

滴灌条件下加气灌溉对云南冬马铃薯根区生境因子和产量的影响

高兰兰^{1,4},李靖^{1,4},黄海燕²,相彪¹,李淑芳¹,李爽³

(1. 云南农业大学水利学院,云南昆明 650051;2. 云南水利水电职业学院,云南昆明 650051;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司,云南昆明 650051;

4. 云南省智慧农业与水安全国际联合研发中心,云南昆明 650201)

摘要:为了研究加气灌溉对云南冬马铃薯根区生境因子(土壤呼吸、土壤水分、土壤温度、土壤氧气摩尔分数)和产量的影响,采用水气分离方法进行加气灌溉,试验设置加气(Y)和不加气(N)2种处理以及高水(100% ET_c ,W1)和低水(60% ET_c ,W2)2个灌溉水平,共计4个处理。结果表明:加气处理和灌水量均对土壤呼吸速率影响显著($P<0.05$)。加气灌溉对土壤含水率的影响较小,除块茎膨大期外,其他生育期加气灌溉对土壤含水率的影响均不显著,影响土壤含水率的主要因素是灌水量。加气处理和灌水量对根区土壤温度均有一定影响,W1Y处理下的土壤平均温度较W1N处理高1.68℃,W2Y处理较W2N处理高0.52℃,且在高水灌溉条件下,加气处理对土壤温度有显著影响($P<0.05$)。在马铃薯生育期内土壤氧气摩尔分数的变化呈先增大后降低的特征,4种处理下土壤氧气摩尔分数的大小关系为W1Y>W2Y>W2N>W1N。同一灌溉水平下,加气处理的土壤氧气摩尔分数显著高于不加气处理($P<0.05$)。同一加气条件下,高水处理的土壤氧气摩尔分数显著高于低水处理。加气处理和灌水量都对冬马铃薯产量和水分利用效率有显著影响,W1Y处理下冬马铃薯的产量和水分利用效率均最大。综合分析表明,W1Y(高水加气)处理有利于冬马铃薯根区形成良好的水气平衡状态。

关键词:马铃薯;加气灌溉;土壤含水率;土壤温度;土壤氧气摩尔分数

中图分类号:S532;S275.6 **文献标志码:**A

Effects of aerated irrigation on soil habitat factors and yield of winter potato under drip irrigation in Yunnan

GAO Lanlan^{1,4},LI Jing^{1,4},HUANG Haiyan²,XIANG Biao¹,LI Shufang¹,LI Shuang³

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650051, China;

2. Yunnan Water Resources and Hydropower Vocational College, Kunming, Yunnan 650051, China;

3. Power China Kunming Corporation Engineering Limited, Kunming, Yunnan 650051, China;

4. International Joint Research Center for Smart Agriculture and Water Security of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: A water-gas separation method was used to study the effects of aerated irrigation on soil habitat factors of soil respiration, soil moisture, soil temperature, and soil oxygen content. This experiment included 4 treatments of aerated (Y), unaerated (N), full irrigation (100% ET_c , W1) (ET_c for crop water requirement) and deficit irrigation (60% ET_c , W2). The results showed that both aerated irrigation and irrigation amount had effects on soil moisture content when potato was growing in a period of low water consumption. In the tuber swelling stage with the largest water consumption, the effect of aerated irrigation on soil moisture content was small, and the main factor affecting soil moisture content was irrigation water. Under the same level of irrigation, the average soil temperature under treatment W1Y was higher 1.68℃ than the treatment W1N, and treatment W2Y was higher 0.52℃ than that treatment W2N. Under the irrigation condition of W1, there were significant differences between W1Y and

W1N in most growth stages ($P < 0.05$). It indicated that aerated irrigation had significant effect on soil temperature under condition of sufficient irrigation amount. The changes of soil oxygen content in potato growth period showed the characteristics of increasing first and then decreasing. The relation of soil oxygen content under the four treatments was $W1Y > W2Y > W2N > W1N$. At the same irrigation level, the oxygen content of aerated irrigation was significantly higher than the unaerated irrigation. Under the same aeration condition, the oxygen content of W1Y treatment was significantly higher than W2Y treatment. Under the same aeration condition, the oxygen content of treatment W1Y was significantly higher than treatment W2Y. It indicated that a good state of water and gas balance was formed in the soil under the condition of high level and aeration irrigation, which was conducive to the growth of crops. The results provides a theoretical basis for studying environmental effects of aerated irrigation in farmland.

