

## 土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量对黄瓜各生育期根系生长特性的影响

沈维 胡德勇\* 姚帮松 肖卫华 张立成 黄正忠 程峰 阮三桂

(湖南农业大学 工学院,长沙 410128)

**摘要** 为研究土壤耕作层不同深度 O<sub>2</sub> 含量对黄瓜各生育期根系生长特性的影响,在大棚内采用不同增氧灌溉方式(A2:每2 h 加氧灌溉,A4:每4 h 加氧灌溉,A8:每8 h 加氧灌溉,CK:不加氧处理)对盆栽黄瓜各生育期进行增氧处理。测定土壤耕作层不同深度 O<sub>2</sub> 含量和黄瓜各生育期的根系活力、根系农艺性状、根系健康指数等指标。结果表明:1)根系活力、根系农艺性状、根系健康指数等指标在黄瓜幼苗期表现为 A4>A2>A8>CK,而初花期和结瓜期表现为 A2>A4>A8>CK。2)相关性分析表明,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系活力,根系农艺性状,根系健康指数呈显著正相关,且土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系各指标相关系数:初花期>结瓜期>幼苗期。由此推断,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量对黄瓜各生育期根系生长有重要影响,在黄瓜幼苗期适量的 O<sub>2</sub> 更利于根系的生长,而在初花期和结瓜期充足的 O<sub>2</sub> 能有效的促进根系生长。

**关键词** O<sub>2</sub>;根系生长;根系活力;农艺性状;健康状况

中图分类号 S152.6;S642.2

文章编号 1007-4333(2017)05-0049-08

文献标志码 A

## Effects of oxygen content in soil magnetism on the growth characteristics of cucumber roots at different growth period

SHEN Wei, HU Deyong\*, YAO Bangsong, XIAO Weihua, ZHANG Licheng,

HUANG Zhengzhong, CHENG Feng, RUAN Sangui

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract** To study the effects of oxygen content at different depth of soil magnetism on the physiological and biochemical characteristics of cucumber root,different aerobic irrigations (A2,increasing oxygen once every two hours;A4,increasing oxygen once every four hours;A8,increasing oxygen once every eight hours;CK,no oxygen increasing) were applied on each growth period of potted cucumber in green house at each growth period. O<sub>2</sub> contents in soil magnetism at different depth were detected and the index of cucumber root activity,agronomic traits,health index were investigated. The results showed that:1)At seedling stage,the index of cucumber root was A4>A2>A8>CK,and at flower stage and mature stages,the index of root was A2>A4>A8>CK;2)Correlation analysis discovered that oxygen content in soil magnetism was positively related to the root activity,agronomic traits,the root health index relationship of cucumber. The correlation between oxygen content and the index of root showed flower stage>mature stage>seedling stage. In conclusion,the oxygen content in soil magnetism played an important role in the growth of cucumber root. At seedling stage,moderate oxygen level was more suitable for the growth of root. However,at flower and mature stages,sufficient oxygen was more effective on the growth of root.

**Keywords** oxygen; the growth of root; root activity; agronomic traits; health index

在土壤形成过程中及建立土壤肥力的基础上,土壤空气状况,特别是氧气状况占着极其显著的地位。土壤耕作层氧气含量不但可以影响根系呼吸、土壤酶活性和土壤养分状况等,而且也是土壤肥力

的要素之一。植物根系是依靠土壤氧气进行呼吸作用产生能量来维持生理活动。不仅仅从理论上,同时在农业生产实践中,研究土壤耕作层氧气具有重大的意义。一般的灌溉方式,根系大多会出现供氧

收稿日期:2016-03-09

基金项目:国家自然科学基金(31272248,31401951);国际科技合作项目(2013DFG91190)

