排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 1 月 Jan. 2018 | 第 36 卷 第 1 期 Vol. 36 No. 1
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0134

3 种土壤灌溉后通气小白菜的水分及养分利用特性

雷宏军[1,2*]，李轲[1,2]，冯凯[1,2]，潘红卫[1,2]，杨宏光[1,2]
(1. 华北水利水电大学水利学院，河南 郑州 450046；2. 河南省节水农业重点实验室，河南 郑州 450046)


雷宏军

摘要：选取 3 种河南省典型土壤(郑州黏土、洛阳粉壤土和驻马店砂壤土)，以小白菜为供试作物，采用地下滴灌供水，设置常规灌溉为对照组(CK)、灌溉后通气(MV)为试验组开展盆栽试验，研究灌溉后通气对小白菜水分和养分利用的影响. 结果表明，与 CK 相比，处理 MV 显著地提高了 3 种土壤小白菜根系活力、根干质量和净光合速率. 处理 MV 显著提高了小白菜蒸腾速率，其中，黏土、粉壤土的分别提高了 20.61% 和 15.98%. 黏土在处理 MV 时，小白菜产量和水分利用效率分别提高了 38.08% 和 52.70%；小白菜氮、磷、钾吸收效率分别增大了 61.65%，66.54%，104.83%. 粉壤土在处理 MV 时，小白菜磷、钾吸收效率分别增大了 50.60%，73.65%. 砂壤土在处理 MV 时，小白菜磷、钾吸收效率分别增大了 40.84%，26.19%. 以上差异均具有统计学意义($P<0.05$). 综上，黏土灌溉后通气处理对小白菜水分、养分利用及产量的提高效果最为显著.

关键词：小白菜；灌溉后通气；水分利用效率；养分吸收效率；不同类型土壤
中图分类号：S275.6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)01-0063-06

雷宏军，李轲，冯凯，等. 3 种土壤灌溉后通气小白菜的水分及养分利用特性[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(1)：63-68.
LEI Hongjun，LI Ke，FENG Kai，et al. Effects of post-irrigation aeration on pakchoi water use efficiency and nutrient uptake characteristics in three kinds of soil[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(1)：63-68. (in Chinese)

Effects of post-irrigation aeration on pakchoi water use efficiency and nutrient uptake characteristics in three kinds of soil

LEI Hongjun[1,2*]，*LI Ke*[1,2]，*FENG Kai*[1,2]，*PAN Hongwei*[1,2]，*YANG Hongguang*[1,2]
(1. School of Water Conservancy，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou，Henan 450046，China；
2. Henan Key Laboratory of Water-saving Agriculture，Zhengzhou，Henan 450046，China)

Abstract：Post-irrigation aeration can improve anoxic environment of crop root rhizosphere and increase crop yield. Hence investigating into effects of post-irrigation aeration on crop growth and nutrient absorption characteristics can provide a scientific guidance for application of aerobic irrigation technique. Three typical soils (clay soil in Zhengzhou，silty loam soil in Luoyang and sandy loam soil in Zhumadian) in Henan Province were collected and pakchoi was selected as experimental crop. Two groups，namely post-irrigation aeration (MV) and control (CK)，were established in pot experiments under subsurface trickle irrigation conditions in a greenhouse，and then the crop water use efficiency and nutrient absorption characteristics were studied. Results show that the crop root activity，root dry

收稿日期：2017-06-16；**修回日期**：2017-08-29；**网络出版时间**：2017-12-26
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171226.1552.016.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1504512，51709110)；河南省科技创新人才计划项目(174100510021)
第一作者简介：雷宏军(1975—)，男，湖北大冶人，副教授，博士生导师(通信作者，hj_lei2002@163.com)，主要从事水资源高效利用及节水灌溉理论与新技术研究.
第二作者简介：李轲(1993—)，男，河南信阳人，硕士研究生(like199351@qq.com)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.