Keywords: potato; aerated irrigation; soil moisture content; soil temperature; soil oxygen mole fraction

马铃薯是云南省继水稻、玉米之后的第三大粮食作物,云南独特的地形和气候条件实现了马铃薯的四季生产,在全国范围内具有周年生产的优势^[1]。云南冬马铃薯的生产区域为热带坝区、高山山区和低海拔干热河谷区^[2],该区域土壤多为壤土或砂壤土,较为黏重,紧实易板结,土壤通气性和透水性均较差^[3]。在壤土上进行滴灌作业时,容易导致水分在作物根区分布不均、根部吸水不平衡,进而影响作物生长。同时,滴灌作业后土壤板结致使土壤紧实度增加,土壤容重增加、孔隙度减小,在一定程度上阻碍了 O_2 、 CO_2 在土壤与大气间的交换,易对植株根系造成低氧胁迫^[4]。因此,改善冬马铃薯根区土壤通气状况,对于提高冬马铃薯的产量和品质具有重要意义。

加气灌溉是在地下滴灌基础上,以水为载体、通过加气设备向作物根区通气,从而解决根区微环境的缺氧问题、满足根系有氧呼吸以及土壤中微生物对氧气的共同需求的一种节水增产灌溉技术^[5]。已有研究表明,加气灌溉能提高土壤导气率,改善土壤氧环境,使根系有氧呼吸顺利进行,促进作物生长^[6-9],但这些研究均为温室种植条件下对果蔬类作物进行加气灌溉的探究,而在大田自然条件下对粮食作物的加气灌溉研究较少。孙周平等^[10]通过研究不同通气方式来改善马铃薯根际土壤的气体环境,表明在提高马铃薯根际通气状况、降低根区 CO_2 浓度条件下,马铃薯生长得到明显促进且产量得以提高。陈涛等^[11]采用盆栽试验,研究 $3 d \cdot 次^{-1}$ 和 $2 d \cdot 次^{-1}$ 的增氧灌溉对马铃薯水分利用效率的影响,与不加气处理相比,2 个水平增氧灌溉使马铃薯水分利用效率分别提高了 16.7% 和 1.22%。以上研究都着眼于在温室或者盆栽试验条件,本文拟在大田自然种植条件下,研究加气灌溉对云南冬马铃薯根区生境因子(土壤呼吸、土壤水分、土壤温度、土壤氧气摩尔分数)和产量的影响,以期对加气

灌溉在大田种植方面的推广应用提供理论依据。

1. 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 11 月 6 日—2021 年 4 月 16 日在云南省水利水电科学研究院灌溉试验中心站 ($102^{\circ}47'E, 24^{\circ}53'N$) 进行。试验区海拔 1 931.9 m, 年均气温 $16^{\circ}C$, 年均日照时数 2 200 h, 无霜期 331~365 d, 属亚热带高原季风气候。多年平均降水量 859.7 mm, 其中 5—10 月降水占全年降水量的 85%, 年均蒸发量 2 204.4 mm。试验区土壤类型为红壤, 质地为壤土, pH 值 7.35, 饱和含水量 42.62% (体积含水率)。

1.2 试验设计

试验设计分 2 个因素, 分别为加气 2 个水平: Y (加气)、N (不加气); 灌水量 2 个水平: W1 (100% ET_c)、W2 (60% ET_c), 共 4 个处理, 即 W1Y (加气高水灌溉)、W1N (不加气高水灌溉)、W2Y (加气低水灌溉)、W2N (不加气低水灌溉), 每个处理 3 次重复, 共 12 个小区。

供试马铃薯品种为‘青薯 9 号’, 大田种植。采用机械起垄, 垄长 4 m、宽 0.8 m。垄间距 60 cm, 株距为 40 cm, 单行栽培, 每垄 9 株^[12]。垄上覆膜宽度 80 cm, 厚 0.008 mm。垄之间用塑料膜隔开, 防止侧渗。采用垄上滴灌方式进行灌水, 滴头埋深 20 cm, 滴头间距 40 cm, 每个滴头控制的小区面积为 $0.4 m \times 0.4 m = 0.16 m^2$ 。

本试验加气方式为水气分离法, 即利用空气压缩机 (额定压力为 0.78 MPa, 容积流量为 $0.11 m^3 \cdot min^{-1}$) 向进气管加气, 所加气体为空气 (N_2 和 O_2 体积分数分别为 78% 和 21%, 其他气体体积分数为 1%), 进气管用直径为 8 mm 的 PE 管, 每个加气点打 5 个孔, 用无纺布包扎以防止堵塞。加气管一头封堵埋于地表下 20 cm 处, 距离定植点 5 cm 处。

ET_c 为马铃薯蒸发蒸腾量, 基于试验地气象资料, 并通过彭曼修正公式计算获得 ET_0 , 再根据马铃薯的作物系数 K_c 计算得到马铃薯的蒸发蒸腾量 ET_c [13]。计算公式如下:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

冬马铃薯具体生育期划分见表 1, 整个生育期灌水量和降水量见表 2。

表 1 冬马铃薯各生育期起止时间

Table 1 Starting and ending time of winter potato in different growth period

生育期 Growing stage	起止时间 Star and end date(y-m-d)	天数 Days/d
苗期 Seedling stage	2020-11-06 — 2021-01-04	60
块茎形成期 Tuber initiation stage	2021-01-05 — 2021-02-10	37
块茎膨大期 Tuber growth stage	2021-02-11 — 2021-03-17	35
淀粉积累期 Starch accumulation stage	2021-03-18 — 2021-04-16	31

