

文章编号: 1007-4929(2020)04-0027-06

施氮和加气灌溉对黄瓜根区土壤环境及产量的影响

崔冰晶^{1,2}, 牛文全^{1,2,3}, 杜娅丹^{1,2}, 张倩^{1,2}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了揭示施氮和加气灌溉对根区土壤环境及黄瓜产量的影响, 以为加气灌溉条件下黄瓜合理施肥、土壤环境改善和作物增产提供一定的理论基础与科学依据。本试验以黄瓜为供试作物, 设置 0、240、360 kg/hm² 3 个施氮水平和加气、不加气两种灌水模式, 共 6 个处理。结果表明, 与不加气地下滴灌相比, 加气灌溉下土壤 O₂ 含量提高 2.0%, 土壤温度和充气孔隙度略有增大, 土壤呼吸显著提高了 25.2% ($P < 0.05$), 黄瓜的水分利用效率也有所提高, 改善了黄瓜根区土壤环境。此外, 在施氮量为 240 kg/hm² 时进行加气灌溉, 为作物根区土壤提供了充足的氮肥供应和良好的水气配合, 使土壤中水、肥、气、热达到相对最优平衡状态, 对黄瓜土壤呼吸、土壤温度以及水分利用效率的促进作用更为明显, 黄瓜产量达到 72266 kg/hm², 显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。

关键词: 加气灌溉; 土壤环境; 施氮; 水分利用效率; 黄瓜产量

中图分类号: S627; S652; S154.1 文献标识码: A

Effects of Nitrogen Application and Aerated Irrigation on Soil Environment and Yield in Cucumber Root Area CUI Bing-jing^{1,2}, NIU Wen-quan^{1,2,3}, DU Ya-dan^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reveal the effects of the application of nitrogen and aerated irrigation on soil environment and cucumber yield in the root zone area, so as to provide a theoretical basis and a scientific basis for reasonable fertilizer application of cucumber, the improvement of soil environment and the increase of crop yield under aerated irrigation, in this experiment, cucumber was used as a test crop, and 3 nitrogen application levels (0, 240, 360 kg/hm²) and two irrigation modes (aerated and unaerated) were set, with 6 treatments. The results showed that compared with traditional subsurface drip irrigation, the O₂ content in the soil under aerated irrigation increased by 2.0%, the soil temperature and aerated porosity slightly increased, the soil respiration significantly increased by 25.2% ($P < 0.05$), the water use efficiency of cucumber also increased, and the soil environment in the cucumber root area was improved. In addition, the aerated irrigation with N application rate of 240 kg/hm² provided sufficient nitrogen fertilizer supply and good water-gas mixture for the soil in the root zone of crops, made the water, fertilizer, gas and heat in the soil reach the relatively optimal equilibrium state, and promoted the respiration, soil temperature and water use efficiency of cucumber soil more obviously. The cucumber yield reached 72 266 kg/hm², which was significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$).

Key words: aerated irrigation; soil environment; nitrogen application; WUE; cucumber yield

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目(51679205)。

作者简介: 崔冰晶(1994-)女, 硕士研究生, 从事节水灌溉理论研究。E-mail: cbj123@nwfau.edu.cn。

通讯作者: 牛文全(1972-)男, 研究员, 主要从事节水灌溉理论研究、技术与设备开发。E-mail: nwq@nwfau.edu.cn。

0 引言

目前,随着蔬菜生产面积的不断扩大,设施栽培日益增多,截至2015年,我国设施栽培面积达410.9万 hm^2 ,总面积和总产量均居世界首位^[1]。设施生产的高度集约化、过度灌溉、农业机械碾压、过量施肥、少中耕等因素均导致土壤紧实,再加上施肥引起的土壤环境恶化问题日益严重,所以亟待加强这方面的研究。土壤紧实会造成根区低氧胁迫^[2],即使高效的地下滴灌也会出现至少短期的根区缺氧^[3]。根区低氧胁迫降低了土壤通气性,抑制了根系对养分的吸收^[4],限制了设施蔬菜产量的提升。改善土壤通气状况,能够有效调节土壤微生物活性、养分有效性,对改善土壤环境,提高土壤生产力有重要意义^[5]。而氮素是对土壤通气条件反应最敏感的元素之一,植物在根系生长发育、氮素利用过程中存在一定的根际溶氧量和氮素形态的互作效应^[6]。