weight and net photosynthetic rate in MV group are significantly improved compared with those in CK group. The transpiration rate in MV group is increased by 20.61%, 15.98% and 33.33% in the clay, silty loam and sandy loam soils, respectively. The yield and water use efficiency are increased by 38.08% and 52.70%, and the absorption efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium are increased by 61.65%, 66.54%, and 104.83% in the clay soil. In the sandy loam soil, the absorption efficiency of phosphorus and potassium are increased by 50.60% and 73.65% and the absorption efficiency of phosphorus and potassium are increased by 40.84% and 26.19%. These differences in the parameters between MV and CK groups are all of statistical significance ($P<0.05$). As such post-irrigation aeration can improve water, nutrient use efficiencies and yield of pakchoi in the clay soil significantly.

Key words: pakchoi; post-irrigation aeration; water use efficiency; nutrient uptake efficiency; different soil types

中国当前的农业灌溉方式存在着灌溉水利用效率低下、节水灌溉面积有待增加等突出问题[1],且传统灌溉水分流失容易造成土壤盐碱化[2].滴灌作为高效节水灌溉技术的代表之一得到了迅速发展.然而,这种高效的滴灌方式在灌溉过程中,水分进入土壤,驱替了孔隙中的空气,也可能造成根区缺氧[3],低氧胁迫状况下作物根系有氧呼吸和新陈代谢受到抑制,根系活力下降,根生长减缓[4],根系对水分和养分的吸收减慢,作物叶片叶绿素含量和光合作用强度降低[5],植株生长受到影响,积累的干物质量明显减少,最终导致果实产量和品质下降[6].

针对上述问题,国内外众多研究学者进行了大量试验研究,提出了利用滴灌或地下滴灌系统将空气输送到作物根区进行通气的新型灌溉技术[7].灌后通气能显著提高水分利用效率和产量[8].但是,目前不同类型土壤灌溉后通气处理作物对水分与养分利用的特性尚不清楚,因此,研究灌溉后通气不同土壤作物水分和养分利用的特性,可丰富灌溉后通气研究成果,并为新型节水灌溉技术推广使用提供理论依据和实践指导.文中拟以河南省3种典型质地土壤为例,探讨灌溉后通气对不同土壤作物水分和养分利用特性的影响.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在河南省郑州市华北水利水电大学农业高效用水试验场智能日光温室内进行.该地位于113°46′54.61″E,34°47′5.01″N,年平均气温为14.4 ℃,年均相对湿度为29%.温室建筑总面积为537.6 m^2,跨度为9.6 m,开间为4 m;玻璃温室内,南面、北面分别装有风机和湿帘,以调节温室内温度、湿度;期间温室内温度及空气湿度分别控制在30 ℃和85%以内.

1.2 供试材料

供试作物为上海兴绿蔬菜种苗研究所培育的“特选苏州青”.选用河南省3种典型土壤为供试对象,依据美国土壤分类制划分方法,分别为郑州黏土(YC)、洛阳粉壤土(SCL)和驻马店砂壤土(HL),下文简称为黏土、粉壤土和砂壤土,土壤基本理化性质见表1,表中 m 为质量比;θ_m 为田间持水率;φ 为颗粒体积百分比;黏粒、粉砂、砂粒的粒径分别为 $d<0.002$,$0.002\leqslant d<0.020$,$0.020\leqslant d\leqslant 2.000$ mm.