第一作者:沈维,硕士研究生,284005174@qq.com

通讯作者:胡德勇,讲师,博士,主要研究农业环境科学研究,E-mail:hdy9609@hunau.net

不足,根系呼吸作用不强,根区生长环境不良。大量研究表明增氧灌溉不但能提高土壤氧气含量,而且能促进作物根系生长,增强叶片光合特性,提高作物产量和品质。徐欢欢等<sup>[1]</sup>研究表明,增氧灌溉有利于黄瓜的根系发育,茎的生长和生物量的积累,同时还提高了黄瓜雌雄花的比例,进而使黄瓜增产。朱练峰等<sup>[2-3]</sup>研究表明,在增氧灌溉条件下,保证了水稻根系有充足的氧气供应,保持了较高的根系活力,延缓了叶片衰老,提高了水稻产量。孙周平等<sup>[4]</sup>研究表明,不通气土壤或土壤氧气不足是限制作物生长主要因子, $O_2$ 浓度较低,有氧呼吸电子传递链停止,根系呼吸速率下降。张国红等<sup>[5]</sup>研究表明,土壤氧气含量对土壤微生物活性和根系代谢有着显著影响,土壤氧气含量充足,能提高根系呼吸作用和根系活力,促进根系生长。反之,根系缺氧会导致根系呼吸紊乱,严重时根系甚至会死亡。目前在国内外土壤科学研究工作中,土壤气相部分比起固相或是液相的研究更是薄弱,气相部分大多集中在土壤中 $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 等温室气体的研究,然而土壤中氧气状况的研究鲜有报道。肖元松等<sup>[6]</sup>和朱艳等<sup>[7]</sup>一致认为增氧灌溉能提高土壤氧气含量并且有利于作物生长,但是没有测定土壤耕作层氧气含量,也没有分析土壤耕作层氧气含量与作物根系存在何种联系。本研究通过增氧灌溉技术对土壤耕作层加入氧气,研究土壤耕作层氧气含量与黄瓜各生育期根系活力、根系农艺性状和根系健康状况的关系以及土壤耕作层氧气含量与黄瓜根系各指标的相关性,旨在改善作物根区缺氧的生长环境、促进根系生长发育、为根系生长提高一个良好健康的环境,以期为今后增氧灌溉技术的推广奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于2015年8—11月在湖南农业大学土肥高效利用国家重点实验室的大棚内进行,试验采用盆栽方法,通过人工控水保证黄瓜所需的水分。黄瓜品种为农科院蔬菜研究所提供园丰元6号黄瓜,试验土壤为湖南农业大学耘园基地的菜地土,土壤质地为粘性土,取土壤耕作层10~30 cm表层的熟土,晒干磨碎,过1 cm的筛填装在垫有纱布的盆栽盆中,盆为圆台形,装土深度为32.0 cm,装土上底面直径30.0 cm,下底面直径26.8 cm,初始装土重量

25.0 kg。桶内装土体积为 $20.2\text{ dm}^3$ ,土壤比重2.12,干容重1.24,重量含水率30.6%。盆内预埋增氧管和气体收集装置。土壤的pH为5.32,田间持水量的重量含水率为32.8%,有机质、全氮、全磷和全钾质量分数分别为13.97、1.63、0.89和20.22 g/kg。

### 1.2 设计

试验设置4个处理,10个重复,处理1(A2)每2 h加一次氧,处理2(A4)每4 h加一次氧,处理3(A8)每8 h加一次氧,设置(CK)为空白组。每组从每天的凌晨开始增氧,通氧时间为2 min。在黄瓜的试验阶段进行增氧处理,试验阶段的起止时间为幼苗期至结瓜期。黄瓜的生育期分为4个阶段:8月16—24日为发芽期,8月24日—9月14日为幼苗期,9月17日—10月5日为初花期,10月6日—11月2日为结瓜期。在人工控水的过程中,保证发芽期所需水量为田间持水率的80%~90%,幼苗期所需水量为田间持水率的70%~80%,初花期所需水量为田间持水率的85%~95%,结瓜期所需水量为田间持水率的90%以上,利用自制增氧灌溉设备(专利号ZL201320187007)对土壤耕作层进行增氧。在桶内预埋增氧管,利用增氧泵将空气压缩通入土体中,置换出土体内的气体,提高土壤内氧气含量。利用水分测定仪直接测定土壤中的含水量,根据含水量、蒸发量、加水量保证每个时期的含水量不低于控水量的下限。