表 2 冬马铃薯生育期灌水量和降水量

Table 2 Irrigation and precipitation of winter potato in different growth period

生育期 Growing stage	日期 Date (m-d)	灌水量/mm Irrigation amount		降水量/mm Precipitation
		W1	W2	
苗期 Seedling stage	12-03	35	21	0
	12-14	27	16.2	7.9
	12-23	35	21	0
块茎形成期 Tuber initiation stage	01-06	36	21.6	0
	01-26	35	21	0
	02-02	35	21	0
	02-19	35	21	5.7
块茎膨大期 Tuber growth stage	02-25	29	17.4	0
	03-03	36	21.6	0
	03-16	30	18	0
淀粉积累期 Starch accumulation stage	04-02	25	15	0
	04-10	25	15	0
总计 Total		383	229.8	13.6

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤呼吸速率(R_s) 利用 Li-6400 便携式气体分析系统(Li-CorInc, NE, USA)连接 Li-6400-09 土壤呼吸室测定。在加气灌溉前 1 d 选择每个小区相同位置靠近中间的 3 株植株, 在 1/2 株距处插入 PVC 环(内径 10.2 cm, 高 5 cm), 插入深度 2 cm。每个处理的土壤呼吸速率为 3 个环测得的平均值, 每个环测得的土壤呼吸速率是仪器两次循环测量的平均值。马铃薯整个生长季内, 每 20 d 左右测定 1 次土壤呼吸, 共测定 10 次, 均在加气灌溉后第 2 d 测定 [14]。

1.3.2 土壤氧气摩尔分数 通过光纤式氧气测量仪(Fiber-Optic Oxygen Meter FireSting O₂, Pyro Science 公司, 德国)测量, 每天测定时选择相同灌水水平下加气和不加气灌溉处理的小区各 1 个, 选择 2 个小区相同位置的各 1 株植株同时插入探针 [15], 探针插入深度为 15 cm, 距离马铃薯植株茎秆 5 cm, 测定时间为 07:00—19:00, 因探针数量有限, 每个处理每次只测 1 个重复, 每次约 2 min 记录 1 次数据。

1.3.3 土壤温度和含水率 通过试验区的综合试验测坑区系统自动测得, 该系统可测得土壤剖面温度和土壤含水率; 然后通过数据采集器和采集软件可自动获得开展试验所需的土壤温度。土壤温度和土壤含水率的测定均与土壤呼吸速率同步。

1.3.4 产量 收获时, 每个小区内选取马铃薯长势相近区域, 在此区域平行挖取 1 m 距离的马铃薯, 每个小区选取 3 个区域后测量马铃薯产量、单株薯质量及商品薯质量。其中, 商品薯是指质量大于 75 g 的马铃薯。

1.3.5 作物全生育期耗水量和水分利用率计算 马铃薯生育期蒸发蒸腾按式(2)计算:

$$ET = P + I + \Delta S - R - D \quad (2)$$

式中, ET 为作物蒸发蒸腾量即耗水量(mm); P 为降雨量(mm); I 为全生育期灌水量(mm); ΔS 为 0 ~ 100 mm 土层播种前后土体贮水量的变化(mm); R 为地表径流量(mm); D 为深层渗漏量(mm)。本试验中, 滴灌条件下不会形成地表径流, 而且灌水定额较低, 不会形成深层渗漏, 因此 R 和 D 忽略不计; 整个生育期的降水量 P 见表 2。

水分利用效率(water use efficiency, WUE) 是指单位蒸腾耗水量的光合作用量或生长量, $WUE =$ 作物产量/作物腾发量。

1.4 数据分析

采用 SPSS Statistics 23.0 统计软件进行显著性分析, 用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

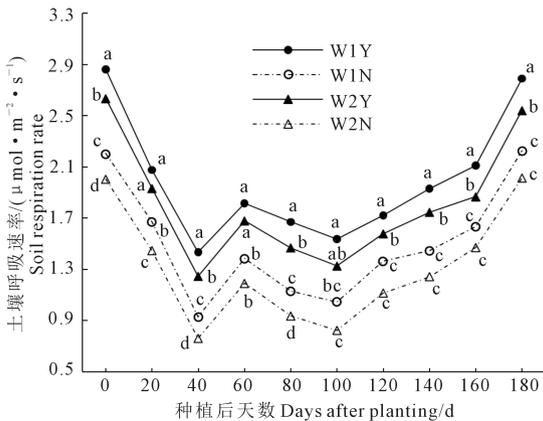
2.1 加气灌溉和灌水量对土壤呼吸速率的影响

图 1 为不同处理下的冬马铃薯的土壤呼吸速率。4 种处理的土壤呼吸速率整体变化趋势一致, 与整个生育期的土壤温度变化规律相似。同一灌溉水平下, 加气处理的土壤呼吸速率均显著高于不加气处理($P < 0.05$); 同一加气条件下, W1(高水)灌溉的土壤呼吸速率也均高于 W2(低水)灌溉, 但差异不显著。在加气条件下, 除种植后 20、60、100 d

外,W1Y 与 W2Y 处理在各个生育期差异显著($P < 0.05$);在不加气条件下,W1N 与 W2N 处理在除块茎形成期外的其他生育期都差异不显著($P > 0.05$);说明在加气条件下灌水量对土壤呼吸速率影响较大,而不加气处理时灌水量对土壤呼吸速率影响较小。