表1 土壤基本理化参数

Tab.1 Basic physical and chemical parameters of tested soils

土壤	pH值	m/(mg·kg^{-1})				θ_m/%	φ/%		
		速效磷	速效钾	碱解氮	有机质		黏粒	粉砂	砂粒
黏土	8.05	5.49	98.39	41.13	11.91	28.0	55	32	13
粉壤土	8.05	5.49	124.39	51.13	14.91	25.2	19	52	29
砂壤土	6.31	8.14	119.91	68.19	14.93	24.7	11	35	54

1.3 试验设计

设置灌溉后通气组(MV)和普通地下滴灌对照组(CK),3种供试土壤,共计6个处理,分别计为CK-YC,MV-YC,CK-SCL,MV-SCL,CK-HL和MV-HL,6次重复.盆栽小白菜采用半埋式,试验用盆栽桶上口直径为30 cm,下口直径为21 cm,高25 cm.试验用土风干过筛,每盆装土13.5 kg;种植前每桶加入速溶性底肥19 g,N,P,K的质量百分

比分别为15%,15%,30%,搅拌均匀后分层压实回填.2016年9月15日选取生长良好的3叶龄小白菜幼苗移栽到盆栽桶中,每盆2棵,并浇透保苗水.9月25日间苗,每盆保留1株.11月3日,收获小白菜地上部和根系.

所有盆栽植物均采用地下滴灌的灌水方式,采用管间滴头供水,每排桶栽布置一条输水支管,滴头与输水支管之间使用毛管连接在一起,所有输水支管连接在输水干管上,并在连接处装有阀门控制开关,供水压力为0.1 MPa.滴头选用耐特菲姆滴头,埋深为10 cm,滴头设计流量为2 L/h.

灌溉时,处理MV和CK同时进行.灌水结束后,关闭CK的供水管路,对MV单独通气,即传统灌溉结束后将MV的输水管道中的余水排净,之后利用空气压缩机将空气通过滴灌管道输送到根区.非灌溉时,直接对MV单独通气.加气量根据式(1)计算[9],按最大加气量计算结果为4.06 L/盆,每2 d通气1次.其他日常管理措施所有盆栽保持一致.

$$V=\frac{\pi r^2 hf(1-\theta)}{1\ 000},\qquad(1)$$

式中:V为每次通气量,L;r为盆栽的等效盆半径,cm;h为灌水计划湿润层深度,cm;f为土壤孔隙度,%;θ为土壤体积含水率,%.

所有盆栽定植之前采用烘干法测定其初始含水率.当土壤含水率下降至田间持水量的60%时开始灌水,每次灌水后土壤含水率达到田间持水量的85%.灌水周期根据每天称重结果计算的土壤含水率确定.试验中,滴头与输水支管之间用毛管连接,每根毛管中间均安装有连接器.称重时从连接器处断开,保证每盆称重时的状态保持一致,避免影响称重结果.

1.4　指标测定方法

1.4.1　光合作用指标

净光合速率和蒸腾速率采用美国LI-COR公司生产的Li 6400XT型光合测定仪测定,一般在晴天上午10:00进行,测量时选取顶部第2片完全舒展开的新叶[10].在小白菜生长旺盛时期测定净光合速率和蒸腾速率(分别于10月16日、10月17日、10月18日测量上述光合指标).

1.4.2　根系及生物量

收割小白菜地上部并挖取根系,使用精度为0.01 g的天平分别称量地上部和地下部的鲜质量,后置于纸质文件袋中于烘箱105 ℃杀青10 min,调整至70 ℃继续烘72 h至恒重,称量样品干物质量.

使用直尺测量单株完整根系的最大根长;使用排水法测量根体积[11].根系活力根据氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定[12].水分利用效率为地上部生物量干质量与灌溉水用量的比值.

1.4.3　养分吸收效率

利用凯氏定氮法测定植株全氮;利用钼锑抗比色方法测定植株全磷;利用火焰光度法测定植株全钾[13].养分吸收效率为植株地上部及地下部养分吸收总量与肥料施用量的质量比值,再乘以100%.

1.5　数据统计分析

研究中对所有试验测定数据均取平均值,并计算标准差,利用Excel进行处理绘图分析,SPSS 18.0进行试验数据统计分析,当$P<0.05$时认为差异具有统计学意义.