### 1.3 测定方法

土壤耕作层不同深度(20和30 cm)氧气含量测定:将测氧仪OXYGEN MONITOR(YTK01)的吸气接口插入气体收集装置的阀门,打开活塞,待测氧仪读数稳定不变时,记录土壤中 $O_2$ 含量。每次测定土壤氧气含量是在下一次增氧前15 min测定,每天测定3次,即每天的7:45、15:45和23:45测定。

根系各项指标测定:在进行破坏性试验的前24 h,提前关闭增氧设备,(目的是使根区生长环境的保持相对稳定,不受到通氧的影响)。取样时,利用纱布将土体取出,浸泡在盛有清水的盆中,浸泡一段时间后,用小流量水管小心冲洗黄瓜根部,尽量保持根系的完整。待洗净后,用吸水纸将根系上残留的水分吸干,将其放入EPSON express11000xL根系扫描仪中测定根系的根总长、根总面积、根平均直径和根系健康指数(健康指数:每种作物在EPSON express11000xL根系扫描仪中存在一种标准色,先选定黄瓜根系的标准色,仪器扫描根系所得到颜

色与标准色对比,根据色差得到健康指数。)最后将扫描完的根系采用 TTC 还原法测定出单位质量四氮唑还原强度,单位质量四氮唑还原强度是反应根系活力重要参数。(由于发芽期时间短,未测定根系指标)

统计分析利用 SPSS21 分析各处理根系各项指标的差异性以及土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系各项指标的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤不同深度 O<sub>2</sub> 含量的变化

为了直观形象地观察土壤耕作层不同深度(20 和 30 cm)的 O<sub>2</sub> 含量,将不同深度(20 和 30 cm)O<sub>2</sub> 含量 7 日变化的平均值绘于图 1。每组都符合随着

土壤深度的增加,O<sub>2</sub> 含量逐渐降低的规律。A2 组加氧频率最大,在同等深度 O<sub>2</sub> 含量也最高,CK 组没有进行增氧处理,同等深度 O<sub>2</sub> 含量最低。A2 组 30 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.52%~20.58%,20 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.68%~20.74%;A4 组 30 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.41%~20.46%,20 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.56%~20.61%;A8 组 30 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.29%~20.34%,20 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.41%~20.48%;CK 组 30 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.09%~20.15%,20 cm 深度 O<sub>2</sub> 含量 20.29%~20.33%。对土壤耕作层进行不同的增氧处理,土壤耕作层不同深度 O<sub>2</sub> 含量明显不同,因此对黄瓜根系生长产生了不同的影响。

