

# 增氧灌溉对盆栽冬小麦生长及土壤通气性的影响

徐建新, 臧明, 雷宏军, 潘红卫, 刘欢, 褚梦圆

(华北水利水电大学水利学院/水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046)

**摘要:**以冬小麦为供试作物,以普通地下滴灌为对照(CK),设置循环曝气(VAI)、双氧水(HP30、HP3K)三种增氧灌溉处理,系统监测土壤通气性、作物根系生长和养分吸收利用状况,研究土壤通气性与冬小麦生长的响应规律。结果表明,增氧灌溉可显著改善土壤通气性,与对照相比,灌溉后2 d内土壤通气性指标有显著改善,其中,VAI和HP30处理拔节期20 cm土层氧气扩散速率增大了43.99%和21.37%,VAI处理土壤呼吸增大了106.62%。增氧灌溉促进了作物根系生长,VAI处理0~10 cm土层根系总表面积和根长密度增加了44.18%和37.21%,HP30处理0~10 cm土层根长密度和根系总体积提高了21.13%和32.69%;增氧灌溉下作物的生理指标较对照有显著提高,其中,VAI、HP3K和HP30处理灌浆期光合速率提高了43.41%、26.37%和20.37%,VAI和HP30处理灌浆期气孔导度增大了23.53%和17.65%,蒸腾速率提高了11.61%和15.83%;同时,VAI处理和HP30处理产量提高了36.27%和23.37%,VAI处理水分利用效率增大了38.98%,均存在显著性差异。综上,增氧灌溉改善了作物根区的土壤通气性,促进了作物根系生长,提高了作物产量和水分利用效率,其中,VAI处理的改善效果最佳。

**关键词:**增氧灌溉;土壤通气性;冬小麦;根系生长;光合作用;产量

**中图分类号:**S274;S152.6;S512.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A

## Impacts of oxygenated irrigation on potted winter wheat growth and soil aeration

XU Jian-xin, ZANG Ming, LEI Hong-jun, PAN Hong-wei, LIU Huan, CHU Meng-yuan

(School of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Collaborative Innovation Center of Water Resources, Efficient Utilization and Protection Engineering in Henan province, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Perched water often leads to decrease in soil aeration of crop roots in subsurface drip irrigated soils. Oxygenation provides a source of oxygen in root environment that suffers from temporal hypoxia and unlocks yield potentials of crops. However, the effect of oxygenation on soil aeration was not well known. With winter wheat as a test crop, four irrigation treatments were used including venturi cyclic aeration irrigation (VAI), hydrogen peroxides 3000 (HP3K) solution, hydrogen peroxides 0030 solution (HP30), and a control treatment (CK). Subsurface drip irrigation was implemented, and the soil aeration, crop root growth, physiological indexes, and yield were systematically monitored. The effect of oxygenation on potted winter wheat growth and soil aeration was studied. Compared with the control treatment, the soil respiration in VAI increased by 106.62%, the oxygen diffusion rate in VAI and HP30 increased by 43.99% and 21.37%, respectively. Meanwhile, the total surface areas and root length density in VAI increased by 44.18% and 37.21%, and root length density and root volume in HP30 increased by 21.13% and 32.69%, respectively, compared with that of CK. The photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate were enhanced by oxygenation. Compared with CK, the photosynthetic rates in VAI, HP3K, and

收稿日期:2018-10-29

修回日期:2018-12-10

**基金项目:**国家自然科学基金(NSFC-河南联合基金,U1504512);河南省科技创新人才项目(174100510021);华北水利水电大学博士研究生创新基金

**作者简介:**徐建新(1954-),男,辽宁沈阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事区域水资源高效利用研究。E-mail: xujianxin@ncwu.edu.cn

**通信作者:**雷宏军,男,湖北大冶人,教授,博士,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术及水资源高效利用研究。E-mail: hj\_lei2002@163.com

HP30 increased by 43.41%, 26.37%, and 20.37%, respectively; the stomatal conductance in VAI and HP30 increased by 38.78% and 17.65%, the transpiration rate in VAI and HP30 increased by 21.55% and 15.83%, respectively. The yield in VAI and HP30 significantly increased by 36.27% and 23.37%, respectively, over that in CK, while the WUE in VAI significantly increased by 38.98%. In conclusion, subsurface aerated drip irrigation with aerated water improved the hypoxic environment in rhizosphere, thus enhanced the soil aeration and crop growth with increased crop yield as well as water utilization efficiency. Among the three aerated treatments, the enhancement effect in VAI was the best among the treatments.

