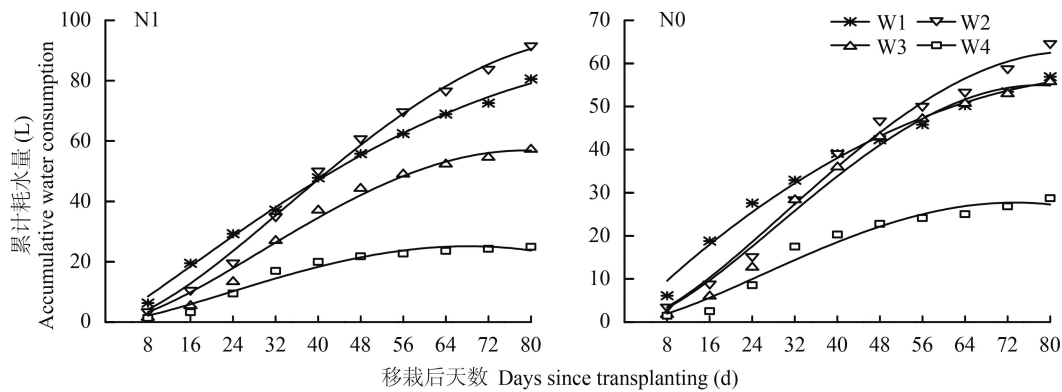


图3 黄瓜生育期不同处理累计耗水量

Fig. 3 Cumulative water consumption under different treatments during cucumber growth period

[注 (Note): 处理 W1~W4 表示灌溉负压分别为 0、-5、-10 和 -15 kPa.
The pressure in treatment W1~W4 was 0, -5, -10 and -15 kPa respectively.]

壤含水量在施氮条件下更不利于作物生长, 导致黄瓜耗水量减少。

在相同施氮条件下, 黄瓜累计耗水量随着系统供水负压的降低而减少, 为 $W2 > W3 > W4$, 然而 W1 处理的黄瓜累计耗水量在 0~40 d 大于 W2 处理, 在 40~80 d 小于 W2 处理。这是因为在过高的供水负压下, 过多的土壤含水量对黄瓜的生长造成了不利影响, 导致黄瓜生长后期耗水量减少。

在黄瓜整个生育期负压灌溉条件下累计耗水量随时间的变化趋势符合变形后的 Kostiakov 幂函数模型, 即 $Z = Kt^a + ct^2$, 式中, Z 为随时间变化的累计耗水量 (L); K , a , c 为参数; t 为供水时间 (d)。

对图 3 中不同供水负压下累计耗水量随时间变化的实测数据分别用变形后 Kostiakov 模型进行拟合, 可得到不同供水水头下累计耗水量与时间的变化关系 (表 1)。

表 1 累计耗水量与时间关系

Table 1 Correlations between the cumulative water consumption and time

处理 Treatment	N1		N0	
	拟合方程 Kostiakov model	R^2	拟合方程 Kostiakov model	R^2
W1	$Z = 0.739 t^{1.212} - 0.011 t^2$	0.99	$Z = 1.333 t^{0.967} - 0.006 t^2$	0.98
W2	$Z = 1.981 t^{1.988} - 1.867 t^2$	0.99	$Z = 0.356 t^{1.932} - 0.255 t^2$	0.98
W3	$Z = 1.878 t^{1.990} - 1.787 t^2$	0.98	$Z = 1.688 t^{1.989} - 1.598 t^2$	0.98
W4	$Z = 0.104 t^{0.379} + 0.155 t^2$	0.96	$Z = 0.161 t^{1.902} + 0.603 t^2$	0.95

注 (Note): 处理 W1~W4 表示灌溉负压分别为 0、-5、-10 和 -15 kPa. The pressure in treatment W1~W4 was 0, -5, -10 and -15 kPa respectively.