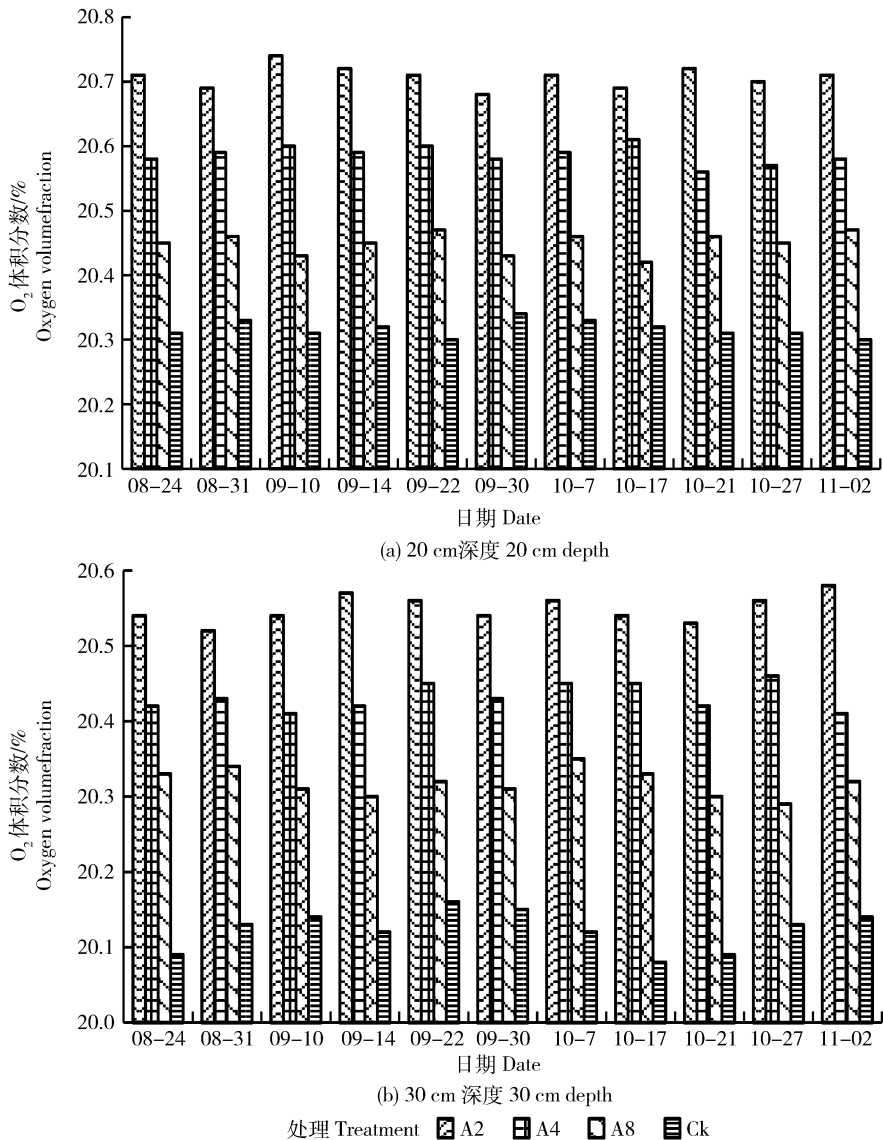


图 1 不同深度各组氧气含量变化

Fig. 1 The changes of different depth oxygen content

## 2.2 O<sub>2</sub> 含量对根系活力的影响

根系活力是反应根系生长的一个重要的指标,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量是影响根系活力的主要因素之一,将各处理组单位质量四氮唑还原强度值列于表 1。处理组相比空白组都存在显著差异。A2、A4 和 A8 组根系活力都高于 CK 组根系活力,说明土壤经过增氧处理,耕作层 O<sub>2</sub> 含量提高,根系活力越强。各组初花期的根系活力表现为最强,结瓜期次之,幼苗期最弱,说明在黄瓜的初花期增强通氧的频

率,加大土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量,更有利于根系活力的提高。在幼苗期,根系活力表现为 A4>A2>A8>CK,说明黄瓜处于幼苗期,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量高不一定意味着根系活力强,因此在黄瓜幼苗期通入适量的 O<sub>2</sub> 含量更有利于根系活力。在初花期和结瓜期,根系活力表现为:A2>A4>A8>CK,土壤耕作层氧气含量越大,根系活力越强,代表根系生长越旺盛,因此在黄瓜的初花期和结瓜期,加大通氧频率和通氧量,增加土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量更利于根系的生长。

表 1 不同处理下黄瓜各生育期的根系活力

Table 1 Different processing of cucumber root activity in every growth period

处理 Treatment	幼苗期 Seeding stage	初花期 Flower stage	结瓜期 Mature stage
A2	254.57 aA	488.38 aA	364.18 aA
A4	285.91 bA	381.62 bB	315.15 aA
A8	223.32 aA	330.58 bB	264.79 bB
CK	188.56 cB	267.29 cC	213.53 cB

注:同列不同小写字母表示处理差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示处理间差异极显著( $P<0.01$ ),下同。

Note: Different letter represent significant difference ( $P<0.05$ ), different capital letter represent extremely significant difference ( $P<0.01$ ). The same below.

## 2.3 O<sub>2</sub> 含量对根系农艺性状的影响

根系农艺性状是能最直观反应出根系生长的状况。将黄瓜个生育期的根系农艺性状列于表 2。A2、A4 和 A8 组与 CK 组存在着显著差异,有的甚至存在极显著差异,并且处理组根系农艺性状明显高于空白组,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 能促进根系的生长发育。在黄瓜幼苗期,A4 组的农艺性状表现最好,A2

组次之,A8 组再次之,与根系活力得出的结论一致,说明在幼苗期,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量不是越多越好,适量的 O<sub>2</sub> 含量对根系农艺性状促进作用最明显。在黄瓜初花期和结瓜期,根系农艺性状:A2>A4>A8>CK,也与根系活力得出的结论一致,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量越高,根系农艺性状表现最强,在黄瓜后 2 个时期,通入足量的 O<sub>2</sub> 更有利于黄瓜根系的生长。

