排灌机械工程学报 2010年11月 Nov. 2010 第28卷 第6期 Vol. 28 No. 6
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

加氧灌溉对菠萝根区土壤呼吸和生理特性的影响

陈新明[1,2], Jay Dhungel[3], Surya Bhattarai[3], Manouchehr Torabi[3], David J Midmore[3]
(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3. 中央昆士兰大学 植物与水研究中心, 澳大利亚 Rockhampton 4702)

摘 要: 通过大田试验,研究了加氧灌溉对菠萝根区土壤呼吸作用、生理特性、生物量积累、果实产量、品质和水分利用效率的影响. 采用 Mazeei(空气注射器)给地下灌溉系统加入空气,设计了加氧和不加氧灌溉2种处理方式,7次重复. 设计滴头埋深 10 cm. 研究表明,与对照相比,菠萝根区 30 cm 以内土壤水分质量分数和 CO_2 质量分数没有明显差异,但是加氧灌溉使得土壤呼吸增加了 100%;菠萝的果实鲜重、生物量鲜重、干物质重和收获指数明显增大,差异有统计学意义($p \leq 0.05$);加氧灌溉提高了菠萝的水分生产率,与对照相比增加了 17.2%;同时,加氧灌溉明显改善了菠萝单果尺寸和重量,使得单果重量增加了 17.3%,田间产量增加了 4.3%,增加了果实的糖质量分数,减少了果实的透明物. 研究结果为加氧灌溉技术的推广应用提供了理论依据.

关键词: 加氧灌溉; 土壤呼吸; 产量; 水分利用效率; 菠萝
中图分类号: S274.1; S11 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2010)06-0543-05

Impact of oxygation on soil respiration and crop physiological characteristics in pineapple

Chen Xinming[1,2], *Jay Dhungel*[3], *Surya Bhattarai*[3], *Manouchehr Torabi*[3], *David J Midmore*[3]
(1. College of Water Resources Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory for Agriculture Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Centre for Plant and Water Science, Central Queensland University, Rockhampton, QLD 4702, Australia)

Abstract: Oxygation refers to irrigation of the crops with aerated water, air injection using the venture principle or the supply hydrogen peroxide in the root zone, by using subsurface drip irrigation (SDI) system. This research investigated the potential of oxygation to enhance soil respiration, plant growth, yield, and water use efficiency (WUE) of pineapple in field experiments. The field experiment, compared Mazzei air injectors and control and treatments (oxygation or not), were randomized and replicated seven times in pineapple. In the experiments, soil water content and CO_2 concentration in root zone of pineapple did not differ significantly between oxygation and not. But soil respiration increased by 100%, for oxygation compared to control at the same depth. There were significant effects of oxygation on pineapple fresh biomass, dry matter and industry production, and the harvest index. The irrigation water use efficiency (WUE) was not significantly improved, the WUE values in oxygation treatments were somewhat greater 4.3% compared with the control. However, the yield and some quality parameters were significantly improved, the total fruit yield and marketable yield increased by 17.3% and 4.3%. Our

收稿日期: 2010-04-23
基金项目: 国家863计划项目(2006AA100202); 国家自然科学基金资助项目(50779059); 澳大利亚 NPSI 项目(SCO773)
作者简介: 陈新明(1968—),男,宁夏中宁人,副教授(cxm5503@126.com),主要从事节水灌溉理论和新技术研究.
Surya Bhattarai (1965—),男,尼泊尔人,高级讲师,博士(通讯作者,s.bhattarai@cqu.edu.au),主要从事农业灌溉技术和作物水分利用效率研究.

万方数据

data suggest that the benefits of oxygation are application for field crop.

Key words: oxygation; soil respiration; yield; water use efficiency; pineapple

研究表明,大部分作物的根系需要充足的氧气(O_2)供给以满足植物养分和水分的吸取[1];作物根呼吸需要消耗大量的 O_2,而且作物根的生长对 O_2 缺乏特别敏感,土壤中 O_2 不足会影响作物根系和土壤呼吸,降低 ATP 的生产,减少根系对水分和养分的吸收以及对冠体的营养传输. 增加根部 O_2 会增加根系对 P 和 K 肥的吸收[1]. 因此,如何将灌水技术与土壤特性和作物生理特性有机结合,实现高效、高产,成为农业专家需要解决的实际问题[2-3].