土壤通气性的改善以及由此带来的根系吸收和运输功能的提高是作物增产的基础^[7]。前人研究表明,加气灌溉增加了根区氧浓度,改善植株生理功能,从而提高作物水分利用效率和产量^[8,9]。史春余^[10]等通过改善土壤孔隙度改善了土壤通气性,增强了甘薯块根中ATP酶活性,提高了产量。朱艳^[11]、雷宏军^[12]等人指出,加气灌溉能够使土壤呼吸加强,促进作物生长和养分吸收,提高作物产量和水分利用效率。因此,加气灌溉可改善农田生态小气候,配合以适宜的施氮量,使作物根系土壤的水、肥、气、热等环境协调同步,是进一步改善根区土壤环境,提高作物产量的一种有效途径。

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^[13]。目前,关于加气灌溉的研究多集中于番茄、马铃薯等作物的生长与土壤微生物影响方面,施氮和加气灌溉对土壤根区环境和作物产量的综合影响尚不明确。本试验以黄瓜为供试作物,设置不同的加气 and 施氮条件,旨在阐明加气与施氮耦合对土壤、产量及干物质的影响,期为加气滴灌条件下温室黄瓜合理施肥,改善土壤环境和生态效益提供一定的理论基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年3月24日至6月9日在陕西杨凌大寨乡的日光温室内进行(34°17'N、108°02'E),所处地理位置属半干旱偏湿润区,年均日照2163.8h,无霜期210d。温室东西走向,长×宽为108m×8m。土壤类型为壤土,1m土层内平均土壤干容重为1.34 g/cm^3 ,田间持水量为28.17%(质量含水率),pH值7.82。土壤颗粒组成:砂砾质量分数为25.4%,粉粒质量分数为44.1%,黏粒质量分数为30.5%。

1.2 实验材料与设计

供试黄瓜品种为乾德777,前茬种植番茄,采用穴盘育苗,2018年3月24日定植,6月9日拉秧,全生育期长78d。定植时黄瓜幼苗为3叶1心至4叶1心,缓苗时间7~10d,自2018年4月4日开始试验处理。黄瓜生育期划分如表1。试验小区长5.5m,宽3.5m,小区间隔0.5m。黄瓜按株距45cm,行距50

cm进行定植。试验采用地下滴灌方式进行灌溉,定植前在各小区中央铺设地下滴灌带1条(直径16mm,滴头间距30cm),滴灌管理深为15cm。将Mazzei287型文丘里加气设备(Mazzei Injector Company, LLC)安装在灌水支管的首端在灌水的同时进行加气,灌水时利用水泵形成加压灌溉水,将位于灌水总管道末端的调节阀控制进口和出口压力分别为0.1和0.02MPa,由排气法加气量占灌溉水量的17%^[11]。各处理灌水量相同,黄瓜整个生育期每隔10d灌水一次。

表1 黄瓜各生育期起止时间

Tab.1 Starting and ending time of different growth period for cucumber

生育期	开始时间	结束时间	时长/d
苗期	2018-03-24	2018-04-15	20~30
开花坐果期	2018-04-16	2018-05-01	10~25
盛瓜期	2018-05-02	2018-05-28	20~35
末果期	2018-05-29	2018-06-10	10~15

试验分别设置了加气 and 施氮2个因素,加气处理表示为I,不加气处理表示为CK。参照前人相关研究^[14]设置传统施氮 N_2 处理(施氮量为360 kg/hm^2), N_1 处理(传统施氮量的66%,施氮量为240 kg/hm^2)以及不施氮 N_0 处理3个水平。共计6个处理,每个处理3次重复。供试氮肥为尿素(含N质量分数 $\geq 46\%$),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 质量分数 $\geq 16\%$),钾肥为水溶性硫酸钾(含K质量分数 $\geq 52\%$)。其中磷钾肥全部基施,各氮肥处理小区将总氮量的40%作为基肥,剩余氮肥通过滴灌管在黄瓜生长盛期分3次等量追施。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气样的采集和分析

用静态箱-气相色谱法测定土壤 CO_2 排放通量。采样箱为密闭式静态箱,箱体长30cm,宽30cm,高55cm,由6mm厚的PVC材料制成。外侧包裹一层海绵和锡箔纸,避免取样时光照对箱体内温度的影响。定植当天在小区中央埋设静态箱底座,底座上口有3cm深的凹槽用以在采样时注水与静态箱密封。气样用带有三通阀的50ml塑料针筒进行采集,每底座采样4次,每次取气40mL,取样时间分别在关箱后0、10、20、30min采集,并在当天进行室内浓度分析。采样从黄瓜定植后14d开始,每7d左右采集1次,分别在4月7日、4月16日、4月23日、5月1日、5月7日、5月14日、5月21日和5月28日每天的09:00-11:00进行采样。