为了检验模型的拟合程度, 取显著性水平为 0.01, R^2 均大于临界相关系数 r_s (0.61), 表明变形后的 Kostiakov 模型能够很好地描述负压灌溉条件下累计耗水量随时间变化的关系。

2.3 负压灌溉条件下累计供水量与黄瓜耗水量的关系

由图 4 可知, 两种施氮水平下, 4 种供水水头的平均累计耗水量和累计供水量与时间的关系均符合变形后的 Kostiakov 幂函数模型, 即公式 1。累计耗水量和累计供水量随时间的变化趋势一致, 施氮处

理的平均累计耗水量和供水量高于不施氮处理。经分析表明, 2 种施氮水平 (N1 和 N0) 下, 累计供水量与累计耗水量的关系符合线性方程 $y = 0.96x + 3.4$ ($R^2 = 0.99$), 这说明负压灌溉条件下随着黄瓜耗水量增加, 系统供水量也增大, 作物耗水是负压灌溉系统自动供水的主动动力。

2.4 不同供水处理对土壤 NO_3^- -N 含量的影响

由表 2 知, 黄瓜各生育时期随着供水负压的降低, 在整个盆中土壤 NO_3^- -N 的残留量 (盆中 3 层土壤 NO_3^- -N 含量的平均值) 增大, 为 $W1N1 < W2N1 <$

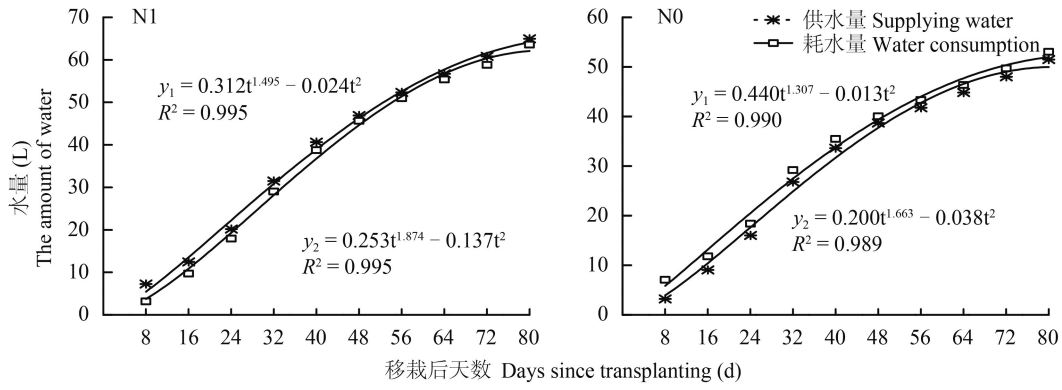


图 4 平均累计耗水量和供水量与时间的关系

Fig. 4 Relationship between the mean of accumulative water consumption and supplying water and time

[注 (Note): y_1 、 y_2 和 t 分别表示累计供水量, 累计耗水量和时间
 y_1 , y_2 and t separately mean accumulative supplying water, accumulative water consumption, and time.]

