排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 3 月 Mar. 2020 | 第 38 卷 第 3 期 Vol.38 No.3

不同增氧滴灌方式对蔬菜生长生理指标的影响


臧明

臧明[1]，雷宏军[1*]，BHATTARAI Surya[2]，BALSYS Ron[3]，徐建新[1]

（1. 华北水利水电大学水利学院，河南 郑州 450045；2. 澳大利亚中央昆士兰大学卫生、医学与应用科学学院，澳大利亚 昆士兰州 罗克汉普顿 4702；3. 澳大利亚中央昆士兰大学工程与技术学院，澳大利亚 昆士兰州 罗克汉普顿 4702）

摘要：为了研究不同增氧方式对盆栽小白菜生长生理指标的影响，以小白菜为供试作物，采用盆栽地下滴灌的方式，以普通地下滴灌作为对照（CK），设置循环曝气（MAI）、过氧化氢（H_2O_2）、纯氧扩散器曝气（OC）及射流振荡器曝气（FO）4 个增氧灌溉处理.结果表明，增氧地下滴灌显著提高了土壤呼吸速率，处理 MAI，OC 和 FO 较对照处理分别增大了 65.87%，66.79%和 111.62%.增氧地下滴灌促进了小白菜的根系生长、光合作用、蒸腾速率和气孔导度，进而提高了小白菜的物质量积累和产量.与对照相比，处理 MAI 的地下部鲜质量增大了 42.03%，地下部干质量增大了 79.85%；处理 MAI，H_2O_2，OC 和 FO 的光合速率分别增大了 868.62%，794.14%，778.67%和 650.19%；处理 MAI，H_2O_2 和 OC 的气孔导度较 CK 增大了 157.14%，128.57%和 85.71%，蒸腾速率增大了 55.61%，32.38%和 19.58%；处理 MAI 和 H_2O_2 的产量分别增大了 56.36%和 38.72%.综上，增氧地下滴灌可增强小白菜根区的土壤呼吸作用，改善光合作用、蒸腾速率和气孔导度，提高产量及水分利用效率.其中，循环曝气处理的改善效果最为显著.

关键词：增氧地下滴灌；增氧方式；土壤呼吸；生长指标；生理指标
中图分类号：S275.4　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2020)03-0310-08
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.18.0206

臧明，雷宏军，BHATTARAI Surya，等.不同增氧滴灌方式对蔬菜生长生理指标的影响[J].排灌机械工程学报，2020，38(3)：310-317.

ZANG Ming，LEI Hongjun，BHATTARAI Surya，et al. Effects of oxygation techniques on growth and physiology of vegetable under subsurface drip irrigation[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2020，38(3)：310-317.(in Chinese)

Effects of oxygation techniques on growth and physiology of vegetable under subsurface drip irrigation

ZANG Ming[1]，*LEI Hongjun*[1*]，*BHATTARAI Surya*[2]，*BALSYS Ron*[3]，*XU Jianxin*[1]

（1. School of Water Conservancy，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou，Henan 450045，China；2. School of Health，Medical and Applied Sciences，CQUniversity，Rockhampton，QLD 4702，Australia；3. School of Engineering and Technology，CQUniversity，Rockhampton，QLD 4702，Australia）

Abstract：Perched water often leads to a decrease in soil aeration in subsurface drip irrigated crop roots，whereas aerated subsurface drip irrigation（ASDI）provides a source of oxygen in a root environment that suffers from temporal hypoxia and unlocks yield potentials of crops. With Chinese cabbage as

收稿日期：2018-09-27；**修回日期**：2019-11-28；**网络出版时间**：2019-12-04
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.th.20191202.1345.002.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1504512，41771256)；山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY010710)；河南省科技创新人才计划项目(174100510021)
第一作者简介：臧明(1990—)，男，河南商丘人，博士研究生(790243068@qq.com)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.
通信作者简介：雷宏军(1975—)，男，湖北大冶人，教授，博士生导师(hj_lei2002@163.com)，主要从事节水灌溉理论与技术及水资源高效利用研究.

