

网络出版时间:2016-04-07 09:00 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.05.021
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.042.html

加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响

朱 艳^{a,b},蔡焕杰^{a,b},侯会静^a,宋利兵^{a,b}

(西北农林科技大学 a 旱区农业水土工程教育部重点实验室,b 旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探明加气灌溉对番茄根区土壤环境及番茄生物量、果实产量和水分利用效率的影响,为加气灌溉的推广提供依据。【方法】以番茄品种“金鹏 10 号”为供试材料,通过温室小区试验,设计了加气和不加气(对照)地下滴灌 2 种处理方式,每个处理 3 次重复,加气灌溉采用 Mazzei287 型文丘里加气设备,定期测定并比较 2 种灌溉方式下的土壤含水量、氧气含量、呼吸速率、温度及番茄生物量、产量和水分利用效率。【结果】与对照相比,加气灌溉使得 10 cm 土层内土壤体积含水量降低了 1.61%,根区土壤氧气含量增加了 0.89%,土壤呼吸速率增加了 26.76%,但土壤温度没有明显变化;加气灌溉下番茄的果实干鲜质量、叶干质量、茎干鲜质量和地上部干鲜质量均显著增大,但根干鲜质量和叶鲜质量无显著变化;同时,加气灌溉下灌溉水分利用效率增加了 23.12%,单株产量提高了 23.12%,单果质量增大了 29.84%。【结论】加气地下滴灌在改善根区土壤环境、提高番茄产量和水分利用效率等方面具有明显优势。

【关键词】 加气灌溉;土壤呼吸;土壤氧气含量;番茄

【中图分类号】 S641.201

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)05-0157-06

Effects of aerated irrigation on root-zone environment and yield of tomato

ZHU Yan^{a,b},CAI Huan-jie^{a,b},HOU Hui-jing^a,SONG Li-bing^{a,b}

(a Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education,

b Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study ascertained the effects of aerated irrigation on root-zone environment, yield, and water use efficiency (IWUE) of tomato to improve the application of aeration irrigation. 【Method】 A Mazzei287 venturi aerated equipment was employed in the experiment with two treatments (aerated irrigation (control) and non-aerated irrigation) and three replications in each treatment. Soil respiration, temperature and oxygen content, biomass, yield and IWUE of tomato were measured and compared regularly. 【Result】 Aerated irrigation significantly improved root-zone environment compared with the control treatment. It reduced soil water content in upper 10 cm soil layer by 1.61%, increased oxygen content by 0.89% and improved soil respiration rate by 26.76%. There was no significant difference in soil temperature. Fruit fresh and dry biomass, leaves dry biomass, stem fresh, and dry biomass also increased by aerated irrigation, while root fresh and dry biomass and leaves fresh biomass remained unchanged. In addition, IWUE, yield per plant, and single fruit weight were increased by 23.12%, 23.12%, and 29.84%, respectively. 【Conclusion】 Aerated irrigation had the advantages of improving root-zone environment and increas-

【收稿日期】 2014-09-29

【基金项目】 国家自然科学基金项目(50779059);国家自然科学基金重点项目(50939005);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110204130004)

【作者简介】 朱 艳(1989—),女,山东枣庄人,硕士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zychalle2012@163.com

【通信作者】 蔡焕杰(1962—),男,河北藁城人,教授,博士,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。

E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

ing tomato yield and WUE.