表 2 不同处理下黄瓜各生育期的根系农艺性状

Table 2 Different processing of cucumber agronomic traits in every growth period

处理 Treatment	幼苗期 Seeding stage			初花期 Flower stage			结瓜期 Mature stage		
	根总长/ cm Total length of roots	根总面积/ cm <sup>2</sup> Total area of roots	根平均 直径/mm Average diameter of roots	根总长/ cm Total length of roots	根总 面积/cm <sup>2</sup> Total area of roots	根平均 直径/mm Average diameter of roots	根总长/ cm Total length of roots	根总 面积/cm <sup>2</sup> Total area of roots	根平均 直径/mm Average diameter of roots
A2	121.86 a	16.73 a	0.35 a	521.37 a	27.63 a	0.53 a	688.25 a	32.21 a	0.61 a
A4	142.45 b	18.44 b	0.38 b	492.38 b	26.45 b	0.50 a	652.31 b	31.14 a	0.53 b
A8	118.34 a	16.25 a	0.32 a	477.14 b	25.18 c	0.48 b	621.87 c	29.45 b	0.50 b
CK	96.59 c	13.43 c	0.27 c	453.88 c	24.24 d	0.43 c	598.31 c	27.85 b	0.47 c

### 2.4 O<sub>2</sub> 含量对根系健康状况的影响

根系的健康状况能直接反应根系生长的好坏,选取黄瓜后 3 个生育期的根系进行根系扫描,将黄瓜根系的健康指数绘于图 2。增氧组的健康系数均高于空白组,且存在显著差异。说明随着土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量的提高,根系健康指数也会提高,根系的健康状况也会越好。在黄瓜幼苗期,健康指数的结

果符合根系活力和根系农艺性状的结果,表现为 A4>A2>A8>CK;在黄瓜初花期和结瓜期,也符合前 2 个指标测定结果:A2>A4>A8>CK。说明在黄瓜幼苗期土壤耕作层加入适量的 O<sub>2</sub>,健康指数表现为最高,根系健康状况最好。在初花期和结果期,土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量越高,根系健康指数越大,此时充足的 O<sub>2</sub> 含量更有利于黄瓜根系的健康成长。

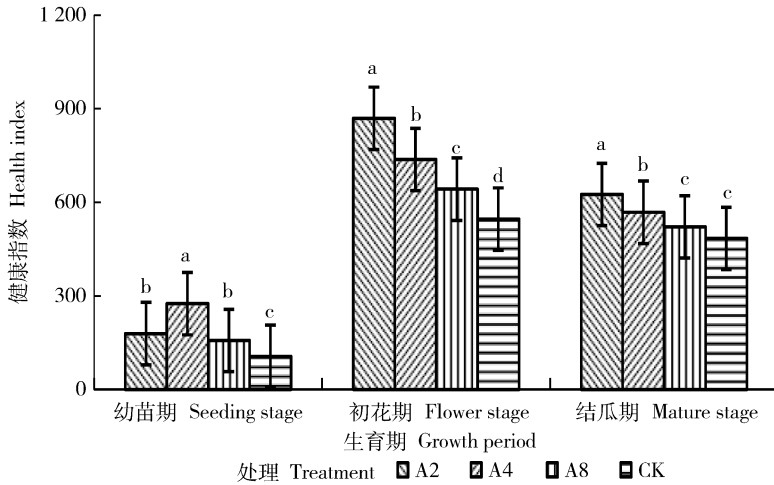


图 2 各生育期根系健康指数

Fig. 2 Health index in every growth period

### 2.5 O<sub>2</sub> 含量及黄瓜根系各项指标的相关性分析

土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系活力、根总长、根总面积、根平均直径、根系健康情况存在密切联系,利用 SPSS 软件将测定的土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与黄瓜各生育期根系的各项指标进行相关性分析列于表 3,表 4,表 5。土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系的各项指标都存在一定的相关性且呈显著正相关,在幼苗期,O<sub>2</sub> 含量与根系各项指标在 0.05 水平上相