2　结果分析

2.1　根系指标

表2为小白菜的根系生长指标,表中*RFW*,*RDW*,*RV*,*RL*分别为根鲜质量、根干质量、根体积、根长.结果表明,与处理CK相比,黏土和粉壤土在处理MV时的根干质量、根长、根体积分别增加了73.67%,66.00%,75.82%和89.38%以及60.89%,60.38%,76.65%和123.51%,MV与CK之间差异具有统计学意义($P<0.05$);与处理CK相比,砂壤土在MV时的根干质量、根长、根体积分别提高了49.02%,55.93%和102.53%,差异具有统计学意义($P<0.05$).

表2　不同处理下小白菜的根系状况

Tab.2　Pakchoi root system conditions in two groups

土壤类型	处理	*RFW*/(g·株$^{-1}$)	*RDW*/(g·株$^{-1}$)	*RV*/ml	*RL*/cm
黏土	CK-YC	4.71±0.45c	0.50±0.01c	4.33±0.75c	15.30±2.63c
黏土	MV-YC	8.11±0.79a	0.83±0.07ab	8.20±0.75a	26.90±0.50b
粉壤土	CK-SCL	4.96±0.84c	0.53±0.05c	3.70±1.04c	19.53±3.88c
粉壤土	MV-SCL	7.98±0.78ab	0.85±0.12a	8.27±1.69a	34.50±1.92a
砂壤土	CK-HL	5.50±0.80bc	0.51±0.00c	3.95±0.07c	17.70±4.24c
砂壤土	MV-HL	7.33±0.84ab	0.76±0.04ab	8.00±0.82a	27.60±0.42b

注:表中数值为平均值±标准差($n=6$),同列不同字母表示$P<0.05$的差异具有统计学意义,下同

图1为小白菜根系活力指标. 与处理CK相比，黏土、粉壤土和砂壤土在处理MV时的根系活力A_r分别增加了86.09%，47.90%和53.61%，差异具有统计学意义($P<0.05$).

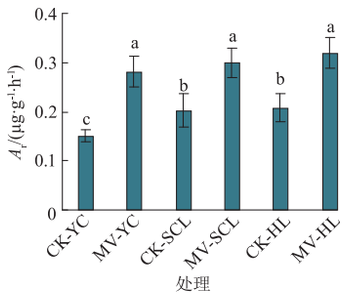


图1 不同土壤条件下盆栽小白菜的根系活力

Fig. 1 Pakchoi root activity in different soils

2.2 净光合速率

图2为不同土壤小白菜的净光合速率Pn.

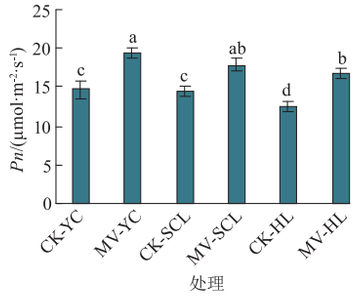


图2 不同土壤条件下盆栽小白菜的净光合速率

Fig. 2 Pakchoi net photosynthetic rate in different soils

与处理CK相比，3种土壤在处理MV时的小白菜净光合速率分别增加了32.65%，23.45%和33.33%，差异具有统计学意义($P<0.05$).

2.3 蒸腾速率

不同土壤小白菜蒸腾速率Tr如图3所示. 与处理CK相比，黏土和粉壤土在处理MV时的小白菜蒸腾速率分别增加20.61%和15.98%($P<0.05$)，而砂壤土处理MV的增长不具有统计学意义.

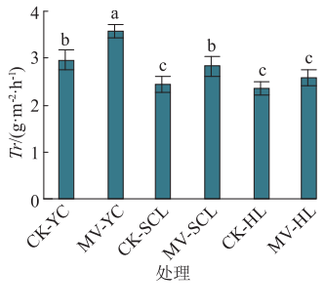


图3 不同土壤小白菜蒸腾速率

Fig. 3 Pakchoi transpiration rate in different soils

2.4 水分利用效率

表3为小白菜生物量及水分利用效率. 表中AFW，ADW，WUE分别为地上部鲜质量、地上部干质量、水分利用效率. 与处理CK相比，黏土在处理MV时的地上部鲜质量和干质量分别增加了78.91%和44.11%，粉壤土在MV时的地上部干质量增加了32.30%，差异具有统计学意义($P<0.05$). 与处理CK相比，黏土在MV时的水分利用效率增大了52.70%($P<0.05$).