表 2 不同处理不同土层深度土壤 NO_3^- -N 含量

Table 2 NO_3^- -N contents in different soil depth under different treatments

指标 Index	土层 (cm) Soil depth	处理 Treatment	取样日期 Sampling date (m/d)			
			8/14	8/27	9/11	9/30
硝态氮含量 NO_3^- -N content (mg/kg)	0—7	CKN1	22.67 ± 3.87 c	40.39 ± 3.35 b	37.59 ± 3.05 b	42.88 ± 37.59 c
		W1N1	37.29 ± 3.05 b	46.16 ± 4.38 b	58.26 ± 5.14 b	71.21 ± 6.73 b
		W2N1	68.67 ± 3.14 a	85.49 ± 7.41 a	115.26 ± 8.71 a	136.55 ± 6.25 a
		W3N1	67.01 ± 2.79 a	76.73 ± 7.81 a	116.26 ± 9.99 a	136.86 ± 8.01 a
	7—14	W4N1	65.67 ± 3.14 a	78.49 ± 7.04 a	124.93 ± 9.68 a	147.88 ± 8.01 a
		CKN1	49.59 ± 4.89 a	47.34 ± 3.01 c	76.73 ± 6.25 b	97.55 ± 8.77 b
		W1N1	31.92 ± 3.54 b	33.34 ± 3.78 d	31.39 ± 3.07 d	44.88 ± 4.34 c
		W2N1	44.59 ± 3.84 a	74.34 ± 4.75 b	84.16 ± 5.14 ab	94.21 ± 6.62 b
	14—21	W3N1	51.61 ± 4.54 a	70.01 ± 5.94 b	58.06 ± 5.12 c	106.88 ± 9.25 b
		W4N1	52.92 ± 4.45 a	86.34 ± 4.90 a	92.73 ± 8.98 a	125.21 ± 10.23 a
		CKN1	71.67 ± 5.51 a	112.16 ± 9.83 a	128.70 ± 9.97 a	144.67 ± 11.37 b
		W1N1	29.78 ± 2.64 c	44.49 ± 3.83 c	32.37 ± 2.27 c	57.67 ± 3.51 d
变异系数 CV		W2N1	60.10 ± 5.29 b	81.16 ± 6.73 b	93.03 ± 9.06 b	104.10 ± 6.08 c
		W3N1	62.92 ± 6.28 b	84.49 ± 5.83 b	109.03 ± 9.19 b	153.33 ± 9.71 b
		W4N1	68.67 ± 6.43 ab	107.83 ± 9.56 a	135.7 ± 9.95 a	179.33 ± 15.69 a
		CKN1	0.55 a	0.56 a	0.57 a	0.54 a
	W1N1	0.18 b	0.17 b	0.29 c	0.26 b	
	W2N1	0.23 b	0.12 b	0.21 d	0.20 c	
	W3N1	0.10 c	0.14 b	0.38 b	0.17 c	
	W4N1	0.11 c	0.17 b	0.21 d	0.15 c	

注 (Note): 表中数据为平均值 ± 标准差; 同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Data in table are mean ± standard deviation; values followed by different letters within same column mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.

W3N1 < W4N1; W1N1、W2N1、W3N1 和 W4N1 处理 9 月 30 日的土壤 NO_3^- -N 残留量比 8 月 14 日分别

高 76.9%、91.0%、119.3% 和 141.6%, 这说明过低的供水负压会抑制黄瓜根系对土壤 NO_3^- -N 的吸收。

处理 W1N1、W2N1、W3N1 和 W4N1 土壤 NO_3^- -N 含量沿垂直方向的平均变异系数分别为 0.23、0.19、0.20 和 0.16，为中等变异，并且显著低于 CKN1 处理，说明负压灌溉水肥一体化能显著提高土壤中 NO_3^- -N 分布的均匀性。

2.5 不同处理对黄瓜干物质积累、产量和水、氮利用效率的影响

表 3 的统计结果表明，灌溉、施氮和 2 因素的交互作用均对黄瓜植株干重、产量、水分利用效率有极显著影响 ($P < 0.01$)，灌溉对黄瓜氮肥表观利用率有极显著影响 ($P < 0.01$)。

在同一供水处理下，施氮处理 (N1) 黄瓜植株干物质质量和产量比不施氮处理 (N0) 分别提高了 4.6%~256.1% 和 12.6%~196.6%；供水负压为 0 kPa、-10 kPa、-15 kPa 施氮处理 (N1) 黄瓜水分利用效率比不施氮处理 (N0) 高 7.76%~86.27% (-5 kPa 处理无显著差异)。

在同一施氮水平下，负压灌溉条件下的黄瓜水分利用效率均显著高于常规灌溉，其中 W1N1、W2N1、W3N1 和 W4N1 处理的平均水分利用效率分别是常

规灌溉 (CKN1) 的 1.61、2.36、2.55 和 2.38 倍；随着供水负压的降低，黄瓜氮肥表观利用率呈降低趋势，其中处理 W1N1、W2N1 和 W3N1 的氮肥表观利用率分别比处理 CKN1 的提高了 59.28%、52.32% 和 23.66%，而处理 W4N1 的氮肥表观利用率比处理 CKN1 的降低了 55.45%。黄瓜植株平均干重和产量均在供水水头为 -5 kPa (W2) 时为最高，分别为 153 g/pot 和 1406 g/pot，这说明适宜的供水负压能显著提高黄瓜产量和干重。施氮条件下 W4N1 处理的黄瓜植株干重和产量最低，而不施氮条件下黄瓜干重最低值出现在 W1N0 处理，产量最低值出现在 W1N0 和 W4N0 处理，表明负压灌溉条件下氮肥适宜而水分不足 (W4N1) 或供水充足而供氮不足 (W1N0) 均不利于黄瓜的干物质积累和产量提高，只有水氮供应适宜，才有利于产量提高。