采集的气样用安捷伦气象色谱分析仪(Agilent Technologies 7890A GC System)分析 CO_2 的浓度。进而求得单位面积 CO_2 排放量,即土壤呼吸速率。 CO_2 排放通量计算公式为:

$$F = \rho h \frac{273}{273 + T} \times \frac{d_c}{d_i} \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为标准状态下的气体密度, g/cm^3 ; h 为箱体高度,m; d_c/d_i 为气体浓度变化率; T 为箱内温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.2 环境因子测定

每次采集气体的同时用安插在箱体顶部的水银温度计读

取箱内温度;用曲管地温计(河北省武强红星仪表厂)测定箱体周围 10 cm 土层的温度;打土钻利用铝盒取土烘干法测定 0~10 cm 和 0~20 cm 土层的质量含水量,计算出土壤充气孔隙度,即:

$$F_a = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} - \theta_v \quad (2)$$

式中: F_a 为土壤充气孔隙度,%; ρ_s 为土粒密度, g/cm^3 , 值为 2.65; ρ_b 为土壤干容重, g/cm^3 ; θ_v 为土壤体积含水率, %。

本试验中 F_a 是 0~20 cm 土壤的平均值。

土壤氧气含量利用光纤式氧气测量仪测定。测量时每个小区取 2 个固定点,分别插入氧气感应探针,探针插入深度为 10 cm,距离作物茎秆 5 cm。插入后将土壤封实,尽可能避免大气对土壤空气的影响。每次连测 5 min,将平均值作为土壤氧气含量。

1.3.3 植株生物量和产量的测定

在黄瓜成熟期每个处理随机选取 3 株,将茎、叶和果分装后放入烘箱,先在 105 °C 高温条件下杀青 30 min,之后将烘箱温度调至 75 °C 烘干至恒重,用电子天平称重(精度为 0.01 g)。果实成熟后,每个处理小区黄瓜每次采收的果实都分别称重,并记录采收日期,至拉秧计算各小区总产量。

水分利用效率计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (3)$$

式中: WUE 为水分利用效率, kg/m^3 ; Y 为黄瓜产量, kg/hm^2 ; ET 为耗水量, mm。

1.3.4 数据处理

采用 Excel2010 软件处理试验数据,SPSS18.0 软件进行方差分析和显著性分析,显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。用 Origin-Pro2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同加气施氮处理下土壤氧气浓度和土壤温度的变化

不同加气施氮处理间对比显示,加气灌溉下的土壤氧浓度均高于不加气处理,二者 O_2 含量的分别在 16.9%~20% 和 16.4%~19.8% 范围内浮动(图 1)。与不加气相比,加气条件下各施氮水平 O_2 浓度均有提高;此外,随着施氮量的提高,加气对土壤氧含量的增加效应越来越明显,在 N0、N1 和 N2 三个施氮水平下,加气灌溉分别使土壤氧浓度提高了 1.3%、2.0% 和 2.7%。加气灌溉对提高土壤氧含量有一定作用,在施氮条件下效果更好。但加气条件下土壤氧气含量的提高并不显著($P > 0.05$)。这可能是由于加入的是空气,并且氧气测量仪测定的表层土壤在与大气不断地进行交换^[11]。

加气处理的土壤温度在黄瓜生育期内均高于不加气处理,两者的表层土壤温度分别在 19.9~25.0 °C 和 19.0~24.3 °C 之间变化(图 2),在 N0、N1、N2 施氮水平下,加气处理分别增加了 3.3%、6.4% 和 6.9% 的平均土壤温度,且差异显著($P < 0.05$);各施氮处理间无明显规律,说明施氮对土壤温度的影响不明显。此外,平均土壤温度随着时间的延长温度呈现相同的变化规