加氧灌溉(也叫加气灌溉),是利用文丘里管原理将空气中的 O_2 或过氧化氢加入水流中,通过地下滴灌系统将 O_2 加入作物根区的一种灌溉方法. 它是对地下滴灌系统的改进和发展. Bhattarai 等[4]利用地下滴灌系统把过氧化氢加入南瓜根区进行灌溉,试验表明,与对照的处理相比,南瓜数量增加了29%,产量增加了25%;同时利用 Mazzei(空气注射器)将空气加入大豆和棉花根区进行灌溉,结果表明新鲜大豆产量增加了82% ~96%,棉花产量增加了14% ~28%,作物的根长、根重和土壤呼吸明显增加,而且增加了作物的光合作用,但却并没有影响叶片的蒸腾作用和气孔导度.

加氧灌溉打开了潜在增加作物产量的大门. 因为,在作物根区加入氧气使得根系功能处于最佳状态,有利于根区微生物的活动和矿物质的运移,最终导致作物生长发育的改善、产量的增加和水分利用效率增加[4]. Bhattarai 等[5]对重粘土和盐渍土种植番茄采用12%的空气含量加入番茄根区进行灌溉试验,结果表明:重粘土番茄果实产量增加了16%,水分利用效率(WUE 值)提高了16%,盐渍土番茄产量增加了38%,WUE 值增加了32%. 同时,利用加氧灌溉对不同滴头埋深的鹰嘴豆和南瓜研究表明[3]:作物产量、WUE 和根系活力得到了提高,同时随着滴头的埋深增加,加氧灌溉能明显缓和土壤缺氧症,能够弥补滴头埋深对作物产量和 WUE 的负面影响. 但作物的生长发育、产量、品质和水分利用效率受多重因素影响,例如作物品种、土壤质地、田间管理等.

文中针对加氧灌溉技术在大田菠萝种植中的应用,研究其对菠萝根区土壤水分变化、作物生理特性和产量品质的影响.

1 材料与方法

试验在澳大利亚中央昆士兰州的 Yeppoon(南纬 23.13°,西经 150.74°)进行,试验地距离海边约 5 km,年均降雨量 1 312 mm,月平均气温 25.8 ℃. 土壤质地为沙壤土,最大田间持水量 18%. 菠萝于 2007 -10 -25 种植,采用宽窄行,行距 150 cm(宽行间距),株距 25 cm,于 2009 -02 -09 至 2009 -04 -13 收获. 试验区面积 2.15 hm^2,分 14 个小区,7 个加氧地下滴灌和 7 个常规地下滴灌,随机布置.

田间空气注射器 Mazzei 的型号为 1583 (Mazzei Corp., USA)(如图 1 所示),安装在田间支管首部,加气量为 12%. 土壤呼吸检测利用 EGM -3 (Pre-Sens GmbH, Germany) 进行. 具体测定方法为:将 EGM -3 的探测器垂直插入表层土壤 5 cm 深,将温度探头插入 25 cm,开始测量;仪器读数变化稳定时,记录稳定的时间值、温度值、土壤 CO_2 质量分数和土壤呼吸值. 在生育期,每个小区不同位置测量 3 次,取其平均值作为该处理的土壤呼吸值.

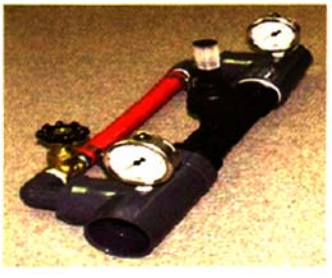


图 1 空气注射器装置

Fig. 1 Setup of Mazzei air injector

在菠萝生育期,根区土壤水分采用土壤水分传感器记录(ODYSSEY Australia),1 h 读数 1 次. 在菠萝果实发育期,每区随机取 5 棵植株,分别测量茎、叶和果实鲜重和干物质重. 生物体鲜重在烘箱 70 ℃ 条件下烘干 48 h 后称其干重. 每区分别标定 2 行 2 m(共 32 棵菠萝)进行收获期产量和品质测定. 测定每个果实重量、密度、含糖量(brix)、透明物等. 含糖量采用 RFM320 折射仪(Bellingham USA)测量.

菠萝的蒸发蒸腾量采用水量平衡法计算,即

$$E_a = P + I + \Delta S - D - R, \qquad (1)$$

式中 E_a 为作物的总蒸发蒸腾量,m^3/hm^2;P 为降雨

万方数据

量，m^3/hm^2；I 为灌溉水量，m^3/hm^2；ΔS 为土壤中含水量的变化，m^3/hm^2；D 为通过土壤深层的水分通量，m^3/hm^2；R 为径流量，m^3/hm^2.