3 讨论

3.1 负压灌溉系统的供水机制与性能

负压灌溉是一种无需动力加压设备的亚表层灌溉技术^[25]。将一种“透水不透气”的灌水器埋入土壤^[9]，

表 3 不同水氮处理对干物质积累、产量和水氮利用率的影响

Table 3 Effects of different water and nitrogen conditions on dry mass accumulation, yield and water and nitrogen use efficiencies

处理 Treatment	植株干重 (g/pot) Plant dry weight	产量 (g/pot) Yield	氮肥表观利用率 (%) NAE	水分利用效率 (kg/m ³) WUE
CKN1	133.93 ± 2.66 b	916.00 ± 15.17 c	24.56 ± 3.06 c	7.51 ± 0.30 d
W1N1	116.39 ± 7.30 c	1071.66 ± 68.64 b	39.12 ± 1.63 a	14.79 ± 0.49 c
W2N1	164.02 ± 9.40 a	1550.97 ± 85.24 a	37.41 ± 3.18 a	16.48 ± 1.22 b
W3N1	139.15 ± 3.64 b	1099.85 ± 50.70 b	30.37 ± 2.37 b	18.74 ± 1.44 a
W4N1	64.75 ± 1.55 d	455.54 ± 11.49 d	10.94 ± 0.97 d	19.92 ± 0.33 a
CKN0	96.27 ± 2.05 b	805.24 ± 49.13 c		6.66 ± 0.49 c
W1N0	32.68 ± 1.09 d	361.33 ± 27.68 d		7.94 ± 1.05 c
W2N0	142.26 ± 8.27 a	1262.11 ± 27.84 a		16.93 ± 1.63 a
W3N0	102.59 ± 4.24 b	881.51 ± 32.23 b		17.39 ± 0.86 a
W4N0	61.88 ± 0.81 c	404.74 ± 25.23 d		13.80 ± 1.00 b
显著性检验 (<i>F</i> 值) Significance test (<i>F</i> value)				
W	311.75**	379.08**	56.46**	175.07**
N	389.43**	277.85**		87.26**
W × N	52.26**	49.33**		22.09**

注 (Note): NAE—Nitrogen fertilizer apparent utilization efficiency; WUE—Water use efficiency; 表中数据为平均值 ± 标准差, 同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Data in table are mean ± standard deviation; values followed by different letters within same column mean significant differences among the treatments at the 0.05 level. *, ** 分别表示差异显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$) Means significant differences at 0.05 and 0.01 levels.

通过非饱和土壤基质势与灌溉系统中形成的水势差^[26], 灌溉水直接入渗到根际土壤。与其他灌溉方式相比, 负压灌溉通过作物的蒸发蒸腾使得根系土水势下降, 产生系统与土壤之间的水势差, 系统开始供水, 进而实现了作物对水分的连续自动获取^[10], 是一种主动式供水过程。由图 3 可知, W1 处理的黄瓜累计耗水量在 0~40 d 大于 W2 处理, 在 40~80 d 小于 W2 处理, 这是因为 W2 处理黄瓜长势优于 W1 处理, 生育后期黄瓜的需水量增大, 这说明在适宜的供水负压下负压灌溉可以根据黄瓜各生育时期的需水量来进行适时适量供水。本研究还表明, 在同一施肥条件下黄瓜累计耗水量与系统累计供水量存在极显著 ($P < 0.01$) 线性关系 $y = 0.96x + 3.4$ ($R^2 = 0.99$), 进一步揭示了负压灌溉系统作物主动式吸水与土壤水平衡供应机制, 可以根据作物耗水量进行精准灌溉, 为作物生长创造良好的土壤和水分环境。