Key words: aerated irrigation; soil respiration; soil oxygen content; tomato

作物高产不仅依赖作物本身的遗传性状、大气环境、水分、养分等的平衡,良好的根区环境也同等重要。作物根区需要充足的氧气进行根系呼吸和新陈代谢,缺氧引起的根系呼吸减弱会导致蒸发蒸腾速率降低,无差别的离子流动增大,盐分进入作物,进而严重限制作物生长^[1]。根区缺氧会限制根系生长,并进一步影响到冠部的生长。同时,缺氧会减小气孔导度和叶水势^[2]。而且土壤空气是土壤重要的物理组成部分,土壤缺氧会影响土壤与大气的气体交换^[3]。

地下滴灌提高了作物的水分利用效率,可减小灌水对环境造成的不利影响^[4]。但是,在灌水期间灌水器附近形成了一个持续的湿润锋,作物根区在灌水期间的一定时间内维持在水分接近饱和的状态,导致土壤缺氧,尤其是在排水条件比较差的土壤中,甚至在灌水后的一定时间内,水继续代替空气存在于土壤中,因此减小了土壤孔隙中氧气的可利用性和移动性,更加剧了作物根区土壤氧气含量的降低^[5]。

加气灌溉可以利用文丘里加气设备将空气吸入灌溉水中形成水气混合液输送到作物根区,既保证了作物对水分的需求,又能有效抑制作物根区缺氧^[5-8]。最近的研究已经显示出加气灌溉在提高作物产量、促进作物生长等方面的应用前景^[6]。本试验以不加气灌溉为对照,研究加气灌溉对温室番茄根区土壤水分、土壤氧气含量、土壤呼吸、番茄生物量累积、番茄产量和水分利用效率的影响,以期能为加气灌溉的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2013—2014 年在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的日光温室内进行。试验站位于北纬 34°20′,东经 108°24′,海拔高度 521 m。温室内 0~60 cm 土层土壤平均干容重为 1.40 g/cm³,田间持水量为 23.8% (质量含水率)。

供试番茄品种为“金鹏 10 号”,属中早熟品种。定植时间为 2013-08-22,试验结束时间为 2014-01-02。株距 30 cm,垄距 80 cm。垄与垄之间用埋深 100 cm 的塑料膜隔开,防止侧渗。

1.2 试验设计与方法

将 Mazzei287 型文丘里加气设备安装在灌水毛管的首端,在进水口和毛管末端都装有压力表,进口压力为 0.1 MPa,毛管末端压力为 0.02 MPa,由排气法得到进气量约占灌溉水量的 17%,灌溉毛管中多余的水可回流。滴头埋深为 15 cm,距离作物茎秆 10 cm。

试验中通过 E601 标准蒸发皿的蒸发量控制灌水量^[9],计算方程为:

$$W = A \times E_{pan} \times k_{cp}。$$

式中: W 为灌溉水量(L); A 为单个灌水器控制的小区面积(m²),本试验中 A 为 $0.3 \times 0.4 = 0.12$ m²; E_{pan} 为 2 次灌水时间间隔内的蒸发量(mm); k_{cp} 为蒸发皿系数,本试验中取为 1.0。

灌水在 08:00—12:00 进行,周期为 2 d,灌水量以每天早 08:00 测定的蒸发量为标准确定。设计了加气和不加气灌溉 2 种处理,每个处理 3 次重复,小区采用完全随机区组设计。

1.3 试验观测内容

1.3.1 土壤含水量 采用中子水分仪测量距离地表 0~50 cm 土层的含水量,分为 10, 20, 30, 40, 50 cm 5 层,采用取土烘干法修正。

1.3.2 土壤氧气含量 土壤氧气含量利用 Fiber-Optic Oxygen Meter Firesting O₂ (光纤式氧气测量仪)测量。光纤式氧气测量仪具备 2 个测氧通道和 1 个 USB 连接通道,通过 USB 连接通道将氧气测量仪与电脑连接,利用 Firesting logger 软件计数,每隔 1 s 计 1 次数,每个测氧通道可连接 1 个氧气感应探针(Robust Oxygen Miniprobe)。测量时每个小区取 2 个固定点,分别插入氧气感应探针(探针插入土壤前,在空气中对软件测量值进行调平,插入深度为 5 cm,距离作物茎秆 15 cm)。分别于 06:00, 12:00, 18:00 3 个时间点(均提前 2 h 将探针插入土壤,以尽可能减小对土壤的干扰;插入后将土壤封实,尽可能避免大气对土壤空气的影响)测量,每个时间点分别连测 5 min,并将 3 个时间点测量值的平均值作为当天土壤氧气含量的代表值。