test crop, five irrigation treatments were used including Mazzei air injector (MAI) cyclic aeration, 15 mg/L of hydrogen peroxides (H_2O_2), fluidic oscillator (FO), oxygen concentrator (OC) and a control treatment (CK). The experiment was carried out during September 23, 2015 to October 31, 2015 at the Central Queensland University, Australia (23°22′0.345″S latitude, 150°31′0.53″ E Longitude), and subsurface drip irrigation was implemented to systematically monitor soil respiration, crop growth and physiological indexes to clarify the effect of different oxygation techniques on growth and development of potted Chinese cabbage. Compared with the control treatment, the soil respirations in treatments MAI, H_2O_2, OC and FO increase by 65.87%, 42.07%, 66.79% and 111.62% respectively compared with CK. ASDI improves the leaf chlorophyll content in treatments MAI, OC and FO. The photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate are enhanced by SADI. The photosynthetic rates in MAI, H_2O_2, OC and FO increase by 868.62%, 794.14%, 778.67% and 650.19% compared with CK. The stomatal conductance in MAI, H_2O_2 and OC increases by 157.14%, 128.57% and 85.71%, the transpiration rates in MAI, H_2O_2 and OC increase by 55.61%, 32.38% and 19.58%, and there is not statistically significant difference between other treatments. The yield is significantly increased, and the water utilization efficiency (*WUE*) is improved, too. The yield increases by 56.36% and 38.72% respectively in treatments MAI and H_2O_2, and the *WUE* in MAI and H_2O_2 increases by 48.96% and 36.46% compared with CK. The beneficial effects of ASDI are mediated through greater root activity, especially the root-shoot ratio increases by 49.61% in MAI. In conclusion, ASDI improves the hypoxic environment in crop roots, promotes the growth of Chinese cabbage, enhances the soil respiration and increases the yield as well as water utilization efficiency. Among four treatments, MAI is ranked in the first place.

Key words: aerated subsurface drip irrigation; oxygation techniques; soil respiration; growth index; physiological index

协调土壤空气、水分和养分之间的最佳平衡以维持根系正常的新陈代谢,是灌溉追求的目标[1-3].灌溉水入渗会使得土壤湿润区出现至少短期的缺氧环境[4],可能会影响作物生长.土壤通气性改善以及由此带来的根系吸收和输运功能改善是作物增产增效的根本所在[5].将氧气(或含氧物质)通过滴灌(DI)或地下滴灌(SDI)水流向植物根区输送这种新型的灌水技术被称为增氧灌溉[2].

增氧灌溉技术通常分为物理增氧技术和化学增氧技术.常用的物理增氧技术包括文丘里空气射流器单次曝气[6-7]或循环曝气[8]、Seair 系统纯氧曝气[9]以及射流振荡器曝气[10] 3 种. GOORAHOO 等[11]通过采用 Mazzei 文丘里空气射流器进行单次曝气,明确证实了增氧灌溉的好处,并提出了可行的方法.循环曝气可以提高番茄[12]和草莓[13]的产量和水分利用效率.Seair 系统纯氧曝气和射流振荡器曝气大大提高了灌溉水溶解氧浓度及持久性,对土壤通气性有显著的改善效果.ZHENG 等[14]以纯氧为进气源,结合 Seair 扩散系统设置了 3 个溶解氧(DO)浓度水平,水培西红柿 4 周发现,DO 体积浓度为 30 mg/L 可能是西红柿生长的上限浓度.LEI 等[10]通过射流振荡器曝气提高了水中溶解氧的浓度及持续时间,对玉米的株高及产量有显著的改善作用.化学增氧技术是将H_2O_2混入灌溉水中进行增氧的灌溉方法[15],可改善根区缺氧环境,促进作物产量增加[16].

以上技术都在一定程度上改善了作物根区缺氧环境,挖掘了作物的生产潜力.然而,单次曝气产生的气泡多为大气泡,常常因集中于管道上半部而出气不均匀[17],不利于大范围推广应用;Seair 系统纯氧曝气和射流振荡器曝气大大提高了灌溉水中的 DO 浓度,适合水培蔬菜和长距离灌溉[10];H_2O_2具有较强的氧化能力,不同作物对 H_2O_2 敏感的临界浓度不同,不同土壤上应用效果也表现出较大的差异性.以上技术应用的对比研究鲜有报道.为此,文中以小白菜为供试作物,研究不同增氧技术对小白菜生长及土壤呼吸的影响,以期为增氧技术在实际生产中的合理利用提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验地位于澳大利亚昆士兰州罗克汉普顿中

央昆士兰大学创新研究基地(150°31′0.53″E,23°22′0.345″S).试验地为亚热带湿润气候,年平均降水量为800 mm,具有明显的雨季(12月至次年3月)和旱季(6月至9月)特征.

1.2 试验材料

以黑土(vertisol)为供试土壤,pH值为7.4,有机碳质量分数为1.96%,全磷为0.15%;速效氮质量比为12 mg/kg,速效磷为48.9 mg/kg,速效钾为506 mg/kg.以小白菜(*Brassica rapa* var. chinensis)为供试作物,全生育期约为60 d,定植时浇透底水,每盆3株.