2.2 加气灌溉和灌水量对土壤含水率的影响

图 2 为冬马铃薯各生育期不同深度层处的土壤含水率。加气灌溉与对照处理的土壤含水率在不同生育期的变化规律一致,0~20 cm 土层土壤含水率呈降低趋势,20~40 cm 土层土壤含水率先升高后降低,40~60 cm 土层土壤含水率变化较小。其中 10~20 cm 土层土壤含水率最高,原因可能是该深度层距离滴头及加气管埋深最近,滴头附近因灌水造成水分聚集形成湿润体,进而导致土壤含水率较高^[16-17]。同一生育期内,W1N 处理土壤含水率最高,W2Y 处理土壤含水率最低。在苗期(图 2A),10~30 cm 土层中灌水量对土壤含水率有显著影响($P < 0.05$),而加气处理对土壤含水率影响不显著;在块茎形成期(图 2B),10~20 cm 土层中灌水量对土壤含水率有显著影响($P < 0.05$),30 cm 土层中加气和灌水量都对土壤含水率影响不显著;在块茎膨大期(图 2C),0~20 cm 深度 W1Y、W2Y 处理下的土壤含水率较 W1N、W2N 分别降低了 0.8%,1.3%,且差异显著($P < 0.05$);W1Y 与 W2Y 处理、W1N 与 W2N 处理也存在显著差异,说明在此生育期加气和灌水量都对土壤含水率影响显著($P < 0.05$)。在淀粉积累期(图 2D),加气和灌水量对土壤含水率影响均不显著。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 不同处理下的冬马铃薯的土壤呼吸速率

Fig.1 Soil respiration rate of winter potato under different treatments

图 3 为冬马铃薯全生育期 20~30 cm 深度层处的土壤含水率。土壤含水率在整个生育期内具有明显的波动特点,各个处理下苗期的土壤含水率同其他生育期相比均较高,进入块茎形成期后,土壤含水率降低。在块茎膨大期,土壤含水率达到全生育期最低。在整个生育期,W1Y 与 W2Y、W1N 与 W2N 处理均差异显著($P < 0.05$),说明灌水量对土壤含水率有显著影响($P < 0.05$)。除块茎膨大期外,加气灌溉对土壤含水率的影响均不显著($P > 0.05$)。

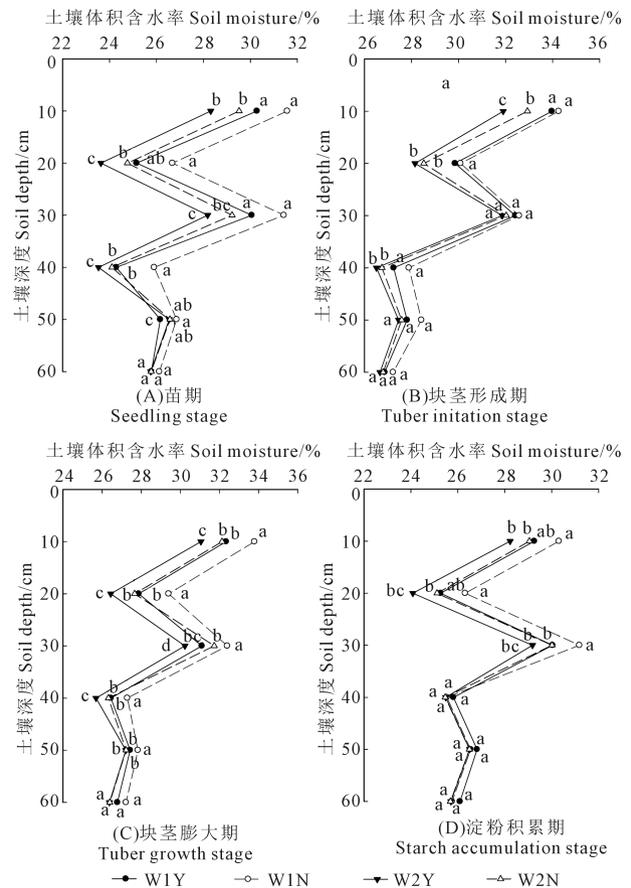


图 2 冬马铃薯生育期不同深度层处的土壤含水率
Fig.2 Soil moisture in different depth of soil during growth period of winter potato

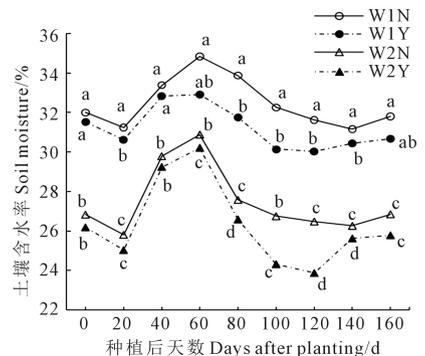


图 3 冬马铃薯全生育期 20~30 cm 深度层处的土壤含水率
Fig.3 Soil moisture in 20~30 cm depth during growth period of winter potato