表3 小白菜生物量及水分利用效率

Tab. 3 Pakchoi biomass and water use efficiency

土壤类型	处理	AFW/g	ADW/g	WUE/(g·L^{-1})
黏土	CK－YC	133.35±21.10c	7.89±1.04bc	1.48±0.14c
黏土	MV－YC	238.58±14.88a	11.37±1.34a	2.26±0.12a
粉壤土	CK－SCL	111.15±49.39c	7.03±1.50c	1.60±0.08b
粉壤土	MV－SCL	153.48±48.06bc	9.16±1.80b	1.84±0.36b
砂壤土	CK－HL	151.41±28.38bc	8.29±0.39bc	1.63±0.07b
砂壤土	MV－HL	199.97±37.17ab	9.72±1.43ab	1.83±0.32b

2.5 养分吸收效率

表4为不同处理小白菜N，P，K的养分吸收效率NUE. 与处理CK相比，黏土在处理MV时的N，P，K吸收效率分别增大了61.65%，66.54%，104.83%($P<0.05$). 粉壤土在MV时的P，K吸收效率分别增大了50.60%，73.65%($P<0.05$). 砂壤土在MV时的P，K吸收效率分别增大了40.84%，26.19%($P<0.05$).

表4 小白菜养分吸收效率

Tab. 4 Pakchoi nutrient use efficiency

土壤类型	处理	NUE/%		
		N	P	K
黏土	CK－YC	9.88±1.38bc	1.09±0.08e	5.60±0.18c
黏土	MV－YC	15.97±3.93a	1.82±0.09c	11.47±0.53a
粉壤土	CK－SCL	8.80±0.17c	0.92±0.04b	6.66±0.27e
粉壤土	MV－SCL	11.60±0.60bc	1.38±0.12d	11.56±0.87a
砂壤土	CK－HL	10.53±0.76b	1.81±0.05c	8.04±0.52d
砂壤土	MV－HL	12.65±2.12b	2.55±0.14a	10.14±0.37b

3 讨 论

1）灌溉后通气增加小白菜产量和养分吸收效果的理论探讨.

土壤微生物是土壤有机质的主要分解者，土壤微生物具有保持和提高土壤肥力的作用，促进了植株根系的生长和发育，从而促进了植株生长. 常规灌溉易造成灌溉水驱替土壤孔隙中的氧气，导致作物出现缺氧胁迫现象[14]. 根系及根区微生物的有氧呼吸需要消耗氧气，根际土壤中氧含量不足会抑制

作物根系有氧呼吸和土壤微生物代谢,抑制根系发育,最终造成减产[15]. 张璇等[16]的研究结果表明,土壤酶活性和植株产量与灌溉后通气量之间呈现明显的响应关系,总体上呈正相关关系,这是由于灌溉后土壤孔隙中原来容纳空气的空间被水分占据,低氧浓度降低了根区酶的活性,进而影响作物的代谢速率,从而限制作物的生长;灌溉后通气,能有效改善根区氧气含量,土壤微生物在氧气充足的情况下进行有氧呼吸分解有机质,保持土壤肥力,促进根系生长,根系保持较高活力,提高作物产量.

试验中,灌溉后通气处理使郑州黏土小白菜水分利用效率显著提高,这与陈涛等[17]利用增氧灌溉研究马铃薯水分利用效率的结论一致.

灌溉后通气不仅能提高小白菜水分利用效率,而且提高了养分吸收效率. 试验中,灌溉后通气,小白菜氮、磷、钾的吸收量要高于对照处理,且氮素吸收效率也有所提高. 胡志华等[18]研究认为水稻根部增氧可以提高产量并促进对氮素的吸收与积累,与文中研究结论一致.