试验采用盆栽进行,使用的种植桶直径为28.6 cm,高度为40.0 cm.每个处理随机设置8次重复,共计40盆.外圈设置一圈的保护盆,保护盆不计入试验.在每个处理桶的桶壁包裹一层遮阳布.每盆装入风干土18.5 kg,初始质量含水量为21.62%.每个处理设有一个储水罐,储水罐中的水在灌溉前循环增氧20 min直至溶解氧达到稳定值.灌溉使用地下滴灌的方式,每盆设置一个滴头(Netafim,以色列耐特菲姆netafim公司),流量为2 L/h,灌溉压力为0.1 MPa,滴头埋深为10 cm.

1.3 试验设计

设置1个普通地下滴灌为对照(CK)和4个增氧处理,分别为循环曝气处理(MAI),15 mg/L HP3000型H_2O_2处理(H_2O_2)、流体射流振荡器曝气处理(FO)和Seair系统纯氧曝气处理(OC).具体如下:

MAI:将文丘里射流器(Mazzei air injector 384,美国Mazzei公司)置于水流的干路上,利用偏压射流器从大气中吸空气,使用水泵将灌溉水循环通过文丘里射流器,进行循环曝气.在每次灌溉之前进行常压循环曝气20 min,然后再进行灌水[8].

H_2O_2:使用15 mg/L的HP3000型农用H_2O_2溶液(德国Evonik Industries AG公司)进行灌溉.

FO:使用射流振荡器(University of Sheffield,UK)提高空气粒子的动量,其在透过多孔沸石板时在水中形成20 μm以下的巨量微气泡[10],灌溉水中的溶解氧可较长时间保持在较高水平.

OC:采用变压分离纯氧制备(Air Sep),Seair扩散系统(Seair)、文丘里射流器(Mazzei air injector)相耦合,将文丘里射流器置于水流的干路上,利用文丘里射流器吸入氧气,经Seair扩散系统进行充分混匀和溶解,之后通过滴灌管道输送到作物根区[9].

于试验开始前采用便携式光纤微氧传感器(Fibox4,德国Presens公司)对水源处溶解氧进行测定,以开始处理时间为0点,记录第1.0,3.0,4.5,7.5,10.5,13.5,19.5,22.5 h的水源处溶解氧并计算均值.5种处理的水源处溶解氧质量浓度均值(液相氧)和掺氧比例体积分数β(气相氧)见表1.

表1 不同处理灌溉水中氧气状况

Tab.1 Oxygen content in water in different treatments

处理	φ/(mg·L^{-1})	β/%
MAI	4.77±0.95c	2.52[8]
H_2O_2	10.99±1.14b	0
OC	42.77±0.47a	0.50~1.00[9]
FO	5.29±1.02c	0.21~0.42[10]
CK	3.27±0.63d	0

注:小写字母表示变量之间具有统计学意义($P\leqslant0.05$);下同

增氧处理除了增加灌溉水中的溶解氧,处理MAI,OC和FO还可以将空气或氧气以微小气泡的形式掺入灌溉水中,可提高灌溉水中的氧气含量.处理OC的溶解氧值较高且保持性能较好,22.5 h均值为42.77 mg/L,但是掺氧比例较低,仅为1.00%;处理MAI和FO的溶解氧值相近,均值均为5 mg/L左右,而掺氧比例却有较大差异,MAI的掺氧比例可达2.52%,FO仅为0.21%~0.42%.处理H_2O_2采用农用过氧化氢溶液进行灌溉,溶解氧可长时间保持10 mg/L以上的较高水平.

1.4 试验管理

小白菜移栽时间为2015年9月23日,设定为第1天,收获时间为10月31日,试验共38 d.移栽时土壤含水量灌溉保持85%田间持水量.而后采用称重法,每天监测土壤含水量.当土壤含水量降低至60%田间持水量时,补充灌溉至80%田间持水量.根据上一次灌溉后盆栽桶重量与下一次灌溉前的盆栽桶重量之差计算耗水量.根据某一次灌溉前和灌溉后的盆栽桶重量之差计算准确灌水量,最后计算总灌溉水量.

采用的缓释肥料为scotts slow release nitrophoska(Scotts,USA).在移栽小白菜前,施基肥9 g/桶,只施于土体上1/3处,搅拌均匀.后于试验第20和28天进行地面施肥,每次补肥12 g/桶,整个生育期共施肥33 g/桶.

1.5 试验观测内容及方法

1) 土壤呼吸.采用土壤呼吸测量系统(EGM-3,德国PreSens GmbH公司)测量土壤呼吸.

2) 叶绿素含量.采用叶绿素仪(SPAD-502,日本KONICA MINOLTA公司)测定叶绿素含量.

3) 光合速率、气孔导度和蒸腾速率.采用红外气体分析仪(LCA-4,英国ADC BioScientific公司)测定光合速率、气孔导度和蒸腾速率.测定时选择完

全展开的顶 2 叶.

4）叶面积指数.采用冠层分析仪（AccuPAR LP80,美国 LI-COR 公司）测定叶面积指数.