关,在初花期和结瓜期,O<sub>2</sub> 含量与根系各项指标在 0.01 水平上相关。土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量与根系各指标相关系数:初花期>结瓜期>幼苗期,说明初花期根系各项指标与 O<sub>2</sub> 含量的相关性最大,意味 O<sub>2</sub> 含量在初花期对根系的生长影响力最大。因此在初花期提高增氧灌溉频率,增氧量和增氧时间,使土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量增加,能有效的促进黄瓜根系生长。

表 3 幼苗期 O<sub>2</sub> 含量与黄瓜根系各项指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient with O<sub>2</sub> content and each index of cucumber root in seedling stage

指标 Index	氧气 Oxygen	根系活力 Activity of roots	根总长 Total length of roots	根总面积 Total area of roots	根平均直径 Average diameter of roots	健康指数 Health index
氧气	1.000					
根系活力	0.642*	1.000				
根总长	0.613*	0.793**	1.000			
根总面积	0.584*	0.765**	0.782**	1.000		
根平均直径	0.545*	0.712**	0.704**	0.752**	1.000	
健康指数	0.501*	0.653*	0.613*	0.644*	0.487	1.000

注: \* 表示 0.05 水平显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平显著相关,下同。

Note: \* said the 0.05 level significant correlation, \*\* said the 0.05 level significant correlation, the same below.

表4 初花期 O<sub>2</sub> 含量与黄瓜根系各项指标的相关系数Table 4 Correlation coefficient with O<sub>2</sub> content and each index of cucumber root in flower stage

指标 Index	氧气 Oxygen	根系活力 Activity of roots	根总长 Total length of roots	根总面积 Total area of roots	根平均直径 Average diameter of roots	健康指数 Health index
氧气	1.000					
根系活力	0.921**	1.000				
根总长	0.883**	0.847**	1.000			
根总面积	0.853**	0.822**	0.817**	1.000		
根平均直径	0.837**	0.806**	0.762*	0.815**	1.000	
健康指数	0.786**	0.722**	0.703**	0.735**	0.681*	1.000

表5 结瓜期 O<sub>2</sub> 含量与黄瓜根系各项指标的相关系数Table 5 Correlation coefficient with O<sub>2</sub> content and each index of cucumber root in mature stage

指标 Index	氧气 Oxygen	根系活力 Activity of roots	根总长 Total length of roots	根总面积 Total area of roots	根平均直径 Average diameter of roots	健康指数 Health index
氧气	1.000					
根系活力	0.844**	1.000				
根总长	0.801**	0.812**	1.000			
根总面积	0.783**	0.784**	0.782**	1.000		
根平均直径	0.721**	0.756**	0.724*	0.772**	1.000	
健康指数	0.701**	0.706**	0.695*	0.705**	0.618*	1.000

### 3 讨论

黄瓜、马铃薯、番茄等作物常因土壤耕作层气相比例较低或 O<sub>2</sub> 含量较低,都会影响有氧呼吸电子传递链,造成根系呼吸作用减弱,影响根系吸收营养物质以及根系生长发育,进而影响作物地上部分生长<sup>[8]</sup>。为了改善土壤耕作层缺氧的生长环境,许多学者采用增氧灌溉技术向土壤耕作层通入氧气,如肖卫华等<sup>[9]</sup>对烟草进行加氧灌溉处理,提高了烟草的根系活力,促进了烟叶的光合速率,延缓了烟草的衰老;陈新明<sup>[10]</sup>研究发现,增氧灌溉能促进菠萝根系呼吸作用,提升根区生长环境,促进根系生长;宋卫堂等<sup>[11]</sup>在滴灌系统中,增加水中的溶氧量,提高作物根际含氧量,促进作物根系生长,提高作物产量和品质,提高水肥利用率。本试验结果表明增氧灌溉使土壤耕作层氧气含量得到显著提高,提高了黄