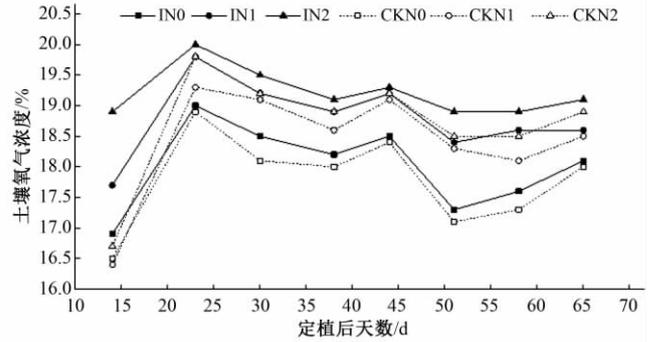


图 1 不同加气灌溉模式下土壤 O_2 含量变化

Fig.1 Changes of soil O_2 content under different treatments

律,随气温(T_a)上下波动。黄瓜整个生育期空气温度在 19.0~32.6 °C 变化,与空气温度波动相比,土壤温度受天气(空气温度)影响较大。

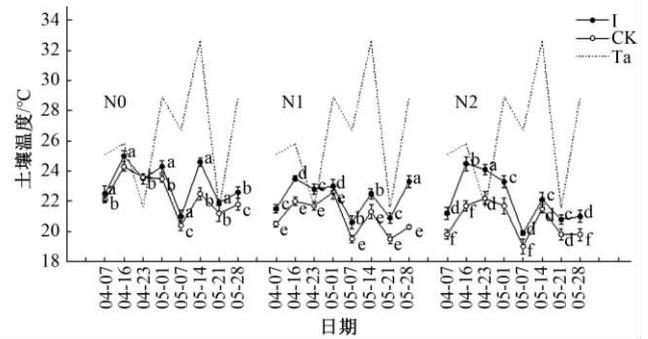


图 2 不同处理下 10 cm 深度土壤温度的变化

Fig.2 Changes of soil temperature in 10 cm depth under different treatments

2.2 不同加气施氮处理下土壤充气孔隙度的变化

由图 3 可见,除 N3 处理 0501、0507 和 0521 日期处加气灌溉下土壤充气孔隙度略低于不加气条件外,加气灌溉的土壤充气孔隙度在黄瓜生育期绝大多数时间内高于不加气处理,且两者间的差异在生育前期较小,在中后期较大,但差异不显著($P > 0.05$)。随着施氮水平的提高,加气对土壤充气孔隙度的影响越来越小,在 N0、N1 和 N2 三个施氮水平下,加气灌溉处理土壤充气孔隙度均值为 27.49%、27.66% 和 27.45%,较不加气处理分别提高了 0.85%、0.61% 和 -0.07%。

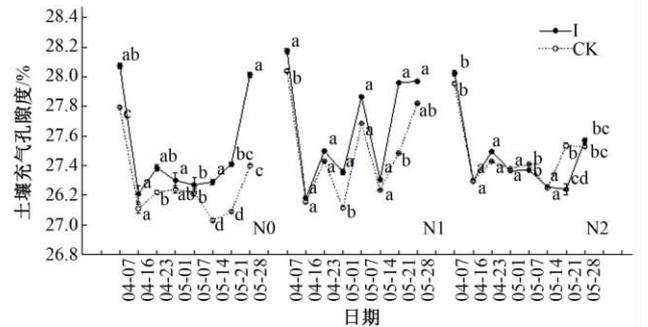


图 3 不同加气施氮处理下土壤充气孔隙度的变化

Fig.3 The change of the soil air-filled porosity under different treatments

2.3 施氮和加气灌溉对土壤呼吸速率的影响

黄瓜整个生育期内,在定植后第 24、39 和 52 d 分别追施氮肥,各处理土壤呼吸出现三次峰值,分别在定植后第 38、44 和 58 d(图 4)。土壤呼吸速率在黄瓜生长前期(0~44 d)呈现上升的趋势,之后有所下降,而黄瓜生长后期(44~78 d)呼吸峰值的出现是由追施氮肥引起的。

处理间分析可知,加气灌溉的土壤呼吸速率均高于不加气处理(N2 处理 30d 除外),加气灌溉下土壤呼吸均值较不加气条件显著提高了 25.2%($P<0.05$),且两者间的差异在黄瓜生育前期较小,在生育中后期较大(图 4)。IN1、IN2、CKN1 和 CKN2 的土壤呼吸均值分别为 503.19、407.53、395.58 和 331.69 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在黄瓜整个生育期,IN1 处理的土壤呼吸始终最大,与 IN2、CKN1 和 CKN2 均存在显著性差异($P<0.05$)。