本研究结果表明, 在同一供水负压下土壤含水量在黄瓜整个生育期波动很小, 负压供水系统能够保持黄瓜生长过程中自动控制与平稳供水, 而供水负压对土壤含水量有显著影响, 随着供水负压降低, 土壤含水量减小。当供水负压设定在 0、-5、-10 和 -15 kPa 时, 土壤平均含水量分别为 28.7%、22.7%、20.0% 和 15.6%。王相玲等^[10]研究表明, 负压值设定在 0~-20 kPa 时土壤含水量可以控制在 3.6%~29.5% 之间。林叶春等^[14]研究表明, 40 (-4 kPa)、60 (-6 kPa) 和 80 (-8 kPa) cm 控压管高度下平均土壤含水率分别为 (32.53±3.87)%、(20.90±6.70)% 和 (6.60±1.80)%。不同研究结果形成差异的原因可能是试验所用的土壤质地和灌水器型号不一致^[27]。因此, 在实际生产中为了满足作物不同时期的需水规律需要综合考虑灌水器型号、土壤质地和供水负压三方面的因素。

3.2 负压灌溉对作物水分利用效率的影响

本研究结果表明, 在 0、-5、-10 和 -15 kPa 供水负压下, 黄瓜的平均水分利用效率分别是常规灌溉的 1.61、2.36、2.55 和 2.38 倍。适宜的负压控制下, 负压灌溉可以显著提高作物水分利用效率。王相玲等^[10]研究表明, -5 kPa 和 -10 kPa 两个处理下油菜水分利用效率比传统灌溉分别提高了 55.5% 和 35.3%。李邵等^[28]研究表明, 负压灌溉下温室番茄水分利用效率比常规漫灌提高了 10.1%。其主要原因在于以下 4 个方面: 其一, 负压灌溉是一种主动供水方式, 利用植物水分生理特性和土壤张力特性, 实

现植物对水分连续自动获取, 与传统灌溉不同, 负压灌溉变人为的“被动灌溉”为植物获取的“主动吸水”^[25], 本试验结果表明, 系统供水量与作物耗水量完全同步, 说明负压灌溉能根据作物的需水规律, 适时、适量地为作物供水, 大大节约了用水; 其二, 负压灌溉系统能使灌溉下的土壤含水量呈非饱和状态, 抑制土表过度湿润导致的无效蒸发和地下渗漏^[29], 大大提高了水分利用效率; 其三, 负压灌溉系统是埋入土壤中的灌水器进行渗水灌溉, 各层的土壤含水率分布较均匀^[27], 有利于作物对水分的吸收利用; 其四, 传统灌溉造成的土壤水分过分饱和^[30]或土壤过分干燥^[31], 均不利于作物生长, 而负压灌溉能实现对土壤含水量的精准、持续和稳定控制^[32]。

3.3 负压灌溉条件下水肥一体化对作物氮肥利用率的影响

本研究结果表明, 与常规灌水施肥相比, 在适宜的负压控制范围内, 采用水肥一体化, 可以显著地提高黄瓜氮肥表观利用率, W1N1、W2N1 和 W3N1 处理的氮肥表观利用率比常规灌溉 CKN1 提高 59.3%、52.3% 和 29.37%。负压灌溉水肥一体化提高了作物氮肥利用率的主要原因: 1) 传统大水灌溉和施肥造成了大量土壤氮素盈余^[33]、硝态氮淋失^[34]和氨挥发^[35], 而负压灌溉水肥一体化作为一项将施肥与灌溉相结合的灌溉施肥技术^[36], 可以从数量和时间上精确控制灌溉量和施肥量, 有效控制水肥入渗深度, 提供适宜的养分供应浓度和强度, 使植株生长和水肥供应相协调, 从而显著降低氮肥损失; 2) 水肥一体化作为一项将施肥与灌溉相结合的灌溉施肥技术, 利用土壤 NO_3^- -N 随水移动的性质^[37-38], 使得氮肥随水均匀分布于作物根系附近^[39]。本试验结果表明, W1N1、W2N1、W3N1 和 W4N1 处理在整个黄瓜生育期土壤 NO_3^- -N 沿垂直方向的平均变异系数分别比 CKN1 处理降低了 58.6%、65.8%、64.0% 和 71.2%, 说明负压灌溉水肥一体化能显著提高土壤中 NO_3^- -N 分布的均匀性, 有利于作物对氮的吸收利用; 3) 漫灌使土壤水较快达到饱和或过饱和, 土壤团粒结构经大量灌溉水浸泡后, 容易遭到破坏, 土壤孔隙度减小^[40]。而负压灌溉是通过埋在地下的灌水器渗水, 借助土壤毛细管渗吸作用慢慢地将灌溉水扩散到灌水器周围^[27], 对土壤团粒结构破坏的程度较小, 能保持表土的疏松状态, 使土壤水、气、热相对协调^[38], 有利于养分的转化与吸收利用^[41], 进一步