瓜根系活力,促进根系生长发育,给根系生长提供了一个良好健康的生长环境。这与前人的研究结果一致。

已有许多学者深入研究了土壤固相、液相部分。气相部分也是集中 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 等温室气体。土壤最主要的气相部分氧气含量研究较少。戴万宏<sup>[12]</sup>,刘平丽<sup>[13]</sup>主要研究土壤剖面 CO<sub>2</sub> 分布特征以及动态变化。范爱武等<sup>[14]</sup>模拟作物土壤中氧气浓度,认为氧气浓度越高的区域冬小麦根系越密集,越有利于冬小麦的抽穗,开花。Aguilar 等<sup>[15]</sup>和 Szal 等<sup>[16]</sup>认为没有展开对土壤耕作层氧气含量的研究,也没有分析土壤氧气含量与作物的各生长指标到底存在何种相关性。本研究不仅测定了土壤耕作层不同深度氧气含量,也分析土壤氧气与作物根系各指标的关联性。得出在黄瓜生长最旺盛的初花期,根系各项指标与土壤耕作层氧气含量相关性最大,因此在此

时期增大增氧频率,增氧量和增氧时间,大幅度提高土壤耕作层氧气含量,越有利于根系的生长发育。

国内外学者一致认为土壤耕作氧气含量越高,作物生长越好。如 Bhattarai 等<sup>[17-19]</sup>,发现土壤氧气含量增加,有利于作物根系的发育,并且叶片叶绿素含量不断上升。胡德勇等<sup>[20-22]</sup>发现不论是机械增氧还是化学增氧,增氧量越大,土壤氧气含量越高,作物种子萌发率越高,根系的可溶性蛋白质和蛋白质可溶性糖含量越高,根系活力越强,果实的产量和品质越高。本研究与其他研究最大的区别在于,在黄瓜幼苗期根系各指标表现为 A4>A2>A8>CK,土壤耕作层氧气含量并不是越高越好,适量的氧气更有利于根系生长。而在初花期和结瓜期,根系各指标表现为 A2>A4>A8>CK。土壤耕作层氧气含量越高,根系生长发育越好。为了证明黄瓜幼苗期需要适量的氧气,初花期和结瓜期需要充足氧气,接下来可以研究土壤耕作层 O<sub>2</sub> 含量对黄瓜各生育期叶片生长特性以及对黄瓜产量产生的影响。

## 参考文献 References

[1] 徐欢欢,姚帮松,苏宁虎,胡德勇,刘朵朵. 输气灌溉对大棚秋黄瓜主要农艺性状的影响[J]. 华北水利水电学院学报,2011,32(4):32-35  
Xu H H, Yao B S, Su N H, Hu D Y, Liu D D. Effects on main agronomic traits of greenhouse cucumber of aerated irrigation [J]. *Journal of north China institute of water resources and hydropower*, 2011, 32(4): 32-35 (in Chinese)

[2] 朱练峰. 根际氧供应对水稻根系生长的影响及其与产量形成的关系[D]. 北京:中国农业科学院,2013  
Zhu L F. Effects of rhizosphere oxygen supply to rice root growth and its relationship with yield[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013 (in Chinese)

[3] Zhu L F, Yu S M, Jin Q Y. Effects of aerated irrigation on leaf senescence at late growth stage and grain yield of rice[J]. *Rice Science*, 2012, 19(1): 44-48

[4] 孙周平,李天来,范文丽. 根际二氧化碳浓度对马铃薯植株生长的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(11):93-97  
Sun Z P, Li T L, Fan W L. The influence of the rhizosphere carbon dioxide concentrations in potato plant growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 93-97 (in Chinese)

[5] 张国红,张振贤,梁勇,曹之富. 土壤紧实度对温室番茄生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报,2004,12(3):70-72  
Zhang G H, Zhang Z L, Liang Y, Cao Z F. Soil compactness Have an impact on greenhouse tomato growth, yield and

quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 70-72 (in Chinese)

[6] 肖元松,彭福田,张亚飞,齐玉吉,王贵芳,王新亮,束怀瑞. 增氧栽培对桃幼树根系构型及氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1995-2002  
Xiao Y F, Peng F T, Zhang Y F, Qi Y J, Wang G F, Wang X L, Shu H R. Effects on configuration of young peach trees roots and nitrogen metabolism of aerated irrigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1995-2002 (in Chinese)

[7] 朱艳,蔡焕杰,侯会静,宋利兵. 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  
Zhu Y, Cai H J, Hou H J, Song L B. Effects on tomato root area in soil environment and production of aerated irrigation [J]. *Journal of northwestern agricultural university*, 2016, 44(5): 157-162 (in Chinese)