试验区地下水位在 50 m 以下，则地下水的补给可以忽略不计，$D=0$；降雨和径流量根据当地试验资料确定，因而方程(1)可简化为

$$E_a = P + I + \Delta S - R. \qquad (2)$$

ΔS 通过测量不同阶段的土壤含水率来计算，从而求得作物总蒸发蒸腾量 E_a.

水分利用效率，系指作物经济产量与作物总蒸发蒸腾量的比值，即

$$\varepsilon_w = \frac{Y}{E_a}, \qquad (3)$$

式中 ε_w 为水分利用效率，kg/m^3；Y 为作物经济产量，kg.

资料采用 GenStat version 11.1 进行分析，检验方法为 LSD 新复极差法，显著性水平为 $p \leqslant 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 根区土壤水分

图 2a，2b 分别为菠萝生育期内加氧灌溉和对照处理的土壤水分变化曲线，图中 S 为土壤中水分的体积分数，%.

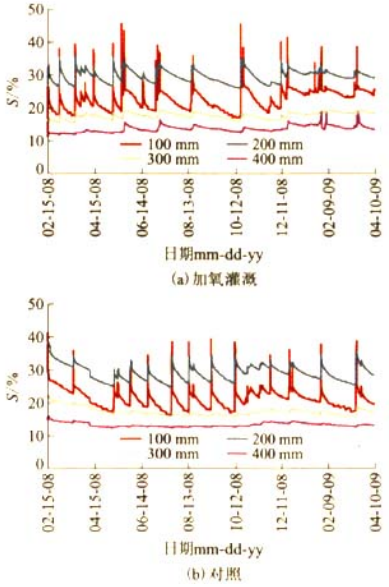


图 2 菠萝生育期根区土壤水分的体积分数变化

Fig. 2 Soil water content varying of pineapple in growth period

图 3a，3b 分别为生育期内降雨量和灌水量，图中 t 为移植后的天数，d. 菠萝全生育期(529 d)降雨量为 2 056 mm，加氧灌溉和对照处理的灌溉水量分别为 1 191 m^3/hm^2 和 1 167 m^3/hm^2.

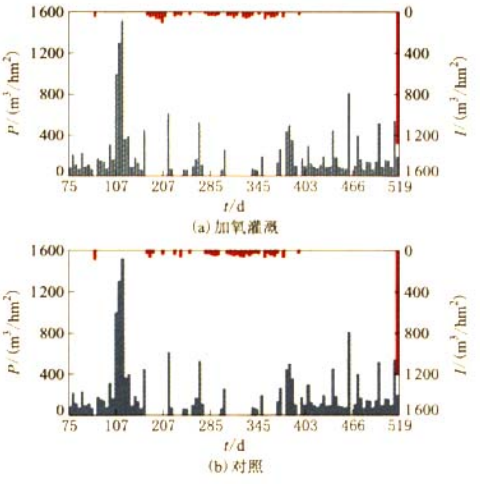


图 3 菠萝生育期降雨量和灌水量

Fig. 3 Raifall and applied water of pineapple in growth period

由图 2，3 可见，加氧灌溉处理和对照处理 0～400 mm 土壤水分的体积分数总体趋势基本相同，加氧灌溉处理的土壤水分的体积分数平均值略微高于对照处理的. 统计表明，加氧灌溉和对照处理 100，200，300 和 400 mm 深度的平均土壤水分的体积分数分别为 22.6%，29.6%，17.7%，13.6% 和 21.2%，29.0%，17.2%，13.2%；其中 200 mm 最大，100 mm 次之，400 mm 最小. 这种差异主要是由于土壤质地、滴头埋深和生育期降雨量造成的. 滴头埋深为 100 mm，因此 200 mm 土壤水分的体积分数最大. 300～400 mm 深度的土壤中砂粒较多，持水性能差. 同时，菠萝生育期灌水量较小，仅占总生育期总供水量的 5.5%.

2.2 土壤呼吸

土壤呼吸一般是通过 CO_2 和 O_2 通量表示. 图 4 为菠萝成熟期根区土壤呼吸和 CO_2 质量分数(3 次平均值)，图中 ω_{CO_2} 为 CO_2 质量分数. 可以看出，在土壤平均温度均为 26 ℃时，菠萝根区 30 cm 的 CO_2 质量分数略微高于对照处理的(0.000 455 8 和 0.000 431 3)，差异不明显. 在土壤平均温度均为 26 ℃时，加氧灌溉处理的土壤水分的体积分数为 18.5%，对照处理的为 17.8%，但是加氧灌溉的土壤呼吸值 $R_c(CO_2)$ 明显高于对照处理的[分别为 2.4 g/(m²·h) 和 1.2 g/(m²·h)]，前者的土壤呼吸值与后者的相比增加了 100%.