提高黄瓜的氮肥利用效率; 4) 传统漫灌施肥短时间大水灌溉会进一步降低根系代谢活动, 不利于根系吸收养分。相比而言, 小幅高频灌溉施肥降低了对作物的冲击, 使其成为一个相对稳定的生产体系^[33]。

4 结论

1) 负压灌溉条件下, 系统累计供水量与黄瓜累计耗水量存在极显著线性关系 $y = 0.96x + 3.4$ ($R^2 = 0.99$, $P < 0.01$), 保持在适宜的供水负压进行灌溉可以实现对黄瓜进行适时适量供水。

2) 负压灌溉可以保持系统供水的稳定性。当供水负压设定在 0、-5、-10 和 -15 kPa 时, 土壤平均质量含水量分别为 28.7%、22.7%、20.0% 和 15.6%, 并且整个黄瓜生育期土壤含水量的变化属于弱变异 (变异系数 $CV \leq 0.1$)。

3) 负压灌溉能显著提高 0—25 cm 土壤硝态氮分布的均匀性。在整个黄瓜生育时期, 水分供应压力在 0、-5、-10 和 -10 kPa 时, 土壤硝态氮沿垂直方向的平均变异系数分别比常规水压处理降低了 58.6%、65.8%、64.0% 和 71.2%。

4) 适宜的负压灌溉能显著提高黄瓜产量和水、氮利用效率。当供水负压为 -5 kPa 时, 黄瓜平均水分利用效率和氮肥表观利用率分别比常规灌溉提高了 136.8% 和 52.32%, 并且黄瓜植株平均干重和产量均为最高, 分别为 153 g/pot 和 1406 g/pot。综合分析不同水氮处理对黄瓜产量和水氮利用效率的影响, 推荐本试验条件下, 适宜黄瓜生长的负压灌溉系统供水负压为 -5 kPa。

参考文献:

- [1] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality[J]. *Annual Review of Environment and Resource*, 2003, 28(12): 315–358.
- [2] Tilman D K, Cassman K G, Matson P A. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–678.
- [3] 程建峰, 戴廷波, 曹卫星, 等. 不同类型水稻种质氮素营养效率的变异分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 175–183.
Cheng J F, Dai T B, Cao W X, *et al.* Variations of nitrogen nutrition efficiency in different rice germplasm types [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 175–183.
- [4] 殷春渊, 魏海燕, 张庆, 等. 不同氮肥水平下中熟籼稻和粳稻产量、氮素吸收利用差异及相互关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(2): 348–355.
Yin C Y, Wei H Y, Zhang Q, *et al.* Differences and correlations in grain yield, N uptake and utilization between medium-maturing indica and japonica rice under different N fertilizer levels [J]. *Acta*

Agronomica Sinica, 2009, 35(2): 348–355.