另外,试验中,灌溉后通气处理对3种土壤磷、钾的吸收效率提升显著. 常规滴灌过程中,滴头附近土壤含水率急剧增大,由于滴头附近土壤和周围土体存在较大土水势梯度,土壤水迅速扩散,形成一个由内到外含水率逐渐减小的湿润体[19]. 湿润体内土壤孔隙中的氧气被灌溉水驱替,质地黏重的土壤中氧气补充较慢,灌溉后根区易出现暂时性缺氧环境[14]. 与常规地下滴灌相比,灌溉后通气处理通过将空气输送到作物根区,可迅速提高地下滴灌湿润体土壤导气率(1.6~8.4倍)[20],改善了根区缺氧状况,为根系有氧呼吸创造条件,提高了灌溉水的高效利用,促进了植株对养分的吸收.

2) 灌溉后通气对不同质地土壤的影响.

试验数据显示,灌溉后通气处理对黏土小白菜的产量、水分利用效率、养分吸收效率均有较大提高,而砂壤土的这些指标提高较小,粉壤土的提升效果介于两者之间. 这是因为同一容重条件下土壤导气率按土质由小到大表现为砂壤土,粉壤土,黏土[20-21]. 在灌溉条件下,黏土由于孔隙率较小,极易缺氧,因此无论是在灌溉过程中还是灌溉后通气,显然对黏土的改善效果最好. 综上所述,郑州黏土灌溉后通气对小白菜种植的改善效果最为明显,主要原因是黏土透气性弱,容易产生缺氧状况,提升上限较大.

4　结　论

1) 与处理CK相比,灌溉后通气促进根系生长,提高小白菜根系活力、根长.

2) 与处理CK相比,3种土壤灌溉后通气处理,净光合速率、蒸腾速率显著提高.

3) 较处理CK,灌溉后通气处理的小白菜产量、水分利用效率、养分吸收效率都明显提高.

4) 综合小白菜根系生长、水分养分利用效率等指标,黏土灌溉后通气处理具有最佳的改善效果.

参考文献(References)

[1] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报, 2015,33(1):78-92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015,33(1):78-92. (in Chinese)

[2] DOU Chaoyin, KANG Yaohu, WAN Shuqin, et al. Soil salinity changes under cropping with *Lycium barbarum* L. and irrigation with saline-sodic water[J]. Pedosphere, 2011, 21(4):539-548.

[3] DREW M C. Oxygen deficiency and root metabolism:injury and acclimation under hypoxia and anoxia [J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 1997,48(1):223-250.

[4] 刘义玲, 李天来, 孙周平,等. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜生长、根呼吸代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2010,21(6):1439-1445.
LIU Yiling, LI Tianlai, SUN Zhouping, et al. Impacts of root-zone hypoxia stress on muskmelon growth, its root respiratory metabolism, and antioxidative enzyme activities [J]. Chinese journal of applied ecology, 2010,21(6):1439-1445. (in Chinese)

[5] HORCHANI Faouzi, GALLUSCI Philippe, BALDET Pierre, et al. Prolonged root hypoxia induces ammonium accumulation and decreases the nutritional quality of tomato fruits[J]. Journal of plant physiology, 2008,165(13):1352-1359.

[6] 刘义玲, 孙周平, 李天来, 等. 根际CO_2浓度升高对网纹甜瓜光合特性及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2013,24(10):2871-2877.
LIU Yiling, SUN Zhouping, LI Tianlai, et al. Effects of elevated rhizosphere CO_2 concentration on the photosyn-

thetic characteristics, yield, and quality of muskmelon [J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24 (10):2871 – 2877. (in Chinese)