5）物质量、产量和水分利用效率.在生育末期将盆栽所有小白菜地上部剪下,并完整挖出根系、用水冲洗干净,将地上部和地下部分开称量鲜质量.后 105 ℃杀青、70 ℃放置 72 h,称量其干质量,并计算其根冠比.将地上部鲜质量视作小白菜的产量[18].将地上部干质量和总灌溉水量之比视为水分利用效率（kg/m^3）.

1.6　数据处理

数据结果采用相同处理 8 次重复的平均值.使用平均值±标准差的形式表示.采用 SigmaPlot 软件进行数据处理,采用 Fisher LSD 方法进行差异显著性检验（显著性水平设定为 $P \leqslant 0.05$）.

2　结果与分析

2.1　增氧地下滴灌对土壤呼吸的影响

于试验第 32,36 和 38 天进行了土壤呼吸速率 *SRR* 测量,其中第 32 天为当天灌水后立即测量,第 36 天为灌水前一天测量,第 38 天为灌水后一天进行测量,具体结果见表 2.

表 2　不同处理土壤呼吸速率

Tab.2　Soil respiration rate in different treatments

处理	*SRR*/（μmol · m^{-2} · s^{-1}）		
	第 32 天	第 36 天	第 38 天
MAI	1.80±0.38ab	1.87±0.63a	1.52±0.27a
H_2O_2	1.54±0.30bc	1.83±0.63a	1.39±0.46ab
OC	1.81±0.45ab	1.65±0.98a	1.81±0.28a
FO	2.29±0.73a	1.45±0.78a	0.87±0.34c
CK	1.08±0.34c	1.30±0.63a	1.02±0.20bc

可以看出,在第 32 天（灌溉当天）处理 MAI,OC 和 FO 的土壤呼吸速率相对于 CK 均有所增强,分别增大了 65.87%,66.79% 和 111.62%,3 个处理对土壤呼吸具有显著的增强作用,这种效果在灌溉当天表现较为强烈.处理 H_2O_2 与 CK 之间差异不具有统计学意义.而第 36 天（灌水前一天）5 个处理之间差异均不具有统计学意义.

而第 38 天（灌溉次日）的结果显示,处理 MAI 和 OC 对土壤呼吸的增强效果较为显著,MAI 和 OC 的土壤呼吸相对于 CK 分别增大了 49.22% 和 77.45%,但是 FO 较灌溉当天的效果下降较明显,下降后的 FO 与 CK 没有明显差别;处理 H_2O_2 与 CK 之间依然不具有统计学意义.

2.2　增氧地下滴灌对小白菜生理指标的影响

2.2.1　叶绿素含量

于试验第 23 天、第 28 天、第 36 天和第 38 天进行了 4 次叶绿素测定,结果见表 3,表中 *SPAD* 为叶绿素含量相对值.

表 3　不同处理小白菜叶绿素含量

Tab.3　Chinese cabbage leaf chlorophyll in different treatments

处理	*SPAD*			
	第 23 天	第 28 天	第 36 天	第 38 天
MAI	21.40±3.92a	23.78±5.51a	33.31±5.97a	32.45±7.92a
H_2O_2	20.28±3.26a	22.58±4.53a	27.93±5.60abd	24.53±6.71b
OC	21.03±2.18a	24.69±4.23a	33.56±7.70abc	36.01±4.77ac
FO	19.75±3.83a	26.92±4.65a	34.19±6.50ac	36.61±7.16ac
CK	19.12±2.07a	24.32±3.78a	24.84±9.10d	25.41±6.47b

从表 3 中可以看出,前两次测量各处理之间不具有统计学意义;而后两次测量的趋势基本一致,处理 MAI,OC 和 FO 的测量值均大于 CK 的,H_2O_2 的和 CK 的差异不大.处理 MAI,OC 和 FO 的测量值相对于 CK 均有所增强,第 3 次测量中分别增大了 34.10%,35.10% 和 37.64%,第 4 次测量分别增大了 27.71%,41.72% 和 44.08%,而处理 H_2O_2 区别不大.处理 MAI,OC 和 FO 对小白菜的叶绿素积累有显著的促进作用,H_2O_2 对此作用不明显.

2.2.2　光合速率、气孔导度和蒸腾速率

于试验第 27 天、第 30 天和第 36 天进行了 3 次小白菜生理指标的测定,结果见表 4,表中 *Pn*,*Gs*,*Tr* 分别为光合速率、气孔导度、蒸腾速率.