1.3.3 土壤呼吸和土壤温度 采用 LI-6400XT 便携式气体分析系统测量土壤呼吸,每个小区取固定点测量,每个点重复测量 2 次,测定方法主要参考韩广轩等^[10]的方法。分别于 06:00, 12:00, 18:00 3 个

时间点测量,并将其平均值作为当天土壤呼吸速率代表值。在测定土壤呼吸的同时,在附近选择 1 个点将土壤电热探针(LI-6400-09TC)插入 10 cm 深度测定土壤温度。

1.3.4 生物量 每个处理在果实膨大期末挖取 3 株番茄植株,地上部分将茎、叶和果实分开称其鲜质量,待 105 ℃杀青、75 ℃烘干后分别称其干质量;地下部分根系先冲洗干净,然后将水擦干后称其鲜质量,待烘干后再称其干质量。

1.3.5 产 量 采用精度为 0.01 g 的电子天平称量番茄产量,以单株产量计,为减小灌水期间的不均匀性,各处理单株产量取番茄植株的平均产量计算。植株管理采用单干整枝法,不进行疏果。

1.3.6 灌溉水分利用效率(IWUE) 番茄灌溉水

分利用效率=番茄果实产量/番茄总灌水量。

1.4 数据处理

采用 SPSS17.0 统计软件对各处理测定指标进行差异显著性分析,用 Sigmpilot 12.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 加气灌溉处理对土壤含水量的影响

由图 1-A 可知,2 种灌溉处理土壤含水量变化趋势基本相同,不加气灌溉(对照)处理土壤含水量的平均值略微高于加气灌溉处理,比加气灌溉高出 1.61%,可能是由于加气灌溉加入的是水气混合液,也就是灌溉水中含有空气,灌水后空气代替部分水存在于土壤中,因此加气灌溉土壤含水量略低于对照。

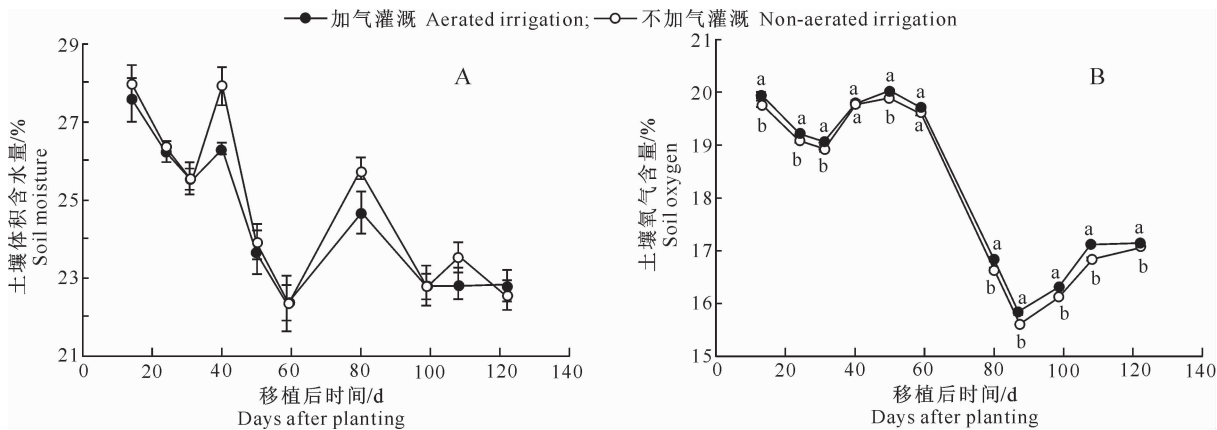


图 1 加气与不加气灌溉对番茄根区 10 cm 土层内土壤平均含水量和氧气含量的影响
标不同字母表示在 $P \leq 0.05$ 水平下有显著性差异。下同

Fig. 1 Effects of aerated and no-aerated irrigation on soil water content and oxygen content