[7] 葛彩莲, 蔡焕杰, 王健. 加氧滴灌对日光温室番茄生育末期各项生育指标和水分利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011,29(6):12 – 17,24.
GE Cailian, CAI Huanjie, WANG Jian. Effects of different irrigation levels and ventilation levels on indexes of tomato's last growth period[J]. Agricultural research in the arid areas, 2011,29(6):12 – 17,24. (in Chinese)

[8] 卢泽华, 蔡焕杰, 王健, 等. 不同生育时期根际加气对温室番茄生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012,45(7):1330 – 1337.
LU Zehua, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Effects of rhizosphere ventilation at different growth stages on plant growth and yield of greenhouse tomato[J]. Scientia agricultura sinica, 2012,45(7):1330 – 1337. (in Chinese)

[9] 张敏, 蔡焕杰, 刘杰, 等. 根系通气对温室甜瓜生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010,29(5):19 – 22.
ZHANG Min, CAI Huanjie, LIU Jie, et al. Effects of water and gas treatment on muslmen plant growth characteristics in greenhouse[J]. Journal of irrigation and drainage, 2010,29(5):19 – 22. (in Chinese)

[10] 李胜利, 齐子杰, 王建辉, 等. 根际通气环境对盆栽黄瓜生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008,42(3):280 – 282,288.
LI Shengli, QI Zijie, WANG Jianhui, et al. Effects of rhizosphere ventilation environment on potted cucumber growth[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008,42(3):280 – 282,288. (in Chinese)

[11] 伯姆 W. 根系研究法[M]. 薛德榕,谭协麟, 译. 北京: 科学出版社,1985.

[12] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:119 – 120.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:242 – 270.

[14] 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.

[15] SEY B K, MANCEUR A M, WHALEN J K, et al. Root-derived respiration and nitrous oxide production as affected by crop phenology and nitrogen fertilization[J]. Plant and soil, 2010,326(1):369 – 379.

[16] 张璇, 牛文全, 甲宗霞. 灌溉后通气对盆栽番茄土壤酶活性的影响[J]. 自然资源学报, 2012,27(8):1296 – 1303.
ZHANG Xuan, NIU Wenquan, JIA Zongxia. Influences of rhizosphere aeration supplies on soil enzyme activities foe potted tomato after irrigation[J]. Journal of natural resources, 2012,27(8):1296 – 1303. (in Chinese)

[17] 陈涛, 姚帮松, 肖卫华, 等. 增氧灌溉对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(8):70 – 72.
CHEN Tao, YAO Bangsong, XIAO Weihua, et al. Effect of aerobics irrigation on potato yield and water use efficiency[J]. China rural water and hydropower, 2013(8):70 – 72. (in Chinese)

[18] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根部增氧模式对水稻产量与氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016,22(6):1503 – 1512.
HU Zhihua, ZHU Lianfeng, LIN Yujiong, et al. Effect of root aeration methods on rice yield and nitrogen utilization[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2016,22(6):1503 – 1512. (in Chinese)

[19] 张和喜, 袁友波, 舒贤坤, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动研究[J]. 安徽农业科学, 2008,36(8):3277 – 3279.
ZHANG Hexi, YUAN Youbo, SHU Xiankun, et al. Experimental study on soil – water movement under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2008,36(8):3277 – 3279. (in Chinese)

[20] 郭庆, 牛文全, 张振华. 通气与水分再分布对地下滴灌湿润体导气率的影响[J]. 节水灌溉, 2012(3):1 – 5,9.
GUO Qing, NIU Wenquan, ZHANG Zhenhua. Effect of ventilation and water redistribution on air permeability of wetted soil under subsurface drip irrigation[J]. Water saving irrigation, 2012(3):1 – 5,9. (in Chinese)

[21] 王德胜, 张振华, 雷宏军, 等. 河南省代表性土壤导气性能研究[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2015,31(2):162 – 166,171.
WANG Desheng, ZHANG Zhenhua, LEI Hongjun, et al. Typical soil air conductivity of Henan Province[J]. Journal of Ludong University (natural science edition), 2015,31(2):162 – 166,171. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)