2.3 加气灌溉和灌水量对土壤温度的影响

图 4 为冬马铃薯全生育期土壤温度的变化。在冬马铃薯整个生育期,土壤温度在苗期和块茎形成期随气温变化基本呈下降趋势,在块茎膨大期和淀粉积累期则有所上升,这与 2 月中旬以来气温开始回升有关。W1Y、W2Y、W2N、W1N 处理的土壤平均温度分别为 15.77、15.17、14.65℃ 和 14.09℃,其中 W1Y 处理平均温度最高,W1N 处理平均温度最低。全生育期 W1Y 与 W1N 处理的土壤温度均存在显著性差异($P<0.05$),W2Y 和 W2N 处理在生育期内(除 40 d 和 100 d 外)也存在显著性差异($P<0.05$);说明在高水灌溉条件下,加气处理对土壤温度影响显著($P<0.05$)。W1Y 处理的土壤温度较 W1N 处理高 1.68℃,W2Y 处理较 W2N 处理高 0.52℃,这可能是由于加气灌溉增加了土壤的通气性,促进了根系和微生物的有氧呼吸,从而使土壤温度增高。这与朱艳等^[18]的研究结果一致。

土壤温度日变化规律在一日内呈现单峰曲线的变化形式(图 5),峰值均出现在 16:00 附近,最小值出现在 06:00 附近。一日内不同时刻测定点的土壤温度为 W1Y 处理最高,W1N 处理最低。在苗期,由于环境温度较低,在 12:00 之前,W1Y 与 W2Y 处理、W1N 与 W2N 处理均存在显著性差异($P<0.05$),说明当气温较低时,灌水量对土壤温度影响显著;在 14:00—18:00 时间段,W1Y 与 W2Y 处理、W1N 与 W2N 处理均差异不显著($P>0.05$),说明随着气温的升高,灌水量对土壤温度的影响较小,此时土壤温度的变化主要是由于太阳辐射,地面吸收热量引起的^[19]。

在 2020 年 12 月 25 日(图 5A),一日内大部分时刻 W1Y 与 W1N 处理、W1Y 与 W2Y 处理均存在显著差异($P<0.05$),说明在高水灌溉条件下加气对土壤温度均影响显著($P<0.05$),在加气处理下灌水量对土壤温度也影响显著($P<0.05$),而一日内大部

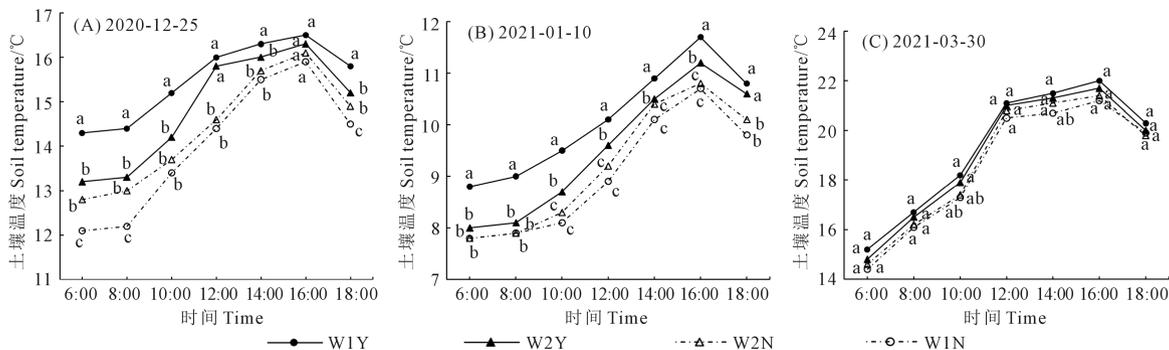


图 5 不同处理冬马铃薯生育期土壤温度的日变化

Fig.5 Diurnal variation curves of soil temperature under different treatments during growth period of winter potato

分时刻 W2Y 与 W2N 处理不存在显著性差异($P>0.05$),说明当冬马铃薯处于水分亏缺状态时,加气处理对土壤温度影响不显著。

在 2021 年 1 月 10 日(图 5B),一日内大部分时刻,W1Y 与 W1N 处理、W2Y 与 W2N 处理(除 6:00 和 14:00 外)均存在显著差异($P<0.05$)。这可能是由于植株生长旺盛,根系活动增强,此时根区土壤的通气状况尤为重要,因此无论在高水还是低水灌溉条件下,加气处理对土壤温度均有显著性影响($P<0.05$)。W1Y 与 W2Y 处理(除 18:00 外)差异均显著($P<0.05$),W1N 与 W2N 处理差异不显著($P>0.05$),说明只有在加气条件下灌水量对土壤温度影响显著($P<0.05$)。

在 2021 年 3 月 30 日(图 5C),加气 and 灌水量均对土壤温度影响不显著($P>0.05$),可能是由于在淀粉积累期冬马铃薯的生殖生长逐渐减缓,茎叶生长基本停止,基部叶片自下而上逐渐衰老变黄,此时根系呼吸和微生物呼吸都减弱,因此土壤温度不会因加气 and 灌水量而产生较大的变化。