[8] 孙艳军,郭世荣,胡晓辉,高洪波. 根际低氧逆境对网纹甜瓜幼苗生长及根系呼吸代谢途径的影响[J]. 植物生态学报,2006,30(1):112-117  
Sun Y J, Guo S R, Hu X H, Gao H B. Influence of metabolic pathways on hypoxia stress muskmelon seedling growth and root respiration[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 112-117 (in Chinese)

[9] 肖卫华,姚帮松,张文萍,张立成. 加气灌溉对烟草生长影响规律的研究[J]. 中国农村水利水电,2014,3(2):30-32  
Xiao WH, Yao B S, Zhang W P, Zhang L C. Effects on law of tobacco growth of aerobic irrigation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, 13(2): 30-32 (in Chinese)

[10] 陈新明. 加气灌溉对菠萝根区土壤呼吸和生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(6):543-547  
Chen X M. Effects on oxygenation on soil respiration and crop physiological characteristics in pineapple[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(6): 543-547 (in Chinese)

[11] 宋卫堂,高丽红,张树阁,滕光辉,黄之栋. 深液流栽培番茄根际氧环境的试验研究[J]. 中国农学通报,2005,21(1):219-223  
Song W T, Gao L H, Zhang S G, Teng G H, Huang Z D. Oxygen flow cultivated tomato rhizosphere environment test research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(1): 219-223 (in Chinese)

[12] 戴万宏. 农田土壤空气 CO<sub>2</sub> 动态和土壤-大气界面 CO<sub>2</sub> 释放的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2002  
Dai W H. Study of farmland soil CO<sub>2</sub> dynamic air and soil-interface of CO<sub>2</sub> release[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2002 (in Chinese)

[13] 刘平丽. 稻田土壤剖面 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 分布特征及周转规律研究[D]. 南京:南京农业大学,2011  
Liu L P. Study of paddy soil profile characteristics of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> distribution patterns and turnover[D]. Nanjing: *Nanjing Agricultural University*, 2011 (in Chinese)

[14] 范爱武,刘伟,刘炳成. 作物生长的土壤中氧气浓度场的稳态数

- 值模拟[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 97-99
- Fan A W, Liu W, Liu B C. Crop growth in the soil of the steady state simulation of oxygen concentration field[J]. *Journal of Engineering [J]. Thermophysics*, 2003, 24 (1): 97-99 (in Chinese)
- [15] Aguilar E A, Turner D W, Gibbs D L, Sivasithampara K. Oxygen distribution and movement, respiration and nutrient loading in banana roots subjected to aerated and oxygen-depleted environments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 253(253): 91-102
- [16] Szal B, Drozd M, Rychter A M. Factors affecting determination of superoxide anion generated by mitochondria from barley roots after anoxia[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(21): 1339-1346
- [17] Bhattarai S P, Su N, Midmore D J. Oxygenation unlock yield potentials of crop in oxygen-limited soil environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 313-377
- [18] 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
- [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*, 2014, 144: 285-298
- [20] 胡德勇, 姚帮松, Su Ninghu, 肖卫华. 增氧灌溉对秋黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 节水灌溉, 2015, 5(11): 55-58
- Hu D Y, Yao B S, Su N H, Xiao W H. Effects on seed germination and seedling growth of autumn cucumber of aerated irrigation[J]. *Water Save Irrigation*, 2015, 5(11): 55-58 (in Chinese)
- [21] 胡德勇, 姚帮松, Su Ninghu, 沈维. 增氧灌溉对秋黄瓜根系生长的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(8): 1-5
- Hu D Y, Yao B S, Su N H, Shen W. Effects on autumn cucumber root growth of aerobic irrigation[J]. *Journal of northwestern agricultural university*, 2016, 25(8): 1-5 (in Chinese)
- [22] 胡德勇, 姚帮松, Su Ninghu. 增氧灌溉对秋黄瓜根系生理生化特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 65-68
- Hu DY, Yao B S, Su N H. Effects on root physiological and biochemical characteristics of aerobic irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(10): 65-68 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华