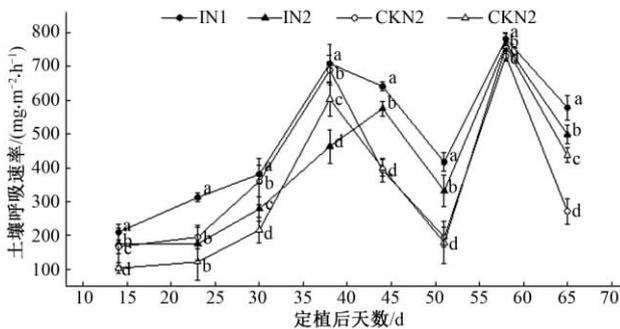


图 4 不同加气施氮处理下温室黄瓜地土壤呼吸速率

Fig.4 Soil respiration rate under different treatments in greenhouse cucumber cropping system

2.4 不同加气施氮处理下的黄瓜耗水量、WUE、干物质及产量

对整个生育期作物耗水量(ET)和水分利用效率(NUE)分析发现(表 2),加气灌溉显著降低了 ET ($P<0.05$),黄瓜水分利用效率 WUE 极显著提高($P<0.01$);施氮量对 WUE 影响极显著

表 2 不同加气、施氮处理对黄瓜产量、水分利用效率和作物耗水的影响

Tab.2 Effects of nitrogen Application on yield, WUE and ET of Cucumber under different aeration conditions

处理	作物耗水量水分利用效率		干物质积累/($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)	产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
	$ET/$ mm	$WUE/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		
IN0	126.89e	40.18c	103.57b	51 747d
IN1	124.20f	58.19a	149.15a	72 266a
IN2	128.95d	55.91a	133.78ab	72 088a
CKN0	175.19a	38.57c	101.23b	50 056e
CKN1	164.33b	44.10bc	129.33ab	56 037c
CKN2	153.17c	49.70b	132.02ab	60 806b
加气因素	28.21*	25.20**	0.79ns	582.24**
F 值 施氮因素	0.69ns	32.99**	6.43*	566.83**
I×N	224.93**	5.90*	0.44ns	109.17**

注: 同列数据后不同字母表示差异显著性水平,小写字母为 $P<0.05$ 水平显著,* 和 ** 分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著,ns 表示差异不显著($P>0.05$)。

($P<0.01$),在 N0、N1、N2 施氮水平下,根区加气处理的 ET 分别比未加气处理降低 38.1%、32.3% 和 18.8%, WUE 分别提高了 5.7%、31.9% 和 12.5%。在 IN1 处 WUE 最大,比未加气条件下传统施氮处理 CKN2 提高 17.08%。加气和施氮两因素交互作用对 WUE 有显著影响($P<0.05$),对 ET 有极显著影响($P<0.01$)。

加气灌溉处理的干物质积累量显著大于不加气处理($P<0.05$),3 个施氮处理下分别提高 2.32%、15.33% 和 1.33%(表 1)。黄瓜干物质积累量在 IN1 处最大,为 149.15 g/plant 。加气灌溉极显著提高了黄瓜产量($P<0.01$),不同施氮条件下,加气处理的黄瓜产量分别比未加气处理提高了 3.38%、28.96% 和 18.55%。随施氮量的增加,加气与未加气处理之间产量的差异逐渐缩小。IN1 处理的黄瓜产量最高,为 72 266 kg/hm^2 ,分别是 IN2 和 CKN2 处理的 1.002 和 1.188 倍。加气和施氮 2 因素交互作用对黄瓜产量有极显著影响($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 施氮和加气灌溉对根区土壤环境的影响

加气能够提高土壤氧气含量。朱艳等^[11]研究表明,与对照相比,加气灌溉根区土壤氧气含量增加了 0.98%。本研究也得到了类似结果,加气条件下各施氮水平 O_2 浓度均有提高。由于氧气测量仪测定的表层土壤和大气不断地进行交换,虽然土壤氧气含量稍有提高,但却能改善根区的整体环境。土壤通气性好坏主要决定于土壤的总孔隙度,特别是充气孔隙度的大小^[15]。本研究中,相同施氮水平下充气孔隙度差异并不显著,加气灌溉下的土壤充气孔隙度略高于不加气处理。表明对于土壤通气性确实有一定的改善作用,这与前人^[11,16]的相关研究结果一致。此外,加气灌溉显著增加了土壤温度,土壤呼吸均值较不加气处理也显著增大了 25.2%,这与侯会静^[17]、陈慧^[18]和 BHATTARAI^[19]等人的研究结果一致。