**Keywords:** oxygation; soil aeration; winter wheat; root growth; photosynthesis; yield

土壤空气、水分和养分之间的平衡被称为肥力三角<sup>[1]</sup>。协调土壤水气环境以维持根系正常的新陈代谢,是灌溉追求的目标<sup>[2-3]</sup>。实际上,肥力三角的最佳平衡很少实现,灌溉水入渗会导致土壤孔隙中的空气被水分驱替,使得土壤湿润区出现至少短期的缺氧,严重时将导致作物减产<sup>[4]</sup>。滴灌和地下滴灌因其较高的水分利用效率而备受推崇,但是在灌溉过程中及之后灌水器的周围也会出现短时性和周期性滞水,在质地粘重、土壤紧实的土壤中情况尤其严重<sup>[2]</sup>。土壤水分过多,土壤通气孔隙度减少,通气性下降,根系生理代谢受阻,新生根系停止分裂,根系的伸展受到抑制<sup>[5]</sup>,收益可能大幅下降<sup>[6]</sup>。

氧气扩散速率(Oxygen diffusion rate, ODR)是衡量土壤通气性最有效的指标之一,可直接反映原位土壤中氧气的供应状况<sup>[7]</sup>,通常认为 ODR 低于阈值( $40 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )影响作物的正常生长,低于  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  甚至可能导致作物根系死亡<sup>[8]</sup>。Lemon 等首次利用铂金电极来模拟根系对氧气的吸收<sup>[9]</sup>。已有研究表明,ODR 与土壤氧气浓度存在良好的线性关系<sup>[10]</sup>,且土壤水分过多会造成 ODR 降低到阈值以下<sup>[11]</sup>,土壤向根系的供氧能力和 ODR 密切相关<sup>[9]</sup>。氧化还原电位(Oxidation-reduction potential, ORP, 亦称 Eh)是表征土壤通气性的另一重要参数,可反映土壤的氧化还原状况<sup>[12]</sup>,与土壤微生物活动有关,在调节土壤微生物环境方面起着重要作用<sup>[13]</sup>。Eh 在田间条件下受很多条件的影响,存在着较高的变异性,通常情况下认为 Eh 高于 414 mV 时土壤氧气状况较好,低于 120 mV 时为缺氧状况<sup>[14]</sup>。ODR 和 Eh 的改善以及由此带来的根系吸收和运输功能的改善是作物增产增效的根本所在<sup>[15]</sup>。

将氧气或含氧物质通过滴灌或地下滴灌系统向植物根区输送的一种新型的灌水技术被称为增氧灌溉<sup>[2]</sup>。增氧灌溉通常分为物理增氧和化学增氧方式。物理增氧方式可分为文丘里空气射流器

单次曝气<sup>[16]</sup>和循环曝气两种<sup>[17]</sup>。已有研究得出,文丘里空气射流器曝气灌溉能提高作物水分利用效率,促进作物生长,提高作物产量<sup>[18-19]</sup>。化学增氧方式是将双氧水( $\text{H}_2\text{O}_2$ )掺入灌溉水中进行增氧的方法<sup>[20]</sup>。Bhattarai<sup>[20]</sup>和 Ben-Noah<sup>[21]</sup>等利用双氧水进行增氧滴灌,改善了根区缺氧环境,增强了光合速率,提高了作物产量。

目前关于增氧灌溉的研究多集中于改善土壤根区环境<sup>[22]</sup>或促进作物生长<sup>[16]</sup>方面,土壤通气性改善与作物生长之间的作用机制有待深入研究。笔者以冬小麦为供试作物,采用循环曝气(VAI)、双氧水(HP30 和 HP3K 型)3种增氧灌溉处理,以普通地下滴灌作为对照(CK),通过系统监测土壤通气性与作物生长生理状况,以期揭示增氧灌溉对作物生长与土壤通气性改善的响应关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点概况