表 4　不同处理小白菜的生理指标

Tab.4　Chinese cabbage photosynthetic index in different treatments

生理指标	处理	第 27 天	第 30 天	第 36 天
Pn/（μmol · m^{-2} · s^{-1}）	MAI	18.06±2.95a	5.84±2.58a	12.72±1.578a
	H_2O_2	18.05±5.11a	6.29±2.77a	11.74±3.342b
	OC	16.67±3.49a	8.11±2.32a	11.54±3.722b
	FO	14.93±4.04a	8.22±3.11a	9.85±3.881b
	CK	18.95±3.59a	9.23±2.26a	1.31±0.861c
Gs/（μmol · m^{-2} · s^{-1}）	MAI	0.14±0.03ab	0.18±0.05a	0.13±0.04a
	H_2O_2	0.16±0.08a	0.16±0.01a	0.11±0.02a
	OC	0.15±0.04ab	0.13±0.03ab	0.12±0.08a
	FO	0.10±0.05b	0.10±0.03bc	0.12±0.05a
	CK	0.13±0.03ab	0.07±0.02c	0.12±0.02a
Tr/（μmol · m^{-2} · s^{-1}）	MAI	3.97±1.06ab	5.96±0.80a	4.04±0.70a
	H_2O_2	4.97±0.96a	5.07±1.19ab	3.73±0.43a
	OC	4.24±0.85ab	4.97±0.58a	3.38±1.47a
	FO	3.61±1.13b	4.58±0.50bc	3.57±0.87a
	CK	4.61±0.68ab	3.83±0.50c	3.92±0.49a

由表 4 中可以看出,增氧灌溉处理的光合速率

有了显著改善,试验第36天处理MAI,H_2O_2,OC和FO的光合速率较CK的均有所提高,分别增大了868.62%,794.14%,778.67%和650.19%,4个处理的光合速率提升非常明显.

由表4还可见,增氧地下滴灌使小白菜叶片的气孔导度和蒸腾速率有了显著增强,在第30天的测量中,处理MAI,H_2O_2和OC的气孔导度较CK的增大了157.14%,128.57%和85.71%,蒸腾速率增大了55.61%,32.38%和19.58%;处理FO的气孔导度和蒸腾速率较CK之间差异均不具有统计学意义.

2.3 增氧地下滴灌对小白菜生长指标的影响

2.3.1 叶面积指数

于试验第23天、第30天、第32天及第36天进行了4次叶面积指数*LAI*测定,结果如图1所示(图中t_d为移栽后天数),表明5个处理的整体曲线均呈上升态势.在第32天测量时有了较为明显的区别,处理MAI,H_2O_2和OC较CK分别增大了25.25%,33.31%和26.38%,而FO与CK之间不具有统计学意义;第36天的测量中,处理MAI,H_2O_2及OC的叶面积指数和CK的区别不大,而FO的显著小于CK的.

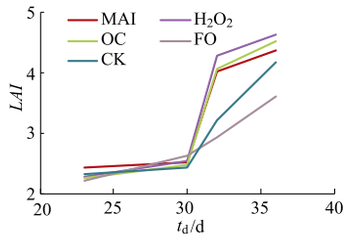


图1 不同处理的小白菜叶面积指数动态

Fig.1 Leaf area index dynamics in different aeration treatments

2.3.2 产量、物质量及水分利用效率

于生育期末测量小白菜的物质量和产量,并计算水分利用效率,列于表5,表中Y,m_u,m_d,m_r,r_{rs},*WUE*分别为产量、地上部干质量、地下部干质量、根系鲜质量、干质量根冠比、水分利用效率.由表显示,与CK相比,处理MAI和H_2O_2的产量分别增大了56.36%和38.72%,水分利用效率分别增大了48.96%和36.46%,处理OC和FO之间不具有统计学意义.处理MAI的地下部鲜质量较CK的增大了42.03%,地下部干质量增大了79.85%;H_2O_2,OC和FO与CK之间不具有统计学意义.

表5 不同处理的产量、生物量和水分利用效率

Tab.5 Yield, biomass and water use efficiency in different treatments

处理	Y/(g·盆$^{-1}$)	m_u/(g·盆$^{-1}$)	m_d/(g·盆$^{-1}$)	m_r/(g·盆$^{-1}$)	r_{rs}	*WUE*/(kg·m^{-3})
MAI	411.10±97.42a	39.71±8.98a	7.14±1.45a	43.03±8.07a	0.19±0.05a	2.86±0.65a
H_2O_2	364.71±69.77a	35.07±7.30a	5.17±1.19b	34.84±7.65ab	0.14±0.01b	2.62±0.48a
OC	328.53±115.85ab	34.93±11.05ab	5.19±1.82b	30.88±2.47b	0.14±0.02b	2.51±0.42ab
FO	264.97±76.07b	28.30±6.64b	4.97±1.55b	31.37±8.19b	0.16±0.03b	2.27±0.39ab
CK	262.92±119.85b	26.66±10.52b	3.97±1.66b	32.87±3.04b	0.13±0.01b	1.92±0.51b

小白菜含水丰富,含水量可达90%左右,这里计算其干质量根冠比.处理MAI的干质量根冠比较CK有较大增加,增大了49.61%;处理H_2O_2,OC和FO的变化不大,干质量根冠比增大显示了处理MAI增强了根系的干物质积累.