Different small letters in each column mean significant difference at $P \leq 0.05$ level among treatments. The same below

2.2 加气灌溉处理对土壤氧气含量的影响

图 1-B 显示,在整个生育期内加气灌溉处理的土壤氧气含量均大于对照处理。统计表明,加气灌溉处理土壤氧气含量的平均值比对照处理高 0.89%,这可能是由于对照处理的土壤水分高于加气灌溉,而土壤水分的增加会导致土壤通透性变差,从而减少土壤中 O_2 的浓度。已有研究表明,氧气与水分在土壤中呈现此消彼长的关系^[11]。但是从图 1-B 看来,加气灌溉处理土壤氧气含量的增加不是很明显。这一方面是因为探针插入深度仅为 5 cm,处于土壤表层,而表层土壤和大气处于经常不断地交换状态^[12];另一方面加入的是空气,因而只能使土壤氧气含量稍有提高,但却能改善根区的整体环境。

2.3 加气灌溉处理对土壤呼吸和土壤温度的影响

加气灌溉处理下土壤呼吸速率均高于对照(图 2-A),加气灌溉土壤呼吸速率平均值为 $3.666 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对照为 $2.892 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,加气灌溉比对照高出 26.76%。加气灌溉与对照土壤呼吸速率变化动态基本一致,大体呈单峰抛物线型。加气灌溉处理的土壤呼吸速率变化于 $2.748 \sim 4.858 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对照处理为 $2.044 \sim 4.179 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,土壤呼吸速率最小值均出现在苗期,后逐渐增大,到结果期达到峰值,之后又逐渐降低。

土壤温度大体是随着季节的变化而变化(图 2-B),加气灌溉土壤温度平均值为 $22.55 \text{ }^\circ\text{C}$,对照为 $21.78 \text{ }^\circ\text{C}$ 。加气灌溉处理的土壤温度略高于对照处理,但差异不显著($P > 0.05$)。

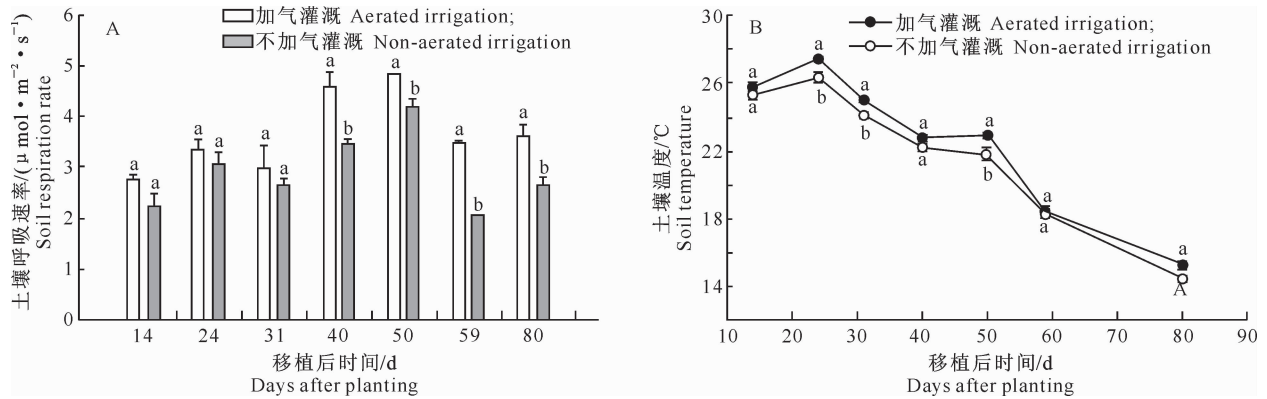


图 2 加气和不加气灌溉对番茄生育期内土壤呼吸和土壤温度的影响

Fig. 2 Effects of aerated and no-aerated irrigation on soil respiration and soil temperature in tomato growth period