试验地点位于华北水利水电大学农业高效用水实验场( $34^\circ 47' 5.91''\text{N}$ ,  $113^\circ 47' 20.15''\text{E}$ ),该地属于暖温带亚湿润季风气候区,多年平均气温  $14.3^\circ\text{C}$ ,年均降雨量 632 mm,无霜期 220 d,全年日照时间约 2 400 h。试验期间的气温变化见图 1。

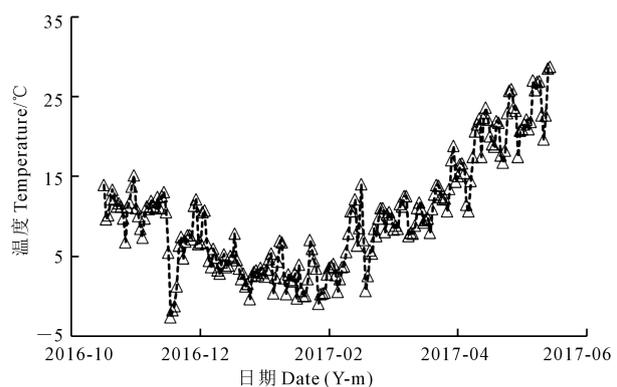


图1 试验地日平均气温

Fig.1 Average daily temperature at the experimental site

## 1.2 试验材料

以河南省中牟县黄粘土为供试土壤,土壤机械组成中砂、粉和黏粒质量分数分别为 34.6%、31.9% 和 33.5%,pH 值 7.1,土壤有机质  $14.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤速效氮、速效磷、速效钾含量分别为  $94.12$ 、 $14.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $172.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;供试小麦品种为郑麦 136,全生育期约 220 d。

## 1.3 试验设计

以常规地下水灌溉为对照(CK),地下滴灌为供水方式,设置 3 个增氧处理,分别为文丘里空气射流器循环曝气(VAI)、双氧水 3000 型(HP3K)和双氧水 0030 型(HP30),5 次重复,具体如下:

VAI:将文丘里射流器(Mazzei air injector 684, Mazzei Corp,美国)置于水流的干路上,利用偏压射流器从承压水箱顶部吸取空气,使用循环水泵将灌溉水往复通过文丘里射流器进行循环曝气。每次灌溉前曝气 20 min,然后再进行灌溉,灌水压力为 0.1 MPa,此时掺气比约 15%,溶解氧值约为  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [15]。

HP3K:使用 30%浓度的 HP3000 型农用  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液(Evonik industries AG,德国)配制  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的溶液进行灌溉[21]。该双氧水溶于水可缓慢释放氧气,使灌溉开始时溶解氧浓度和 VAI 一致,而后溶解氧开始上升,可较长时间保持高浓度水平。

HP30:使用 HP0030 型 30%浓度的农用  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Evonik industries AG,德国)配制  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的溶液进行灌溉[21],初始溶解氧浓度和 VAI 相同。与 HP3000 型农用  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液相比,HP0030 型释放氧气的速度较慢,持续时间更长。

HP3K、HP30 和 CK 处理采用 20 L 容积的储水桶作为储水工具,在灌溉前将桶中的灌溉水稀释成设计浓度,而后使用水泵(PLD-1206,中国石家庄市普兰迪机电设备有限公司)进行灌水,以精密压力表和分流开关控制压力。盆栽桶为圆台形,高 50 cm,上直径 40 cm,下直径 34 cm。桶壁包裹一层遮阳布。采用随机布置,每盆装土初始质量为 80 kg,质量含水量 25%,干土重 64 kg。装土时以 10 cm 为单位分层压实,以控制土壤容重为  $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。采用地下滴灌方式进行灌溉,每桶中心位置埋设一个滴头(Netafim,耐特菲姆(广州)农业科技有限公司),流量  $2.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,灌溉压力为 0.1 MPa,滴头埋深 15 cm。

## 1.4 试验管理

冬小麦 2016 年 10 月 22 日播种,次年 5 月 19 日收获。每盆播种 300 粒,播种深度为 2 cm,播种

后出苗整齐后作间苗处理,保留 200 株。试验布置在移动遮雨棚下进行,降雨时用雨棚遮挡,其余时间打开雨棚。灌水上限为 85%田间持水量,初次灌水灌至上限,而后采用称重法监测土壤含水量,当土壤含水量下降到 65%田间持水量时,进行补水至 80%田间持水量[23]。灌溉前后称重计算每次灌溉水量。