3 讨 论

土壤呼吸作用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[19].土壤温度、土壤水分及土壤通气状况均对土壤呼吸产生重要影响[20].当土壤水分过多时,氧气缺乏影响根和微生物的呼吸作用,抑制了土壤呼吸[21].增氧地下滴灌可显著改善作物根区的缺氧状况,提高了根区土壤氧气浓度,且浅层土壤氧气浓度大于深层土壤[22].试验中,当温度和水分相近时,灌溉当天处理MAI,OC和FO的土壤呼吸速率均大于CK的,H_2O_2与CK之间不具有统计学意义.而在灌溉后第2天的测量中,MAI和OC的土壤呼吸仍大于CK处理,FO和H_2O_2与CK之间不具有统计学意义.处理MAI将微小气泡和水混合起来输送到作物根区,微气泡易附着土壤孔隙中,可持续向水中供氧,以维持土壤中良好的氧气环境[8],可改善土壤呼吸.处理OC将Air Sep系统制得的纯氧经文丘里空气射流器输送到灌溉水中,通过氧气扩散器将气泡分裂为直径100 nm~3 mm的微气泡,可极为显著地改善土壤溶液中的溶氧状况,溶氧值质量浓度可达43 mg/L,对土壤呼吸的改善效果也很显著.处理FO和MAI的溶解氧水平相近,但是掺氧比例体积分数仅为0.21%~0.42%[10],这可能是灌溉后第2天处理FO的土壤呼吸速率与CK之间不具有统计学意义的原

因之一.处理 H_2O_2 将农用过氧化氢输送到作物根区,改善了土壤的通气状况,增强了作物根系的自养呼吸,但使用过氢化氢进行增氧灌溉会对土壤中的微生物量造成负面影响[23],这可能影响了土壤微生物的异养呼吸作用,导致土壤呼吸速率和 CK 之间不具有统计学意义.

增氧灌溉改善了作物根区的缺氧环境,可提高作物的叶绿素含量、光合作用效率[24]以及蒸腾速率[7].处理 MAI,OC 和 FO 的叶绿素含量均大于 CK30%以上,H_2O_2 和 CK 之间不具有统计学意义;各增氧处理的光合作用均有较大的改善;处理 MAI,H_2O_2 和 OC 的蒸腾速率和气孔导度也有所提高,而 FO 无显著增强.SOJKA[25]研究指出,根区的低氧环境会导致光合速率降低.水分过多时,根系受到低氧胁迫,吸收水分效率降低[26],影响植株生长,降低叶片的蒸腾速率.4 种增氧处理中,处理 FO 的蒸腾作用和气孔导度与 CK 之间不具有统计学意义,这与土壤呼吸的灌溉后第 2 天的结果类似.增氧灌溉对土壤根区环境的改善和作物生理指标有一定的关系,但其相关性仍需做后续研究.

植株根系的生长状况直接影响其地上部分的生长发育,根系的生长对氧气的缺乏比较敏感,氧气缺乏会抑制根系的生长[27-28].增氧灌溉将氧气或含氧物质输送到根区,满足根系生长的需求,可促进植株生长发育,有效提高植株的物质量积累及产量[11,24].根质量方面,处理 MAI,H_2O_2 和 OC 的根鲜质量均大于 CK 的;根冠比方面,处理 MAI 和 FO 的干质量根冠比较 CK 的有较大增长,H_2O_2 和 OC 的变化不大,增氧处理对根系有明显的增强作用,促进了根系的干物质积累,关于番茄和大豆的研究证明了这一点,增氧灌溉促进了植株根系生长[6,22].5 个处理的叶面积指数有较大的差别,处理 MAI,H_2O_2 和 OC 的大于 CK 的,而 FO 与 CK 之间不具有统计学意义.叶面积指数在植株整个生育期的后期产生较大差别,这可能是由于增氧灌溉对植株生长发育的增强效果需要时间积累.4 种增氧灌溉处理中,处理 FO 的根质量和叶面积指数与 CK 之间均不具有统计学意义,这可能是由于 FO 较低的掺气比例导致其对土壤通气性的改善效果持续性较弱所致,进而影响了植株的根系生长和物质量积累.