土壤呼吸、土壤氧气含量、土壤水分和土壤温度等众多因子共同构成土壤环境,它们之间的变化是相互影响的^[20]。土壤呼吸是土壤与大气之间进行气体交换的主要途径,主要来自作物根系的自养呼吸作用和土壤微生物的异养呼吸作用^[21]。研究表明,土壤温度、水分和通气状态是影响土壤呼吸的主要因子^[22-26]。本试验中,加气灌溉提高了土壤 O_2 含量和土壤充气孔隙度。土壤中氧浓度的提高,使呼吸作用原料增多,进而促进土壤呼吸作用^[27,28]。这是由于加气灌溉能够通过影响作物根呼吸、微生物酶活性等^[29,30],进而促进土壤呼吸。还有研究表明,在有氧条件下,土壤呼吸过程中每消耗 1 mol 葡萄糖释放出 2 870 kJ 的热量^[31],土壤呼吸的加强会使土壤温度有所升高。本研究表明加气灌溉通过改变土壤氧气含量、土壤充气孔隙度、土壤温度和土壤呼吸,从而改善黄瓜根区土壤环境。

对不同施氮水平分析发现,随着施氮量的提高,加气对土壤氧气含量的增加效应越来越明显,IN2 处理的氧气含量始终最高,表明作物根区加气灌溉在施氮条件下对提高土壤氧气含量的效果更好。在黄瓜整个生育期,IN1 处理的土壤呼吸最大,植株生长旺盛,此时受到施氮和加气的双重影响 IN1 的土壤充气孔隙度也高于 IN2。Wolf^[32]指出当土壤中水、肥、气、热达到最优平衡状态时,土壤生产力可达到最大。本试验中,由于施氮量

为 240 kg/hm² 时进行加气灌溉保证了作物根区土壤充足的氮肥供应和良好的水气配合条件,因此,N1 施氮水平时加气灌溉对土壤呼吸、土壤温度的促进作用更为明显。

3.2 施氮和加气灌溉对黄瓜水分利用效率和产量的影响

加气灌溉能显著提高黄瓜的水分利用效率,Abuarab 等^[33]在玉米灌溉试验中试验结果表明,相较于地下滴灌,加气灌溉下的水分利用效率和灌溉水分利用效率均显著提高。本研究中,加气灌溉减小了黄瓜的耗水量,因而水分利用效率较不加气提高,这与李元等人^[34]的结论一致。此外,加气灌溉和施氮对 WUE 均有影响,两因素交互作用显著提高了黄瓜的水分利用效率。这可能是由于加气灌溉条件下,土壤的通气性良好,适宜的孔隙度使土壤蓄持水能力增加^[35],氮肥的施入促进植株根系的生长,使根系对水分吸收的能力增强,土壤含水率略有下降(土壤充气孔隙度提高)。因此,在加气灌溉对土壤环境的促进作用更为明显的 N1 处理下,黄瓜的水分利用效率显著高于其他处理。

加气灌溉能够提高作物的干物质和产量,Bhattarai^[36]、Du^[37]和 Li^[38]等在番茄和玉米试验中得到加气灌溉产量高于地下滴灌,地上部干物质质量显著高于对照。本研究也得到了一致结果,N1 和 N2 处理下加气分别提高了干物质量 15.33%和 1.33%,产量提高了 28.96%和 18.55%。在加气灌溉条件下,较高的施氮量并没有得到更高的产量,表明过量施氮可能会抑制黄瓜干物质积累量。主要原因可能是加气灌溉减轻了根区的缺氧状况,在灌水的同时更有利于根系呼吸^[36],微生物的生物活动也更加旺盛,加速了其对有机质的分解,促进了氨的挥发,抑制铵态氮的吸收利用^[39],削弱了氮素对作物生长的促进作用。因此,在 IN1 处理处,根区土壤得到了充足的氮肥供应和良好的水气配合,形成了一个良性的土壤、作物与大气的连续系统,从而促进了作物生长,使黄瓜产量达到最高,72 266 kg/hm²,分别是 IN2 和 CKN2 处理的 1.002 和 1.188 倍。该研究结果表明加气灌溉下施氮量为 240 kg/hm² 时,能够为作物根区土壤提供充足的氮肥供应和良好的水气配合,使土壤中水、肥、气、热达到相对最优平衡状态,为黄瓜增产提供了良好的土壤环境。