采用了全水溶性肥料施乐多( $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$  的比例为 15%-15%-30%,中国康拓肥料有限公司)。播种前,基肥用量为  $20 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ ,均匀搅拌施于表层土体的 1/3 处。分别于播种后 110 d 和 151 d 通过水肥耦合方式追肥 2 次,每次  $10 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。

## 1.5 观测内容及方法

1.5.1 水源处溶解氧 采用光纤微氧传感器测定(OXY4-mini,德国 Presens 公司)储水桶中溶氧值,以开始处理时间为 0,每隔 4 h 测量一次,一直持续到 112 h,此时各处理的溶解氧浓度达到同一水平。

1.5.2 土壤氧化还原电位/氧气扩散速率 于监测桶中水平埋设 3 根铂金探头,埋设深度为 10、20 cm 和 30 cm,探头位置靠近监测桶的中心位置。使用氧化还原电位测量仪(中国上海仪电科学仪器股份有限公司)对土壤中氧化还原电位状况进行监测,同时可以监测氧气扩散速率[10]。于冬小麦拔节期(3月7日)、抽穗期(3月27日)和灌浆期(4月20日)的完整灌水周期内进行监测,灌水前测量一次,灌水结束后监测一次,而后每天的 10:00 和 17:00 分别监测一次,持续到第二次灌水前。

1.5.3 土壤呼吸速率 采用土壤呼吸测量系统(ADC LCi-SD,英国 Delta-T 公司)测量土壤呼吸。由于生育期盆栽土壤表面生长有小麦秸秆,测量土壤呼吸所需的土壤呼吸室底座无法埋设于土壤中,于收获(籽粒和秸秆均收获)当天(5月19日)和第二天进行了土壤呼吸速率的测量,5月19日上午 9:00 之前完成收获后立即开始监测,每 3 h 监测一次,持续到下午 18:00;5月20日测量时间相同。为保证测量时根系的活性,并且使土壤呼吸速率对增氧处理的响应更显著,于收获前一天(5月18日)进行了灌溉处理。

1.5.4 根系 采用根钻钻取根系样品,根钻内径 3.9 cm,长度 10 cm,每次取土体积  $119.46 \text{ cm}^3$ 。将表层 30 cm 土壤等深度分为 3 层,每层重复采样 3 次。取样后洗根,吸干根系表层附着水后,使用根系分析仪(WinRHIZO,加拿大 Regent 公司)统计根系根体积、根长、根尖数、分叉数等。

1.5.5 净光合速率、蒸腾速率及气孔导度 使用光

合测定仪(Li-6400XT,美国Li-COR公司),于拔节期(3月1日)、抽穗期(3月27日)和灌浆期(4月26日)测定净光合速率、蒸腾速率和气孔导度。测定时间选择晴朗天气上午的11:00开始,每桶选3株测算平均值。

1.5.6 产量及生物量 在生育末期,以桶为单位收获小麦地上部,脱粒后单独计产,用0.01 g精度天平称量,统计其千粒重,水分利用效率为作物产量与灌水量的比值;收获后的秸秆于105℃杀青30 min后,于70℃烘箱中放置72 h,称量其干质量。

## 1.6 数据处理

数据使用平均值±标准差的形式表示。采用SigmaPlot软件进行数据处理,采用Fisher LSD方法进行差异显著性检验,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同增氧处理下灌溉水中溶解氧动态

生物试验开始前,研究了增氧处理灌溉水中溶解氧保持特性。以VAI处理曝气结束和HP3K、HP30处理双氧水溶液配置完成的时间为0 h,第一天每隔2 h测量一次水中溶解氧,而后每隔4 h测量一次,一直持续到112 h,结果见图2。结果显示,三种增氧处理水中溶解氧较对照均有显著提高。VAI、HP3K和HP30处理在增氧结束后达到最高值(15.94、16.12 mg·L<sup>-1</sup>和15.95 mg·L<sup>-1</sup>),较CK(5.21 mg·L<sup>-1</sup>)分别增大了205.68%、209.13%和205.91%;增氧处理的溶氧值随着时间推延开始缓慢下降,VAI、HP3K和HP30处理后溶解氧0~24 h均值为12.30、14.65 mg·L<sup>-1</sup>和14.35 mg·L<sup>-1</sup>,较CK(6.38 mg·L<sup>-1</sup>)仍平均增大了93.25%、130.30%和125.43%。68 h时VAI溶解氧下降到了8.48 mg·L<sup>-1</sup>,较CK(8.47 mg·L<sup>-1</sup>)无差异,此时HP3K处理和HP30处理分别为11.18 mg·L<sup>-1</sup>和11.55 mg·L<sup>-1</sup>。