2.4 加气灌溉处理对番茄生物量的影响

由表 1 可以看出,加气灌溉下番茄根的干鲜质量和叶鲜质量与对照没有($P>0.05$)显著性差异,然而,茎干鲜质量、果实干鲜质量、叶干质量和地上部干鲜质量均显著($P\leq0.05$)提高,与对照相比,果

实干质量增加了 48.2%,茎干质量增加了 21.6%,地上部干质量增加了 31.9%,根冠比减小了 33.2%。以上结果表明,加气灌溉主要促进了番茄冠部的生长,对根部生长的影响不显著。

表 1 加气和不加气灌溉对番茄果实膨大期末生物量的影响

Table 1 Effects of aerated and no-aerated irrigation on biomass of tomato at the end of expansion stage

处理 Treatment	鲜质量/g Fresh weight				
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果实 Fruit	地上部 Aboveground
加气灌溉 Aerated irrigation	32.58±1.59	284.10±5.67	270.31±3.35	1 001.59±15.68	1 555.99±13.37
不加气灌溉 Non-aerated irrigation	32.37±2.66	251.09±3.39	252.69±17.83	675.80±85.81	1 179.58±107.03
显著性差异 Significant difference	ns	**	ns	*	*

处理 Treatment	干质量/g Dry weight					
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果实 Fruit	地上部 Aboveground	根冠比 Root:shoot ratio
加气灌溉 Aerated irrigation	3.46±0.11	36.02±0.45	37.64±1.45	63.21±1.83	136.87±2.83	0.025 3±0.000 3
不加气灌溉 Non-aerated irrigation	3.92±0.17	29.63±0.03	31.45±0.26	42.66±6.82	103.74±7.11	0.037 9±0.001 0
显著性差异 Significant difference	ns	**	*	*	*	**

注: * 表示在 $P\leq0.05$ 水平下有显著性差异; ** 表示在 $P\leq0.01$ 水平下有显著性差异;ns 表示在 $P>0.05$ 水平下无显著性差异。表 2 同。
Note: * means significant difference at $P\leq0.05$ level among treatments; ** means significant difference at $P\leq0.01$ level among treatments;ns means no significant difference at $P>0.05$ level among treatments. The same for Table 2.

2.5 加气灌溉处理对番茄产量和灌溉水分利用效率的影响

表 2 为番茄收获时的产量和灌溉水分利用效率分析结果,与对照相比,加气灌溉处理明显提高了番

茄产量和灌溉水分利用效率,单株产量提高了 23.12%,单果质量提高了 29.84%,灌溉水分利用效率提高了 23.12%,差异显著,而单株果数没有显著性差异。

表 2 加气和不加气灌溉对番茄产量、灌水量和灌溉水分利用效率的影响

Table 2 Effects of aerated and no-aerated irrigation on fruit yield,irrigated water amount and IWUE of tomato

处理 Treatment	单株产量/g Fruit weight of per plant	单株果数 Fruit number of per plant	单果质量/g Weight of per fruit	最高产量的 相对百分比/% Percentage of highest yield	单株灌水量/mm Irrigation amount	灌溉水分 利用效率/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) IWUE
加气灌溉 Aerated irrigation	1 718.55±32.34	12.3±0.33	139.41±1.68	100	224.75	63.721
不加气灌溉 Non-aerated irrigation	1 395.82±3.46	13.0±0.00	107.37±0.27	81.22	224.75	51.755
显著性差异 Significant difference	*	ns	**			*

由此可看出,加气灌溉处理下产量的提高主要体现在促进果实的生长,对果实个数的影响不明显,2种处理的灌水量相同,而加气灌溉处理的产量比对照高,因此加气灌溉的水分利用效率高于对照。