4 结 论

(1) 加气灌溉通过提高土壤氧气含量、充气孔隙度、土壤温度和土壤呼吸,改善了土壤环境,促进了黄瓜的水分利用效率的提高。

(2) 施氮量为 240 kg/hm² 时进行加气灌溉,为作物根区土壤提供了充足的氮肥供应和良好的水气配合,使土壤中水、肥、气、热达到相对最优平衡状态,为黄瓜增产提供了良好的土壤环境,提高了黄瓜产量。

参考文献:

[1] 彭 澎,梁 龙,李海龙,等.我国设施农业现状、问题与发展建议[J].北方园艺,2019(5):161-168.
[2] SMITH P, HABERL H, POPP A, et al. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food

security and environmental goals[J]. Global Change Biology, 2013, 19: 2 285-2 302.
[3] BATTARAI S P, MIDMORE D J, SU N H. Sustainable irrigation to balance supply of soil water, oxygen, nutrients and agro-chemicals [M]//Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Netherlands: Springer, 2011: 253-286.
[4] Silberbush M, Gornat B, Goldberg D. Effect of irrigation from a point source (trickling) on oxygen flux and on root extension in the soil[J]. Plant and Soil, 1979,52(4):507-514.
[5] 王帘里,翟国亮.同期对土壤肥力质量影响的研究进展[J].中国农学通报,2016,32(5):90-95.
[6] JAMPEETONG A, BRIX H. Oxygen stress in *Salvinia natans*: interactive effects of oxygen availability and nitrogen source[J]. Environ Experiment Botany, 2009,66:153-159.
[7] BHATTARAI S P, HUBER S, MIDMORE D J. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils[J]. Annals of Applied Biology, 2015,144(3):285-298.
[8] LI Yuan, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Root morphology of greenhouse produced muskmelon under subsurface drip irrigation with supplemental soil aeration[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201(30):287-294.
[9] NIU Wenquan, JIA Zongxia, ZHANG Xuan, et al. Effects of soil rhizosphere aeration on the root growth and water absorption of tomato[J]. Clean-Soil Air Water, 2012,40(12):1364-1371.
[10] 史春余,王振林,余松烈.土壤通气性对甘薯产量的影响及其生理机制[J].中国农业科学,2001,34(2):173-178.
[11] 朱 艳,蔡焕杰,宋利兵,等.加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J].农业工程学报,2017,33(21):163-172.
[12] 雷宏军,杨宏光,冯 凯,等.循环曝气灌溉条件下小白菜生长及水分与养分利用[J].灌溉排水学报,2017,36(11):13-18.
[13] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等.不同供水吸力对温室黄瓜光合特性及根系活力的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):67-73.
[14] 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.
[15] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:11.
[16] 臧 明,雷宏军,潘红卫,等.增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J].农业工程学报,2018,34(23):109-118.
[17] 侯会静,陈 慧,蔡焕杰.加气灌溉对部分土壤环境因子的影响[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):225-228.
[18] 陈 慧,侯会静,蔡焕杰,等.加气灌溉对番茄地土壤 CO₂ 排放的调控效应[J].中国农业科学,2016,49(17):3380-3390.
[19] BHATTARAI S P, HUBER S, MIDMORE D J. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils [J]. Annals of Applied Biology, 2004,144(3):285-298.
[20] 朱 艳,蔡焕杰,侯会静,等.加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响[J].西北农林科技大学学报,2016,44(5):157-162.
[21] 肖胜生,熊 永,段 剑,等.基于组分区分的南方红壤丘陵土壤呼吸对植被类型转换的响应[J].农业工程学报,2015,31(14):123-131.
[22] CHEN X M, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxy-