高产、优质是农业生产追求的主要目标.根区低氧胁迫会使根向冠层传递缺氧信号,影响水、植物生长素等生长物质运输和储存,导致作物减产[29].处理 MAI,H_2O_2 和 OC 的产量较 CK 的均有提高,MAI 为最高产量,FO 和 CK 之间却不具有统计学意义.这与 ABUARAB 等[30]所研究的玉米产量受到增氧灌溉的增产效果相一致.较高的水分利用效率需要较高的产量和较低的总耗水量,本试验采用相同的灌溉定额,植株的水分利用效率和产量紧密相关.处理 MAI,H_2O_2 和 OC 的水分利用效率较 CK 的有所提高,而 FO 和 CK 之间却不具有统计学意义.植株的生物产量和整个生育期的总蒸发量成正比[7],由前面分析可知,处理 FO 的蒸腾速率和 CK 之间不具有统计学意义,这与产量数据表现一致.

由于增氧的形式和效果各不相同,4 种增氧处理对作物的改善效果并不相同.处理 MAI 增强了土壤呼吸,在小白菜根系生长、产量和生理指标等方面均有显著的改善效果,为 4 种增氧技术中最适合小白菜生长的增氧技术.处理 H_2O_2 改善了小白菜的生理指标,促进了小白菜的物质量积累,产量和水分利用效率有所提高,但土壤呼吸和根系生长却没有改善;H_2O_2 使用的农用过氧化氢虽可改善作物根区的缺氧环境,且对作物本身负面影响较小,但是其对灌溉水氧化特性的改变可能会对土壤微生物造成影响,进而影响了土壤呼吸和根系生长.处理 OC 拥有较高的溶解氧水平和保持特性,且土壤呼吸、叶绿素含量和生理指标均有所增强,但小白菜产量和根系与对照之间却不具有统计学意义,这可能是由于处理 OC 将纯氧注入灌溉水中输送到根区,过高的溶解氧值超过了小白菜的适宜浓度,影响了小白菜的物质积累,产量和根系生长受到影响.处理 FO 和 MAI 的溶解氧水平较为相似,保持特性也基本相同,但是由于增氧技术限制,处理 FO 的掺氧比例远远少于 MAI 的,这可能是导致 FO 各项参数与对照之间均不具有统计学意义的原因.综合所述,将氧气以微小气泡的形式均匀掺入灌溉水中输送到作物根区,对作物的生长发育更为有利.

4　结　论

增氧处理在土壤呼吸、干物质量、产量、水分利用效率、光合速率、蒸腾速率等方面均显著优于对照处理,可显著改善植株根区的缺氧环境,对植株的生长发育有显著的促进作用.

1）与对照相比,灌溉当天处理 MAI,OC 和 FO 的土壤呼吸均有显著增强作用,处理 H_2O_2 不具有统计学意义;灌溉后第 2 天处理 MAI 和 OC 较对照显著增强,处理 FO 和 H_2O_2 较对照不具有统计学意义.

2）除H_2O_2外，处理MAI，OC和FO增氧处理的叶绿素含量均大于对照的，光合作用也有显著提高；与对照相比，处理MAI，H_2O_2和OC的蒸腾速率和气孔导度有显著提高，FO和CK差异不具有统计学意义.

3）处理MAI，H_2O_2和OC的叶面积指数较对照有显著提高，而FO处理与对照不具有统计学意义.

4）处理MAI，H_2O_2，OC和FO的根系鲜质量均大于对照；处理MAI和FO的根冠比较对照具有统计学意义，H_2O_2和OC与对照差异不具有统计学意义.

5）相对于对照而言，处理MAI，H_2O_2和OC的产量和水分利用效率均有提高，FO不具有统计学意义；其中，处理MAI的产量最高.

综上，所有测量项目中处理MAI均优于对照，改善效果显著；处理FO对根区环境的改善效果持续性较弱，在蒸腾速率、产量、水分利用效率等方面与对照不具有统计学意义，该技术的适用条件还需进一步研究.

参考文献(References)

[1] WOLF B. The fertile triangle: the interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity [M]. New York, USA: Food Products Press, 1999: 232-236.

[2] BHATTARAI S P, SU Ninghu, MIDMORE D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in agronomy, 2005,88: 313-377.

[3] BHATTARAI S P, MIDMORE D J, SU Ninghu. Sustainable irrigation to balance supply of soil water, oxygen, nutrients and agro-chemicals [M]//LICHTFOUSE Eric. Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010:253-286.

[4] MEEK B D, EHLIG C F, STOLZY L H, et al. Furrow and trickle irrigation: effects on soil oxygen and ethylene and tomato yield[J]. Soil Science Society of America journal, 1983,47(4):631-635.

[5] GRABLE A R. Soil aeration and plant growth[J]. Advances in agronomy, 1966,18:57-106.

[6] 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.

[7] CHEN Xinming, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. Journal of plant ecology, 2011,4(4):236-248.