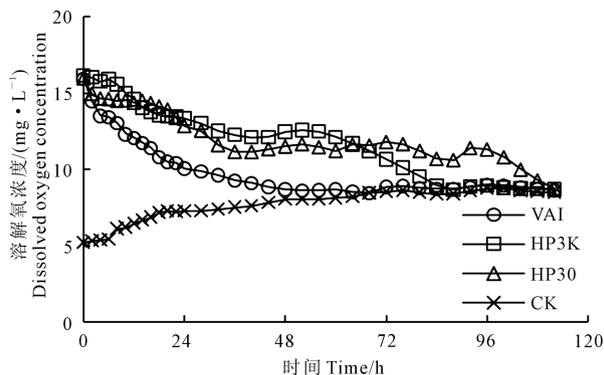


图2 不同处理水源处溶解氧浓度

Fig.2 Dissolved oxygen concentration (DO) dynamics in water tank of different treatments

VAI处理溶解氧水平下降较快,HP3K和HP30处理保持特性较好,HP3K处理在88 h下降与CK处理相同,HP30处理在112 h下降至CK同一水平。

### 2.2 增氧灌溉对土壤通气性的影响

2.2.1 土壤呼吸速率 增氧灌溉对土壤呼吸速率的影响见图3。图3显示,灌溉后第一天(5月19日)VAI处理于16:00达到最大值,较CK增大了80.24%;灌溉后第二天(5月20日)9:00达到最大值,而后降低,其中VAI处理对土壤呼吸的增强效果仍较显著,于中午12:00差异最大,较CK处理增大了28.62%。HP3K和HP30处理较CK均无显著差异。增氧灌溉对土壤呼吸具有显著的增强作用,这种效果在灌溉后第一天表现更强烈。

2.2.2 土壤氧气扩散速率 冬小麦不同生育期的土壤氧气扩散速率见图4。灌溉开始后各处理土壤养气扩散速率(ODR)值开始下降,10 cm和20 cm深度处各处理于灌水结束后4.6 h达到最小值,而30 cm深度处VAI处理在4.6 h处达到最小值后开始回升,其他处理在22 h下降至最小值。20 cm深度各处理ODR值变化最显著,拔节期(图4b)、抽穗期(图4e)和灌浆期(图4h)各处理的最低值分别为 $20.79\sim 23.78\times 10^{-8}$ 、 $13.3\sim 21.6\times 10^{-8}$  g·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>和 $7.2\sim 19.1\times 10^{-8}$  g·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>,从抽穗期开始,根系缺氧状况加剧,各处理最低值降至 $20\times 10^{-8}$  g·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>以下,灌浆期甚至降至 $10\times 10^{-8}$  g·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>以下,严重影响了作物正常生长。

各增氧处理的ODR值于灌水结束后回升,并在48 h内持续处于较高水平。在效果最为明显的20 cm深度处,VAI处理在拔节期、抽穗期和灌浆期的灌后48 h平均ODR值较CK增大了60.45%、73.77%和87.88%( $P<0.05$ ),HP30处理在拔节期和抽穗期分别增大了21.37%和23.61%( $P<0.05$ );10 cm