3 讨论与结论

3.1 加气灌溉对根区土壤环境的影响

关于加气灌溉的很多研究结果都表明,加气灌溉下土壤呼吸速率、氧气含量、土壤温度明显高于地下滴灌。Chen等^[13]在澳大利亚中央昆士兰大学棉花试验中得出,与地下滴灌相比,加气灌溉(Mazzei air injector model-MA1583)下滴头埋深30 cm时土壤呼吸速率提高了42%,土壤氧气含量提高了8.9%;滴头埋深10 cm时土壤呼吸速率提高了79%,土壤氧气含量提高了9.8%。本试验结果表明,与对照相比,加气灌溉根区土壤氧气含量增加了0.89%,土壤呼吸速率提高了26.76%,土壤温度略有提高,与Chen等^[13]的研究结果基本一致。

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,一个因子的变化便会影响到根区土壤环境的整体变化。土壤呼吸速率主要受土壤生物区中CO₂产生速率的控制,同时还受影响CO₂在土壤中运移的环境因子的控制^[14]。研究表明,土壤温度、土壤水分和土壤通气状态是影响土壤呼吸作用的重要因素^[15-18];根系生物量、凋落物、微生物种群、根系氮含量等也是影响土壤呼吸作用的重要因素^[13,16,19-22],因此影响土壤呼吸的因素比较复杂,交互作用比较多。本试验中,加气灌溉处理的土壤温度和土壤氧气含量均高于对照,而土壤含水量低于对照。加气灌溉向土壤中加入空气,而土壤是由固、液、气三相组成的,土壤中空气含量增加便可能导致水分的降低,而土壤水分的降低和土壤空气含量的增加便会改善土壤通透性,增加土壤中O₂的浓度,促进CO₂的释放,进而促进土壤的呼吸作用^[23-24],同时因为加气灌溉在灌溉水中增加了空气,因此还会促进作物根系及微生物种群等的生长,进而改善土壤呼吸功能。张静等^[11]便在水稻干湿交替灌溉技术的研究中发现,稻田土壤中的水分和氧气含量存在明显的此消彼长现象。本研究中加气灌溉下土壤氧气含量较不加气灌溉提高了0.89%,土壤体积含水量下降了1.61%。土壤中空气含量的增加和水分的降低会提高土壤通透性,而土壤温度、土壤水分和土壤通气状态是影响土壤呼吸作用的重

要因素^[15-18],因此土壤氧气含量和土壤水分的变化便会影响到土壤呼吸的变化。本试验证实了加气灌溉可以改变土壤氧气含量、土壤水分和土壤呼吸,从而改善番茄根区土壤环境。影响土壤环境的因素有许多,下一步有待研究加气灌溉对其他土壤环境因素的影响,比如土壤微生物、根系生物量、凋落物等。

3.2 加气灌溉对番茄生长和产量的影响

番茄果实膨大期末生物量取样结果表明,加气灌溉对果实干鲜质量、茎干鲜质量、叶干质量和地上部干鲜质量有显著影响。与对照相比,加气灌溉单株产量提高了23.12%,单果质量提高了29.84%,水分利用效率提高了23.12%。