[8] 雷宏军，臧明，张振华，等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响[J]. 农业工程学报，2014,30(22):63-69.
LEI Hongjun, ZANG Ming, ZHANG Zhenhua, et al. Impact of working pressure and surfactant concentration on air-water transmission in drip irrigation tape under cycle aeration[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(22):63-69.(in Chinese)

[9] 雷宏军，刘欢，张振华，等. NaCl及生物降解活性剂对曝气灌溉水氧传输特性的影响[J]. 农业工程学报，2017,33(5):96-101
LEI Hongjun, LIU Huan, ZHANG Zhenhua, et al. Impact of NaCl and biodegradable surfactant on water and oxygen transmission under aerated irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(5):96-101.(in Chinese)

[10] LEI Hongjun, 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):421-430.

[11] GOORAHOO D, CARSTENSEN G, ZOLDOSKE D F, et al. Using air in sub-surface drip irrigation(SDI) to increase yields in bell peppers[J]. International water and irrigation, 2002,22(2):39-42.

[12] 雷宏军，臧明，张振华，等. 循环曝气地下滴灌的温室番茄生长与品质[J]. 排灌机械工程学报，2015,33(3):253-259.
LEI Hongjun, ZANG Ming, ZHANG Zhenhua, et al. Growth and quality of greenhouse tomato under cycle aerated subsurface drip irrigation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015,33(3):253-259.(in Chinese)

[13] 雷宏军，冯凯，张振华，等. 河南3种典型土壤曝气滴灌草莓生长与品质[J].排灌机械工程学报，2017,35(2):158-164.
LEI Hongjun, FENG Kai, ZHANG Zhenhua, et al. Growth and quality of potted strawberry under aerated drip irrigation in the three typical soils in Henan Province [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2017,35(2):158-164.(in Chinese)

[14] ZHENG Youbin, WANG Linping, DIXON M. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato[J]. Scientia horticulturae, 2007,113

(2):162-165.

[15] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Oxygation of clayey soils by adding hydrogen peroxide to the irrigation solution: lysimetric experiments[J]. Rhizosphere, 2016(2):51-61.

[16] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Aeration of clayey soils by injecting air through subsurface drippers: lysimetric and field experiments[J]. Agricultural water management, 2016,176:222-233.

[17] TORABI M, MIDMORE D J, WALSH K B, et al. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygation[J]. Irrigation science, 2013,31(4):621-630.

[18] 李霞, 王国栋, 薛绪掌,等. 不同覆盖度下盆栽小白菜蒸散与水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2009,25(8):54-58.
LI Xia, WANG Guodong, XUE Xuzhang, et al. Evapotranspiration and water use efficiency of potted pakchoi under different surface coverage degrees[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8):54-58.(in Chinese)

[19] 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.
XIAO Shengsheng, XIONG Yong, DUAN Jian, et al. Responses of soil respiration to vegetation type conversion in south hilly red soil based on main components[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(14):123-131.(in Chinese)

[20] ORCHARD V A, COOK F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. Soil biology and biochemistry, 1983,15(4):447-453.

[21] 雷宏军,胡世国,潘红卫,等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. 土壤学报,2017,54(2):297-308.
LEI Hongjun, HU Shiguo, PAN Hongwei, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation[J]. Acta pedologica sinica, 2017,54(2):297-308.(in Chinese)

[22] BHATTARAI S P, MIDMORE D J, PENDERGAST L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols[J]. Irrigation science, 2008,26(5):439-450.

[23] 易晓华, 何华, 金静. 土壤水分和膜下增氧对番茄根际土壤微生物量的影响[J]. 北方园艺, 2015(21):172-177.
YI Xiaohua, HE Hua, JIN Jing. Effect of soil moisture content and membrane aeration on soil microbial biomass quantity of tomato[J]. Northern horticulture, 2015(21):172-177.(in Chinese)

[24] ZHU Lianfeng, YU Shengmiao, JIN Qianyu. Effects of Aerated irrigation on leaf senescence at late growth stage and grain yield of rice[J]. Rice science, 2012,19(1):44-48.

[25] SOJKA R E. Measurement of root porosity (volume of root air space)[J]. Environmental and experimental botany, 1988,28(4):275-280.

[26] DREW M C. Sensing soil oxygen[J]. Plant, cell and environment, 1990,13(7):681-693.

[27] BENJAMIN L R, GREENWAY H. Effects of a range of O_2 concentrations on porosity of barley roots and on their sugar and protein concentrations[J]. Annals of botany, 1979,43(3):383-391.

[28] THOMSON C J, ARMSTRONG W, WATERS I, et al. Aerenchyma formation and associated oxygen movement in seminal and nodal roots of wheat[J]. Plant, cell and environment, 1990,13(4):395-403.

[29] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a vertosol[J]. Crop & pasture science, 2013,64(11):1171-1181.

[30] 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 loam soil[J]. Journal of advanced research, 2013,4(6):493-499.

(责任编辑　张文涛)