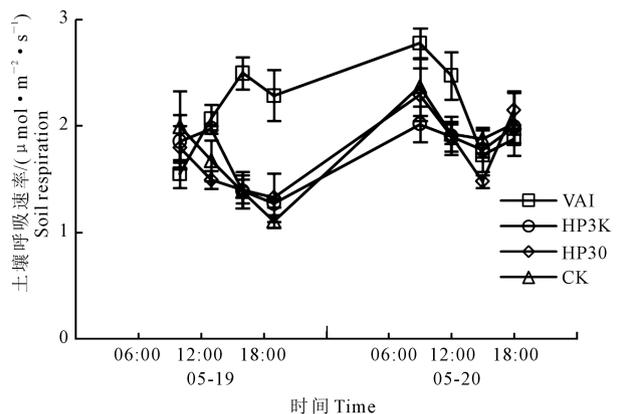


图3 土壤呼吸速率动态

Fig.3 Daily soil respiration dynamics in different treatments

深度也有一定的改善效果,VAI 和 HP30 处理的灌后 48 h 内平均 ODR 值在拔节期(图 4a)、抽穗期(图 4d)、灌浆期(图 4g)增大了 47.49%和 26.18%、62.85%和 39.54%、79.28%和 44.60% ( $P<0.05$ ),而在 30 cm 深度,VAI 处理的灌后 48 h 内平均 ODR 值在拔节期、抽穗期、灌浆期较 CK 增大了 60.45%、65.54%和 53.41% ( $P<0.05$ )。48 h 内,10 cm 和 20 cm 深度 VAI 和 HP30 处理较 CK 增长比较明显,30 cm 深度 VAI 处理增长明显。

冬小麦不同生育期的 ODR 表现有所差异。拔节期各处理均高于  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ,其中 VAI 和 HP30 处理在灌后 22~45 h 的 ODR 值均高于  $40 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ,在 69 h 才回落至灌水前水平;抽穗期的缺氧状况加剧,各处理最低值降至  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以下,VAI 处理在灌水后 48 h 的 ODR 值均保持在  $40 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以上,HP30 处理在 24 h 后 ODR 值回升至  $40 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以上;灌浆期各处理的最低值降至  $10 \times$

$10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ,为三个时期最低,此时作物需氧量较大,对土壤氧气环境要求高,VAI 和 HP30 处理灌后 24~48 h 各个深度的 ODR 值均达到  $40 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以上;VAI 和 HP30 处理可显著改善作物根区的缺氧环境。

2.2.3 土壤氧化还原电位 图 5 给出了冬小麦不同生育期的土壤氧化还原电位( $E_h$ )动态变化。拔节期(图 5a~5c)各处理在不同深度的变化趋势基本一致,在灌水后均下降至最低值后开始回升,VAI、HP3K、HP30 和 CK 处理 3 个深度的最低值基本一致,VAI 和 HP30 处理在灌后 22 h 回升至最大值,较 CK 有所增强,VAI 处理在 10、20 cm 和 30 cm 深度处分别增大了 6.73%、7.3%和 5.92%,HP30 处理在 10、20 cm 和 30 cm 深度处分别增大了 13.23%、12.97%和 9.42%;而后各处理回落至灌前水平。

抽穗期(图 5d~5f)VAI 和 HP30 处理灌后 48 h 平均值较 CK 有显著增加,VAI 处理 10、20 cm 和 30 cm 深度处平均增大了 6.73%、9.01%和 8.05% ( $P<0.05$ ),