- gation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(4): 236-248.
- [23] COOK F J, OCHARD V A. Relationships between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(5): 1 013-1 018.
- [24] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [25] HOWARD D M, PJA H. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(11): 1 537-1 546.
- [26] LOMANDER A, KATTERER T, ANDREN O. Carbon dioxide evolution from top-and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuating temperature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(14): 2 017-2 022.
- [27] PANGLE R E, SEILER J R. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-years-old loblolly pine plantation on the Virginia Piedmont [J]. *Environment Pollution*, 2002, 116: 85-96.
- [28] 刘爽, 严昌, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2010, 30(11): 2 919-2 924.
- [29] 尹晓霞. 加气灌溉对温室番茄根区土壤环境及产量的影响研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [30] 曾路生, 崔德杰, 李俊良, 等. 寿光大棚菜地土壤呼吸强度、酶活性、pH 与 EC 的变化研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 865-870.
- [31] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 11.
- [32] WOLF B. The fertile triangle: The interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity [J]. *Soil Science*, 2000, 165(8): 677-679.
- [33] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay soil [J]. *Journal of Advanced Research*, 2013(4): 493-499.
- [34] 李元, 牛文全, 吕望, 等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 125-132.
- [35] WESTERN A W, ZHOU S L, GRAYSON R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological process [J]. *J Hydrol*, 2004, 286(1/2/3/4): 113-134.
- [36] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(3): 278-288.
- [37] DU Y D, GU X B, WANG J W, et al. Yield and gas exchange of greenhouse tomato at different nitrogen levels under aerated irrigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(668): 1 156-1 164.
- [38] LEI H, BHATTARAI S, BALSYS R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems [J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(6): 1-10.
- [39] 赵丰云, 郁松林, 孙军利, 等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 228-234.
- [35] 李强. 西北地区马铃薯产量—气候变化关系分析及高产高效栽培技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [36] 汪顺生, 李欢欢, 王康三, 等. 宽垄沟灌下冬小麦水分生产函数试验研究 [J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(11): 987-992.
- [37] 曹寒, 吴淑芳, 冯浩, 等. 不同覆膜种植对土壤水热和冬小麦产量的影响 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 110-115.
- [38] 高慧洲, 谢英荷, 李廷亮, 等. 覆膜对旱地冬小麦产量与土壤水分动态的影响 [J]. *山西农业科学*, 2016, 44(12): 1 793-1 795, 1 869.
- [39] 王巧梅, 樊志龙, 赵彦华, 等. 绿洲灌区不同密度玉米群体的耗水特性研究 [J]. *作物学报*, 2017, 43(9): 1 347-1 356.
- [40] 于显枫, 张绪成, 方彦杰, 等. 减氮追施和增密对全膜覆盖垄上微沟马铃薯水分利用及生长的影响 [J]. *作物学报*, 2019, 45(5): 764-776.
- [41] 刘素华, 彭延, 彭小峰, 等. 调亏灌溉与合理密植对旱区棉花生长发育及产量与品质的影响 [J]. *棉花学报*, 2016, 28(2): 184-188.
- [42] 安俊波. 无膜移栽地下滴灌棉花耗水规律及灌溉制度研究 [D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2009.
- [43] 景媛媛, 贺翔, 徐长林, 等. 覆膜种植方式对东祁连山区苜蓿草地土壤温度和水分的影响 [J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 321-329.
- [44] 田为军, 郭琼琳, 李维华. 不同生育期补灌对覆膜马铃薯土壤水及水分利用效率的影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 117-120.

(上接第 26 页)

- [24] LIU Y X, ZHOU Y P, WANG T Z, et al. Micro-nano bubble water oxygation: Synergistically improving irrigation water use efficiency, crop yield and quality [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222.
- [25] 王亚军, 谢忠奎, 张志山, 等. 甘肃砂田西瓜覆膜补灌效应研究 [J]. *中国沙漠*, 2003(3): 94-99.
- [26] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 内陆绿洲灌溉农田 SPAC 系统土壤水分动态模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2006(2): 194-201.
- [27] 穆文彬. 华北平原农田层状土壤水分运动试验及数值模拟 [D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- [28] 李巧珍, 李玉中, 郭家选, 等. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 25-30.
- [29] 杨震, 董昭芸, 卫婷, 等. 宁南旱区沟垄集雨结合补灌对土壤水分利用及冬小麦产量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 117-124.
- [30] 秦舒浩, 张俊莲, 王蒂, 等. 半干旱雨养农业区集雨补灌对马铃薯田水分运移的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 179-182.
- [31] 陈玉章, 田慧慧, 李亚伟, 等. 秸秆带状沟覆垄播对旱地马铃薯产量和水分利用效率的影响 [J]. *作物学报*, 2019, 45(5): 714-727.
- [32] 韩凡香, 常磊, 柴守玺, 等. 半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(7): 874-882.
- [33] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 中国主要农作物全生育期耗水量与产量的关系 [J]. *中国农学通报*, 2008(3): 430-434.
- [34] 孟林, 毛培春, 张国芳. 京郊平原区苜蓿生产能力与耗水规律的研究 [J]. *草业科学*, 2007(4): 36-40.