- [5] Sun L J, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Interactions of water and nitrogen addition on soil microbial community composition and functional diversity depending on the inter-annual precipitation in a Chinese steppe[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 788–799.
- [6] Chauhan B S, Abugho S B. Effects of water regime, nitrogen fertilization and rice plant density on growth and reproduction of lowland weed *Echinochloa crus-galli*[J]. *Crop Protection*, 2013, 54(12): 142–147.
- [7] 光永, 郑耀泉. 地理点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J]. *水利学报*, 1996, (11): 47–51.
Guang Y, Zheng Y Q. Optimal design of branch distribution pipe network[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, (11): 47–51.
- [8] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 631–638.
Huang D F, Wang G, Li W H, *et al.* Effect of using different kinds of fertilization modes on growth of vegetable[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 631–638.
- [9] 雷廷武, 江培福, Vincent F Bralts, 等. 负压自动补灌原理及可行性试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298–302.
Lei T W, Jiang P F, Bralts V F, *et al.* Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298–302.
- [10] 王相玲, 武雪萍, 肖海强, 等. 负压灌溉对土壤水分与小白菜产量品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(z1): 64–68.
Wang X L, Wu X P, Xiao H Q, *et al.* Effects of negative pressure irrigation on soil moisture content, yield and quality of cabbage [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(z1): 64–68.
- [11] 许高平, 王璞, 薛绪掌, 等. 负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 148–156.
Xu G P, Wang P, Xue X Z, *et al.* Experiment on water use efficiency and yield of different plant type of potted maize under negative pressure water control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 148–156.
- [12] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头供水控水盆栽装置及灌溉系统的研究与应用 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2008, 26(5): 478–482.
Li S, Xue X Z, Guo W S, *et al.* Study and application of negative pressure water supplying, controlling pot device and irrigation system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2008, 26(5): 478–482.
- [13] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 376–381.
Li S, Xue X Z, Guo W S, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on yield and water use efficiency in greenhouse potted cucumber[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 376–381.
- [14] 林叶春, 钱欣, 曾昭海, 等. 负水头供水裸燕麦需水特性及其对不同土壤湿度的生理响应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 93–99.
Lin Y C, Qian X, Zeng Z H, *et al.* Water consumption property of naked oat irrigated by negative pressure water supplying equipment and its physiological responses to soil humidity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16):

- 93-99.
- [15] 郑彩霞, 张富仓, 贾运岗, 等. 不同滴灌量对土壤水氮运移规律研究[J]. 水土保持学报, 2014, (6): 167-170.
Zheng C X, Zhang F C, Jia Y G, *et al.* Experimental study on soil water and nitrogen migration law under different drip fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, (6): 167-170.
- [16] 于舜章. 山东省设施黄瓜水肥一体化滴灌技术应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 173-176.
Yu S Z. Application of drip irrigation of integral control of water and fertilization for cucumber under protected cultivation in Shandong province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(6): 173-176.
- [17] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.
Xing Y Y, Zhagn F C, Zhang Y, *et al.* Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia, Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713-726.
- [18] 李静, 张富仓, 方栋平, 等. 水氮供应对滴灌施肥条件下黄瓜生长及水分利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, (22): 4475-4487.
Li J, Zhang F C, Fang D P, *et al.* Effects of water and nitrogen supply on the growth and water use efficiency of cucumber under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, (22): 4475-4487.
- [19] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 柑橘园水肥一体化滴灌自动控制装置的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10):91-97.
Li J N, Hong T S, Feng R Y, *et al.* Development of automatic control device for integrated water and fertilization drip irrigation of citrus orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 91-97.
- [20] 袁洪波, 程曼, 庞树杰, 等. 日光温室水肥一体灌溉循环系统构建及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, (12):72-78.
Yuan H B, Chen M, Pang S J, *et al.* Construction and performance experiment of integrated water and fertilization irrigation recycling system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, (12): 72-78.
- [21] 刘胜尧, 范凤翠, 李志宏, 等. 咸水负压渗灌对番茄生长和土壤盐分的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 108-117.
Liu S Y, Fan F C, Li Z H, *et al.* Effects of negative pressure irrigation with saline water on tomato yield and soil salt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 108-117.
- [22] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York, USA: Academic Press, 1980.
- [23] Thompson T L, White S A, Walworth J, *et al.* Fertigation frequency for subsurface drip-irrigated broccoli [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 910-918.
- [24] 刘玉春, 李久生. 毛管理深和层状质地对番茄滴灌水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 7-12.
Liu Y C, Li J S. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrogen use efficiency of drip irrigated tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 7-12.
- [25] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎, 等. 负水头灌溉原理与装置[J]. 农业工程学报, 2007, (11): 17-22.
Zou C W, Xue X Z, Zhang R D, *et al.* Principle and equipment of negative pressure irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, (11): 17-22.
- [26] 江培福, 雷廷武, Vincent F Bralts, 等. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 19-22.
Jiang P F, Lei T W, Bralts V F, *et al.* Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 19-22.
- [27] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 供水吸力对温室黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 337-345.
Li S, Xue X Z, Guo W S, *et al.* Effects of water supply tension on yield and water use efficiency of greenhouse cucumber [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2): 337-345.
- [28] 李邵, 薛绪掌, 郭文善, 等. 负水头灌溉对温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2008, (S2): 225-229.
Li S, Xue X Z, Guo W S, *et al.* Effects of negative pressure irrigation on the growth, yield and quality of tomato in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, (S2):225-229 .
- [29] Ohaba M, Shibusawa S, Hosoya H. Rhizosphere moisture modulation by water head precision control[R]. The 10th International Conference on Precision Agricultural, 2010.
- [30] 裴芸, 别之龙. 塑料大棚中不同灌水量上限对生菜生长、品质及生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 176-180.
Pei Y, Bie Z L. Effects of different irrigation maxima on growth, quality and physiological characteristics of lettuce in plastic greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 176-180.
- [31] 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.
Pei Y, Bie Z L. Effect of different irrigation minima on the growth and physiological characteristics of lettuce under plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 207-211.
- [32] 毛思帅, M Robiul Islam, 薛绪掌, 等. 保水剂和负压供水对玉米生理生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 82-88.
Mao S S, Islam M R, Xue X Z, *et al.* Effects of water-retaining agent and water supply tension on physiology, growth and water use efficiency of corn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 82-88.
- [33] 樊兆博, 林杉, 陈清, 等. 滴灌施肥对设施番茄水氮利用效率及土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(1):135-143.
Fan Z B, Lin S, Chen Q, *et al.* Effect of drip fertigation on water and nitrogen use efficiency and nitrate residues in a greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(1): 135-143.
- [34] 张学军, 任发春, 赵营, 等. 引黄灌区设施菜田硝态氮淋失的季节性特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, (10): 1964-1972.
Zhang X J, Ren F C, Zhao Y, *et al.* Seasonal changes of nitrate leaching in greenhouse vegetable field in Yellow River irrigation region of Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science,