2.4 加气灌溉和灌水量对土壤氧气摩尔分数的影响

由图 6 可知,4 种处理下冬马铃薯生育期内土壤氧气摩尔分数的变化规律大致相同,呈现先增大

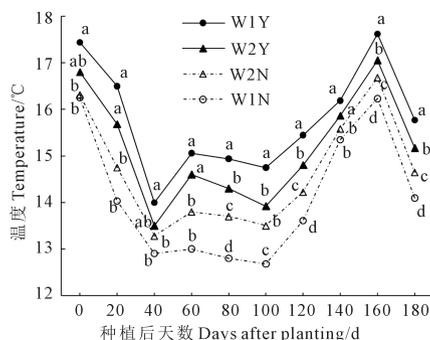


图 4 不同处理马铃薯生育期土壤温度的变化
Fig.4 Variation curves of soil temperature under different treatments during growth period of winter potato

后降低的特征,在块茎形成期初期氧气摩尔分数达到最大。4 种处理土壤氧气摩尔分数的大小关系为 $W1Y > W2Y > W2N > W1N$ 。同一灌溉水平下,加气处理的氧气摩尔分数显著高于不加气处理 ($P < 0.05$)。在加气条件下, $W1$ 处理的氧气摩尔分数也显著高于 $W2$ 处理 ($P < 0.05$),说明高水加气条件使土壤内形成了良好的水气平衡状态,有利于作物生长。Ben-Noah 等^[20-21]指出,大部分情况下,温度升高导致土壤氧气摩尔分数下降。本试验结果也证明了这一点,从苗期至块茎形成期初期,由于外界气温一直降低,导致土壤温度也基本呈下降趋势,而氧气摩尔分数一直增高,进入块茎膨大期后,气温不断回升,土壤氧气摩尔分数开始不断下降。另一方面,也有可能是由于温度的升高加大了作物根系和土壤微生物的有氧呼吸作用,间接导致了土壤氧气摩尔分数的降低。

图 7 为不同处理下冬马铃薯生育期内土壤氧气摩尔分数的日变化。土壤氧气摩尔分数在一日内整体呈下降的趋势变化,在 17:00 之后略有回升,以

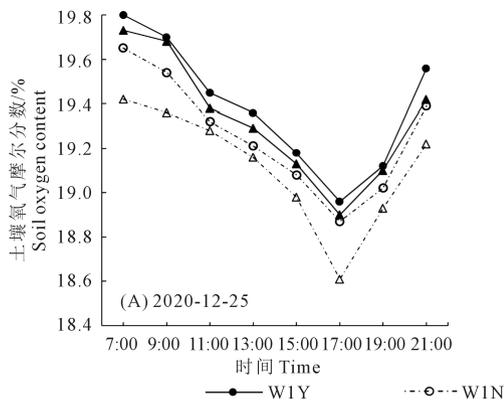


图 7 不同处理下冬马铃薯生育期土壤氧气摩尔分数的日变化

Fig.7 Diurnal variation of soil oxygen mole fraction under different treatments during growth period of winter potato

2.5 加气灌溉和灌水量对冬马铃薯产量和水分利用率的影响

由表 3 可知,加气灌溉和灌水量都对冬马铃薯的产量和水分利用率影响显著 ($P < 0.05$)。在同一灌溉水平下, $W1Y$ 与 $W1N$ 、 $W2Y$ 与 $W2N$ 处理下的产量和水分利用率差异显著 ($P < 0.05$)。在 $W1$ (高水) 灌溉条件下, Y 处理比 N 处理的产量高 6.5%, 水分利用率高 6.6%; 在 $W2$ (低水) 灌溉条件下, Y 处理比 N 处理的产量高 2.0%。在同一加气条件下, $W1$ (高水) 灌溉的产量也显著高于 $W2$ (低水) 灌溉。由表 4 知,加气条件和灌水量对产量和水分利用率均有极显著的影响 ($P < 0.01$); 两者交互作用对产量影响不显著 ($P > 0.05$),但对水分利用率影响显著 ($P < 0.05$)。

2020 年 12 月和 2021 年 2 月为例,在同一灌水量下加气处理的土壤氧气摩尔分数均高于不加气处理。2020 年 12 月 25 日(图 7A)土壤氧气摩尔分数的最高点出现在 7:00 附近,最小值出现在 17:00 附近,这与温度的变化规律(图 5A)刚好相反。2021 年 2 月 16 日(图 7B)土壤氧气摩尔分数的最高点出现在 9:00 附近,最小值出现在 17:00 附近。这与朱艳等^[18]的研究结果一致。

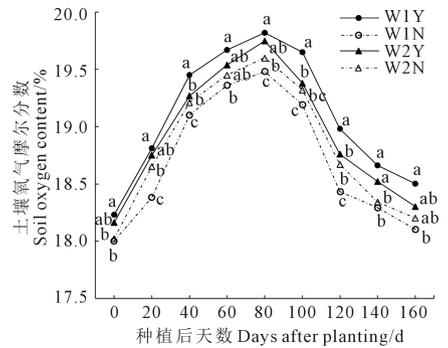


图 6 不同处理冬马铃薯生育期土壤氧气摩尔分数的变化
Fig.6 Variation of soil oxygen mole fraction under different treatments during growth period of winter potato