土壤水分和温度是土壤呼吸影响的主要因素[6]，

万方数据

在土壤温度和水分相同或接近时，同一种质地的土壤，其土壤呼吸应当相同或近似. 本测试表明，在温度和水分接近时，加氧灌溉处理的作物根区土壤呼吸明显高于对照处理的，因此，可以认为是由于空气注射器在灌溉水中增加了空气，改善了土壤呼吸功能. 土壤呼吸是根系呼吸和土壤微生物呼吸的共同作用. 土壤呼吸增加会导致土壤碳库降低，土壤 CO_2 排放的增加. 土壤呼吸包括植物根系呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和土壤中含碳物质化学氧化过程[7]. 因此，加氧灌溉使得土壤 CO_2 排放增加，土壤中含碳物质化学氧化过程加强，从而增加了土壤呼吸.

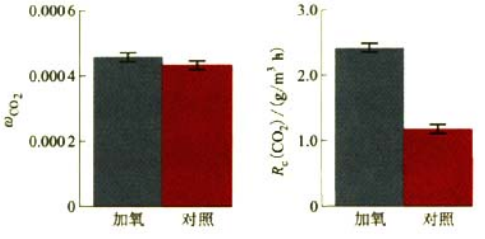


图 4 菠萝根区土壤 CO_2 质量分数和土壤呼吸值

Fig. 4 Soil resprition and CO_2 concentration in root area of pipeapple

2.3 生物量和收获系数

表 1 为菠萝果实膨胀期生物量取样结果，h 为株高，m 为质量，可以看出：与对照相比，株高、茎鲜重和干重差异无统计学意义($p \leqslant 0.05$)，然而，叶、果实鲜重、生物量鲜重和收获指数明显增大，差异有统计学意义($p \leqslant 0.05$)；果实干重、生物量干重和干物质收获指数也明显增大，差异有统计学意义($p \leqslant 0.05$). 与对照相比，果实干重增加了 58.7%，生物量干重增加了13.5%，收获指数增加了 45.5%. 加氧灌溉与对照处理之间的这种差异，可能是由于对照处理根区缺氧影响了作物根和冠的生长，进而影响作物的气孔导度和叶水势. 换句话说，加氧灌溉使得作物生长特性得到了改善. 当作物生长在缺氧条件下，根的呼吸作用是正常状况的 1/3，并且减少叶的生长特性[7]. 对植物而言，根部产生缺氧信号会传递给冠，减缓生长信息，包括营养离子、水和植物生长素[8]. 许多研究者[9-11]也报道了作物根区缺氧会限制根系的发展、植物的生长这一现象. Bhattarai 等[9]早期研究也表明，在重粘土中，作物根区低的含氧量和低的呼吸作用导致作物产量降低，与对照相比，加氧灌溉处理的鹰嘴豆产量增加了 11%.

表 1 菠萝收获时干物质组成(移植后 392 d)

Tab. 1 Dry matter and its components for pineapple at 392 days at transplanting

处理	h/cm	鲜物质 m/g 茎	叶	果实	生物量	收获指数	干物质 m/g 茎	叶	果实	生物量	收获指数
加氧灌溉	66.8	824	1 856	867	3 547	0.24	162	239.2	76.5	477.7	0.16
对照	66.9	820	1 638	612	3 070	0.20	163	209.6	48.2	420.8	0.11
LSD(6 df)	ns	ns	233.7	119.7	586	0.03	ns	ns	<0.001	102.1	0.02

注：LSD 为检验方法($p \leqslant 0.05$)；df 为自由度；ns 为不显著.

2.4 产量、水分利用效率和品质

表 2 为菠萝收获产量和水分利用效率分析结果，表中 m_1，W_d，W_p 分别为鲜果质量、理论产量、实际产量.

表 2 菠萝单果重、产量、灌水量和水分利用效率

Tab. 2 Weight, yield, irrigated applied water, WUE of pineapple

处理	加氧灌溉	对照	LSD(12 df)
m_1/g	1 493	1 279	120.50
W_d/(t/hm²)	79.6	68.2	6.43
W_p/(t/hm²)	53.1	50.9	4.59
I/(m³/hm²)	1 191.0	1 167.0	
P/(m³/hm²)	20 560.0	20 560.0	—
ΔS/(m³/hm²)	-88.6	-33.8	—
R/(m³/hm²)	880.0	880.0	—
ε_w/(kg/m³)	3.8	3.3	0.23

与对照处理相比，菠萝单果果实重量、理论产量和田间实际产量均明显增加，差异有统计学意义($p \leqslant 0.05$)，单果重量增加了 16.7%，实际产量增加了 4.3%.