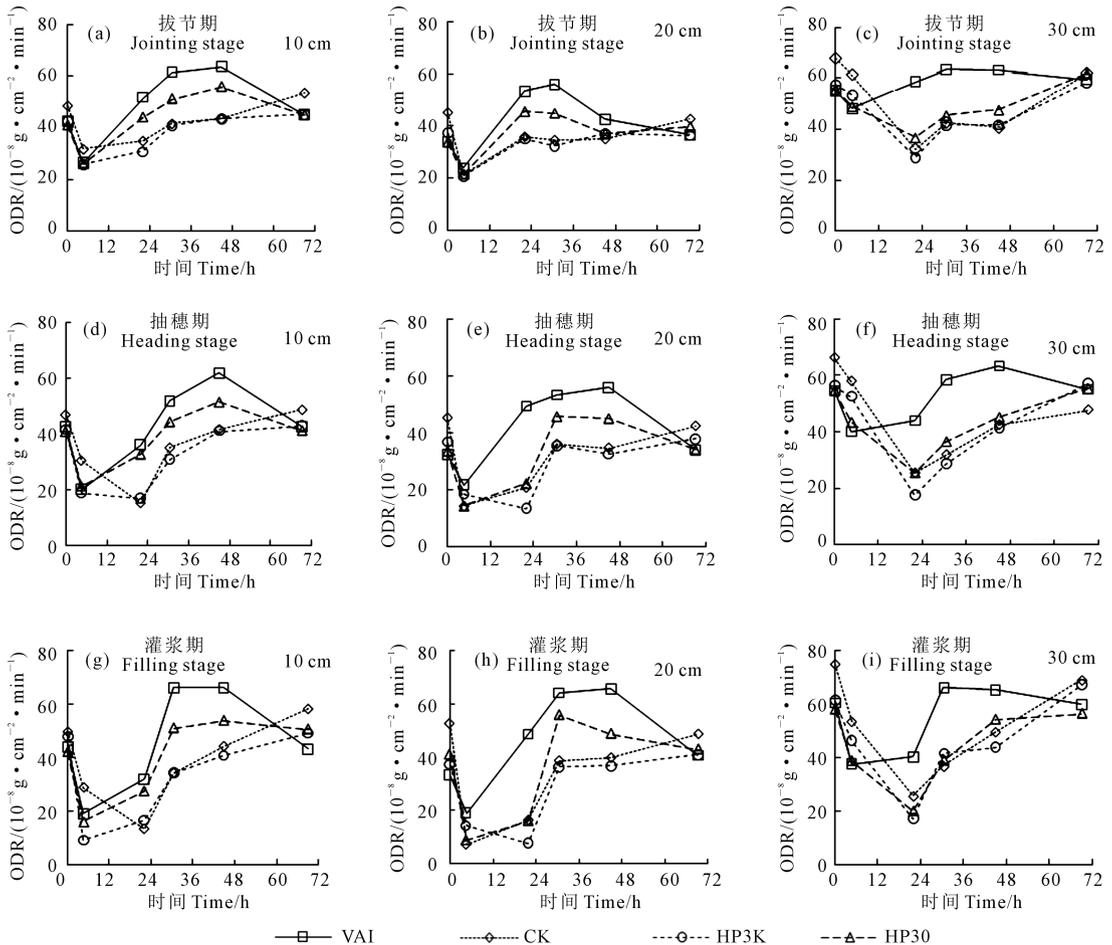


图 4 不同处理下土壤氧气扩散速率动态

Fig.4 Soil oxygen diffusion rate (ODR) dynamics in different treatments

HP30 处理增大了 13.12%、15.80% 和 8.61% ( $P < 0.05$ )。灌浆期 Eh (图 5g~5i) 最大值均晚于前两个时期,其中 VAI 处理 10 cm (图 6g) 和 20 cm 深度 (图 5h) 的 Eh 最大值出现在 69 h,其余各处理均出现在 45 h。10 cm 处 VAI 和 HP30 的 72 h 平均值较 CK 增大了 4.01% 和 10.54% ( $P < 0.05$ );20 cm 处增

大了 13.36% 和 18.20% ( $P < 0.05$ );30 cm 处增大了 10.21% 和 7.96% ( $P < 0.05$ )。

总的来说,增氧灌溉对 Eh 有一定的增强作用,如拔节期和抽穗期各处理均于灌水后第一天达到最大值,而灌浆期作物生长较为旺盛,根系需氧量增大,各处理的 Eh 最大值出现时间发生后移。