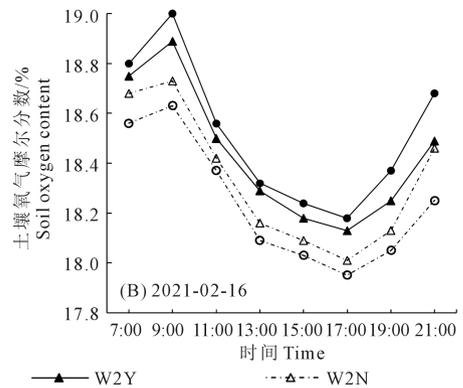


表 3 不同处理下的冬马铃薯产量和水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of winter potato under different treatments

处理 Treatment	产量 Yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌水量 Irrigation amount /mm	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 WUE /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)
W1Y	38926a	383.0	396.6	98.15c
W1N	36532b	383.0	396.6	92.11d
W2Y	25049c	229.8	243.4	102.91a
W2N	24568d	229.8	243.4	100.94b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

表4 产量和水分利用率的显著性检验

Table 4 Significance test of yield and water use efficiency

因素 Factor	产量 Yield	水分利用效率 WUE
灌水量 Irrigation amount	**	**
加气 Aeration	**	**
灌水量 * 加气 Irrigation amount * aeration	NS	**

注: **表示差异极显著($P < 0.01$), NS表示差异不显著。

Note: ** denotes extremely significant difference ($P < 0.01$), NS denotes insignificant difference.

3 讨论

土壤环境因子包括土壤水分、土壤氧气、土壤温度、土壤微生物种群等,他们的变化是相互联系且相互影响的。土壤通气性是指气体透过土体的能力,是反映土壤特性对土壤空气更新速率影响的综合指标。加气灌溉通过向土壤中输送水气混合物,使水和空气同时进入到作物根区土壤,与传统的地下滴灌相比,有效增大了土壤氧气摩尔分数,改善了土壤的通气状况。本研究表明,加气灌溉对土壤呼吸速率影响显著,且在加气条件下,灌水量也对土壤呼吸速率影响显著。已有研究表明通气性较差和厌氧的土壤环境中根和微生物的呼吸会明显降低^[20-21]。而土壤氧气的摩尔分数高,土壤的呼吸速率也随之升高。因此与W1N处理相比,W1Y处理下较高的土壤呼吸速率可能是由于土壤氧气的摩尔分数较高的缘故。

本研究表明,同一生育期内,W1N处理的土壤含水率最高,W2Y处理土壤含水率最低;且高水灌溉下,W1Y处理的土壤含水率低于对照处理。这可能是由于加气条件下向土壤中加入了空气,而土壤是由固、液、气三相组成的,因此土壤中的水分和空气就呈现了此消彼长的变化规律。尹晓霞等^[22]研究表明,在番茄整个生育期加气对土壤含水率影响均不显著,本研究与之略有不同,本研究表明在块茎膨大期加气灌溉对土壤含水率影响显著,这可能是由于马铃薯属于根际器官较丰富的作物,与番茄相比对土壤环境的要求更高,因此在大田种植条件下土壤的通气状况对土壤含水率的影响也更为显著。

本研究发现,土壤的氧气摩尔分数在加气灌溉条件下显著高于对照处理,且整个生育期的变化规律与土壤温度变化相对应。Ben-Noah等^[21]的研究仍表明,通过地下滴灌管道向土壤中注入空气使20 cm处土壤氧气饱和度增大了22%。Chen等^[23]的

研究也表明,在不同滴头埋深(10 cm和30 cm)和土壤类型(红壤土和黑土)中加气灌溉使得棉花根区土壤溶解氧显著增大了8.6%~32.6%,本研究结果与之相似。在马铃薯整个生育期,土壤温度在苗期和块茎形成期随外界气候变化基本呈下降趋势,在块茎膨大期和淀粉积累期有所上升;而从苗期至块茎形成初期,氧气摩尔分数一直增高;进入块茎膨大期后土壤氧气摩尔分数开始下降。Ben-Noah等^[20-21]指出,大部分情况下,温度升高导致土壤氧气摩尔分数下降,本研究也证实了这一点;另一方面,加气灌溉与对照相比,可以使得土壤温度小幅升高,温度升高另一方面也会促进土壤微生物的呼吸,消耗氧气从而导致土壤氧气摩尔分数下降,但是总体加气处理下土壤的氧气摩尔分数显著高于对照处理,说明向土壤根区通气改善土壤氧气摩尔分数的效应远远大于因温度升高导致土壤氧气摩尔分数下降的效应。

4 结论

1)在大田种植条件下,采用水气分离法对马铃薯进行加气灌溉,无论高水还是低水灌溉,加气处理对土壤呼吸速率影响显著;加气条件下,灌水量对土壤呼吸速率的影响也显著。除块茎膨大期外,加气灌溉对土壤含水率的影响均不显著,影响土壤含水率的主要因素是灌水量。在高水灌溉条件下,加气处理对土壤温度影响显著,而灌水量对土壤温度在大部分生育期影响不显著。