水分利用率分析表明，与对照相比，加氧灌溉处理的菠萝水分利用效率明显提高了 17.2%，差异有统计学意义($p \leqslant 0.05$).

作物的水分利用效率和产量有着密切关系，一般如果 WUE 高，作物生育期用水量就小[12]. 结果表明了加氧灌溉和对照处理相比，菠萝产量和水分利用率都得到了提高.

菠萝的经济价值与其品质有很大关系. 表 3 是菠萝果实品质检测结果，表中 h_1，d_1，ω_d，ρ，ω_s，E 分别为果实高度、果实直径、干物质质量分数、密度、糖质量分数、半透明物，可以看出，加氧灌溉果实大小、透明物、糖质量分数明显得到了提高. 加氧灌溉不仅提高

万方数据

了菠萝的产量,也改善了其品质.在土壤中加入过氧化氢的研究表明,能够明显增加瓜类果实的可溶性糖含量[12].这些结论和我们的结果是一致的,本检测中加氧灌溉处理的菠萝果实糖质量分数为13.8%,对照处理为13.1%,增加了0.7%.

表3 菠萝果实品质检测

Tab.3 Test of fruit quality for pineapple at harvest

处理	加氧灌溉	对照	LSD(12 df)
h_1/cm	17.7	15.5	0.846
d_1/cm	11.9	11.0	0.242
ω_d/%	12.7	12.6	ns
ρ/(g/cm^3)	0.92	0.93	0.014
ω_n/%	13.8	13.1	ns
E	1.1	1.6	0.493

3 结 论

菠萝田间加氧灌溉试验表明,利用Mazzei空气注射器,通过地下滴灌系统把空气加入根区,有益于菠萝的生长发育,改善了根区土壤呼吸,增加了菠萝生物产量和收获指数,提高了果实产量和品质.

(1)加氧灌溉改善了土壤呼吸功能,使得菠萝根区30 cm内土壤呼吸值比常规滴灌增加了100%.

(2)加氧灌溉对菠萝的株高、茎鲜重和干物质总重影响无统计学意义($p \leqslant 0.05$),而对菠萝的叶、果实鲜重、生物体鲜重和收获指数影响有统计学意义($p \leqslant 0.05$).

(3)与对照相比,加氧灌溉菠萝单果重量、产量和水分利用效率显著增加,单果重量增加了16.7%,水分利用率增加了17.2%.检测表明,加氧灌溉改善了菠萝的品质,使果实大小、透明物、含糖量明显得到了提高.

成果可为制定合理的加氧灌溉制度提供依据.

参考文献(References)

[1] Benjamin K S, Ameur M M, Joann K W, et al. Root-derived respiration and nitrous oxide production as affected by crop phenology and nitrogen fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 369-379.

[2] 王新坤. 微灌毛管进口流量调节器应用的经济性分析[J]. 灌排机械, 2008, 26(2): 57-60.
Wang Xinkun. Economic analysis on application of discharge regulator in micro-irrigation lateral inlet[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(2): 57-60. (in Chinese)

[3] 朱德兰, 吴普特, 李岚斌, 等. 自压滴灌支管灌水单元设计方法[J]. 灌排机械工程学报, 2010, 28(1): 59-62.
Zhu Delan, Wu Pute, Li Lanbin, et al. Gravity-fed manifold subunit hydraulic design[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(1): 59-62. (in Chinese)

[4] Bhattarai S P, Lance P, 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.

[5] 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.

[6] 周广胜. 全球碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[7] 王 森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1234-1238.
Wang Miao, Ji Lanzhu, Li Qiurong, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1234-1238. (in Chinese)

[8] Pregitzer K, Loya W, Kubiske M, et al. Soil respiration in northern forests exposed to elevated atmospheric carbon dioxide and ozone[J]. *Oecologia*, 2006, 148(3): 503-516.

[9] Bhattarai S P, Midmore D J. Oxygation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(7): 675-688.

[10] Kalfountzos D, Alexiou I, Kotsopoulos S, et al. Effect of subsurface drip irrigation on cotton plantations[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(8): 1341-1351.

[11] Zhang Xiying, Chen Suying, Sun Hongyong, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1-10.

[12] Puangbuta D, Jogloya S, Vorasoota N, et al. Association of root dry weight and transpiration efficiency of peanut genotypes under early season drought[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(10): 1460-1466.

(责任编辑 张文涛)

万方数据