Bhattarai等^[7]2006年在澳大利亚中央昆士兰大学番茄灌溉试验中得到加气灌溉(Mazzei 384-X)下,单株产量和单果质量明显高于地下滴灌(加气灌溉为4.15 kg/株,136 g/个;对照为3.70 kg/株,124 g/个),但是单株果实个数与对照没有显著性差异,加气灌溉下地上部干质量也明显高于对照,而根冠比明显减小。Abuarab等^[25]在玉米灌溉试验中,用空气压缩机和气量计作为加气设备,2010和2011两年的试验结果表明,相较于地下滴灌,加气灌溉下产量分别提高了12.27%(2010年)和12.5%(2011年),与对照间存在显著性差异;而加气灌溉下的水分利用效率和灌溉水分利用效率(IWUE)均最大,与地下滴灌间存在显著性差异,加气灌溉下IWUE分别是1.096 kg/m³(2010年)和1.112 kg/m³(2011年),而地下滴灌下IWUE分别是0.911 kg/m³(2010年)和0.922 kg/m³(2011年),本研究也得到了一致的结果。与地下滴灌相比,加气灌溉对番茄生长和产量的有利影响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^[7],微生物的生物活动也更加旺盛,加速了其有机质的分解。加气灌溉根区氧气充足,也促进了根区土壤与外界的气体交换^[26],促进了根系向冠部的水分和养分运输,形成了一个良性的根、冠与大气的连续系统,从而促进了作物冠部的生长,提高了作物产量。

[参考文献]

- [1] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 33(14): 1915-1925.
- [2] Hoffman G, Ayers R, Doering E, et al. Salinity in irrigated agriculture [J]. Design and Operation of Farm Irrigation Systems, 1980: 145-185.

- [3] Busscher W J. Improved growing conditions through soil aeration [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1982, 13(5): 401-409.
- [4] Mchugh A, Bhattarai S, Lotz G, et al. Effects of subsurface drip irrigation rates and furrow irrigation for cotton grown on a vertisol on off-site movement of sediments, nutrients and pesticides [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(4): 507-519.
- [5] Meek B, Ehlig C, Stolzy L, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Goorahoo D, Carstensen G, Zoldoske D, et al. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers [J]. Int Water Irrig, 2002, 22(2): 39-42.
- [9] 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法 [J]. 节水灌溉, 2004(3): 11-15.
Kang Y H. Applied method for drip irrigation scheduling [J]. Water Saving Irrigation, 2004(3): 11-15. (in Chinese)
- [10] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 363-371.
Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, et al. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in maize field [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 363-371. (in Chinese)
- [11] 张 静, 刘 娟, 陈 浩, 等. 干湿交替条件下稻田土壤氧气和水分变化规律研究 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 408-413
Zhang J, Liu J, Chen H, et al. Change in soil oxygen and water contents under alternate wetting and drying in paddy fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 408-413. (in Chinese)
- [12] 程云生, И П 格列钦. 土壤氧气状况及其生草灰化土性质的影响 [J]. 土壤通报, 1960, 8(1): 39-62.
Cheng Y S, И П Гречин. Effect of soil oxygen status on the properties of soddy-podzolic soil (Podzoluvisols) [J]. Acta Pedologica Sinica, 1960, 8(1): 39-62. (in Chinese)
- [13] Chen X M, Dhungel J, Bhattarai S P, et al. Impact of oxygenation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species [J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 4(4): 236-248.
- [14] Raich J, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus B, 1992, 44(2): 81-99.
- [15] Cook F J, Orchard V A. Relationships between soil respiration and soil moisture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(5): 1013-1018.
- [16] Fang C, Moncrieff J. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.
- [17] Howard D, Howard P. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 1537.
- [18] Lomander A, Kätterer T, Andrén 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): 2017-2022.
- [19] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. Nature, 1998, 396(6711): 570-572.
- [20] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11): 1625-1635.
- [21] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204(1): 87-97.
- [22] 栾军伟, 向华成, 骆宗诗, 等. 森林土壤呼吸研究进展 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2451-2456.
Luan J W, Xiang H C, Luo Z S, et al. Research advances in forest soil respiration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2451-2456. (in Chinese)
- [23] 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: B85-B96.
- [24] 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): 2919-2924.
Liu S, Yan C, He W Q, et al. Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2919-2924. (in Chinese)
- [25] 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: 493-499.
- [26] Meek B, Graham L, Donovan T. Effect of irrigation treatments, soil temperature and soil texture on soil aeration status and stand losses of alfalfa [C]. Madison, Wisconsin: 73rd Annual Meeting of American Society of Agronomy, 1981: 21.