2)同一灌水水平下,加气处理的氧气摩尔分数明显高于不加气灌溉;高水灌溉条件下两者的差异更为显著,因此W1Y(高水加气)处理下土壤氧气摩尔分数最高。加气和灌水量两者交互作用对产量影响不显著,而对水分利用率影响显著。说明高水加气灌溉更有利于提高马铃薯产量和水分利用率。

3)在大田自然种植条件下,采用水气分离法进行加气灌溉,W1Y(高水加气)处理下马铃薯根区土壤的环境得到明显改善,与对照相比,0~20 cm土层深度土壤含水率降低了1.8%,在生育期前期温度提高了1.68℃,氧气摩尔分数增加了1.74%,产量和水分利用率均显著增大。

参考文献:

- [1] 金璟,张涛.云南马铃薯产业区域竞争力比较分析[J].云南农业大学学报:社会科学,2022,16(1):98-107.
JIN J, ZHANG T. Comparative analysis on regional competitiveness of potato industry in Yunnan[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Social Science), 2022, 16(1): 98-107.

- [2] 桑月秋,杨琼芬,刘彦和,等.云南省马铃薯种植区域分布和周年生产[J].西南农业学报,2014,27(3):1003-1008.
SANG Y Q, YANG Q F, LIU Y H, et al. Cultivated regional distribution and year-round production of potato in Yunnan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(3): 1003-1008.
- [3] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:110-130.
HUANG C Y. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 110-130.
- [4] 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.
- [5] SU N H. Generalisation of various hydrological and environmental transport models using the Fokker-Planck equation[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(4): 345-356.
- [6] 朱艳,蔡焕杰,侯会静,等.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(自然科学版),2016,44(5): 157-162.
ZHU Y, CAI H J, HOU H J, et al. Effects of aerated irrigation on root-zone environment and yield of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(5): 157-162.
- [7] 温改娉,蔡焕杰,陈新明,等.加气灌溉对温室番茄生长、产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):83-87.
WEN G J, CAI H J, CHEN X M, et al. Impact of aerated subsurface irrigation to growth yield and quality of greenhouse tomato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 83-87.
- [8] 雷宏军,肖哲元,肖让,等.水、肥、气耦合滴灌对温室番茄生长和品质的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):168-175.
LEI H J, XIAO Z Y, XIAO R, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupled drip irrigation on greenhouse tomato growth and fruit quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 168-175.
- [9] 崔冰晶,牛文全,杜娅丹,等.施氮和加气灌溉对黄瓜根区土壤环境及产量的影响[J].节水灌溉,2020,(4):27-32.
CUI B J, NIU W Q, DU Y D, et al. Effects of nitrogen application and aerated irrigation on soil environment and yield in cucumber root area[J]. Water Saving Irrigation, 2020,(4): 27-32.
- [10] 孙周平,郭志敏,刘义玲.不同通气方式对马铃薯根际通气状况和生长的影响[J].西北农业学报,2008,17(4):125-128.
SUN Z P, GUO Z M, LIU Y L. Measurement of rhizospheric CO₂ and O₂ concentrations of potato plant in the field and the responses to different rhizospheric ventilation treatments[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2008, 17(4): 125-128.
- [11] 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 T, YAO B S, XIAO W H, et al. Effects of aerated irrigation on potato yield and water use efficiency[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013,(8): 70-72.
- [12] 门福义,刘梦芸.马铃薯栽培生理[M].北京:中国农业出版社,1995.
MEN F Y, LIU M Y. Potato cultivation physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [14] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等.加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):223-232.
ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under oxygenation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 223-232.
- [15] 侯会静,陈慧,蔡焕杰.加气灌溉对部分土壤生境因子的影响[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):225-228.
HOU H J, CHEN H, CAI H J. Effects of aerated irrigation on part of soil habitat factors[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4): 225-228.
- [16] 王晓娇.马铃薯萌芽出苗期根系生育对土壤水分的生理和分子响应机制研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
WANG X J. Physiological and molecular mechanisms of potato sprouting root responses to soil moisture[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [17] 石晓华.非充分灌溉对滴灌马铃薯生长发育规律及养分利用效率的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
SHI X H. Effects of deficient irrigation on potato plant growth and NUE under drip irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [18] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等.加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J].农业工程学报,2017,33(21):163-172.
ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Aerated irrigation improved soil aeration of tomato root zone in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 163-172.
- [19] 龚雪文,李仙岳,史海滨,等.番茄、玉米套种膜下滴灌条件下农田地温变化特征[J].生态学报,2015,35(2):489-496.
GONG X W, LI X Y, SHI H B, et al. The interplanting between tomato and maize of soil temperature dynamics under mulched drip irrigation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 489-496.
- [20] 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.
- [21] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Oxygenation of clayey soils by adding hydrogen peroxide to the irrigation solution: lysimetric experiments[J]. Rhizosphere, 2016, 2: 51-61.
- [22] 尹晓霞,蔡焕杰.加气灌溉对温室番茄根区土壤环境及产量的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(3):33-37.
YIN X X, CAI H J. Effects of aerated irrigation on soil environment and yield of tomato root zone in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3): 33-37.
- [23] 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.