- 2014, (10): 1964–1972.
- [35] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836–845.
Hou Y P, Han L G, Kong L L, *et al.* Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application does[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 836–845.
- [36] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 滴灌氮肥用量对设施菜地硝态氮含量及环境质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1642–1651.
Li R N, Wu X P, Zhang Y C, *et al.* Nitrate nitrogen contents and quality of greenhouse soil applied with different N rates under drip irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1642–1651.
- [37] 高茹, 李裕元, 杨蕊, 等. 亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 839–852.
Gao R, Li Y Y, Yang R, *et al.* Study on nitrate leaching characteristics in arable soils in subtropical region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 839–852.
- [38] 戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956–965.
Dai J, Wang Z H, Li Q, *et al.* Effect of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 956–965.
- [39] 孙伟, 张玉龙, 虞娜, 等. 不同渗灌方法和氮肥用量对保护地黄瓜产量及氮肥利用率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2): 157–163.
Sun W, Zhang Y L, Yu N, *et al.* Effects of subsurface irrigation methods and different nitrogen application amounts on cucumber yield and nitrogen use efficiency in protected field [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(2): 157–163.
- [40] 高鹏, 李增嘉, 杨慧玲, 等. 渗灌与漫灌条件下果园土壤物理性质异质性及其分形特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 155–158.
Gao P, Li Z J, Yang H L, *et al.* Physical property heterogeneity and fractal characteristics of soil particle in orchard under subsurface irrigation and flood irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 155–158.
- [41] Singandhupe R B, Rao G G S N, Patil N G, *et al.* Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 327–340.
- [42] 姬景红, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮矿化特性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 869–877.
Ji J H, Zhang Y L, Zhang Y L, *et al.* Effect of irrigation methods on mineralization of soil organic nitrogen in protection field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 869–877.