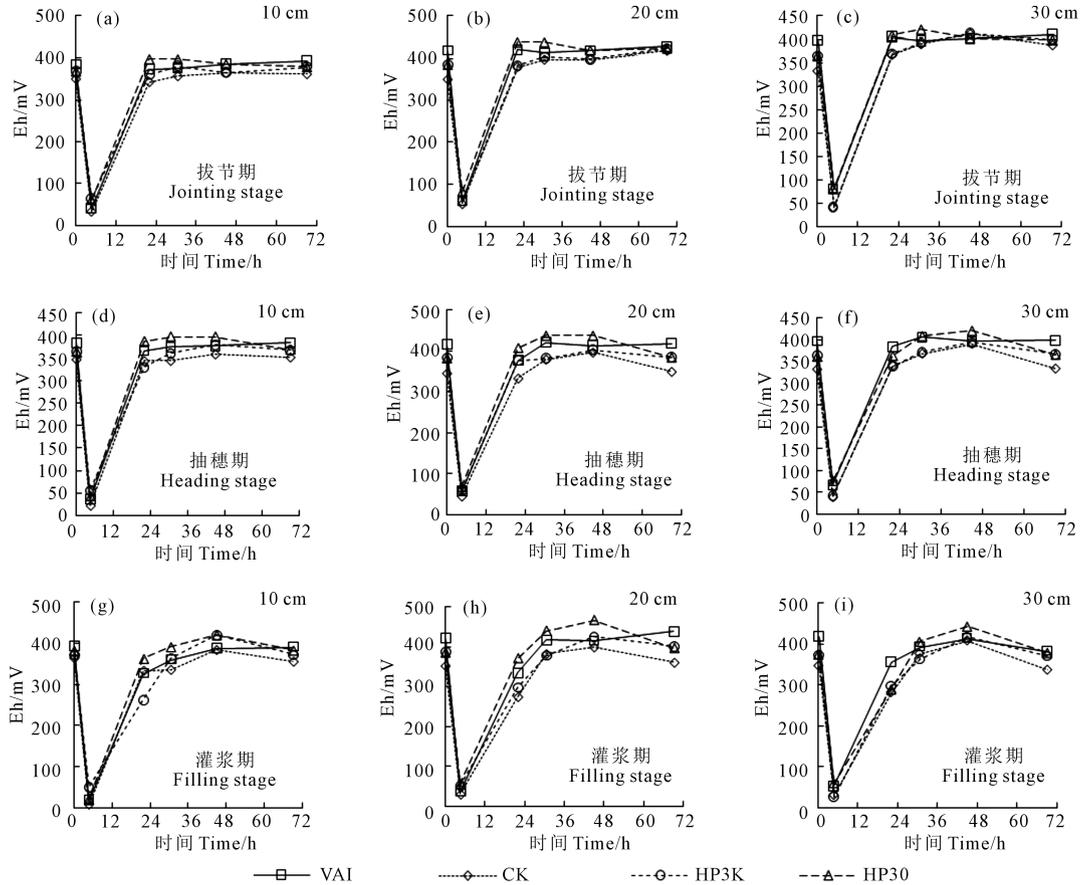


图 5 不同处理下土壤氧化还原电位动态

Fig.5 Soil oxidation-reduction potential (Eh) dynamics in different treatments

表 1 不同处理下作物根系形态指标

Table 1 Crop root morphology indexes in different treatments

土层/cm Soil depth	处理 Treatment	根系总表面积/cm <sup>2</sup> Root surface area	平均直径/mm Average diameter	根长密度/(cm·m <sup>-3</sup> ) Root length density	根系总体积/cm <sup>3</sup> Root volume	根尖数 No. of tips
0~10	VAI	230.51±26.30a	0.38±0.03a	5.31±0.50a	1.87±0.44ab	5241.60±1301.60a
	HP3K	184.17±13.36bc	0.41±0.04a	4.03±0.65b	1.76±0.40ab	5913.60±1895.92a
	HP30	207.27±21.97ac	0.39±0.06a	4.92±0.68a	1.81±0.61a	5935.20±1397.32a
	CK	169.45±20.70b	0.38±0.03a	3.87±0.29b	1.57±0.58b	3374.40±300.80a
10~20	VAI	34.03±6.34a	0.24±0.02a	1.13±0.17a	0.19±0.05ab	2557.80±569.01a
	HP3K	28.99±13.63ab	0.27±0.04a	1.09±0.24a	0.19±0.11a	1632.20±365.84bc
	HP30	24.63±7.62b	0.24±0.04a	1.20±0.21a	0.14±0.04b	1871.00±587.92c
	CK	26.92±2.65ab	0.23±0.02a	1.12±0.16a	0.18±0.05ab	1590.20±303.42b
20~30	VAI	27.30±5.58b	0.24±0.02a	0.64±0.06a	0.16±0.03a	1544.80±522.16a
	HP3K	19.19±4.84b	0.26±0.03a	0.61±0.08ab	0.12±0.02a	971.60±173.19a
	HP30	30.16±5.66a	0.25±0.03a	0.55±0.04ab	0.13±0.03a	1220.40±599.94a
	CK	18.64±3.71b	0.24±0.04a	0.51±0.08b	0.12±0.02a	907.00±96.75a

注:同一列相同土层不同字母表示在  $P < 0.05$  水平下存在显著性差异。

Note: The different letters in the same column and depth indicate significant differences at  $P < 0.05$ .

## 2.3 增氧灌溉对冬小麦根系的影响

受不同处理通气性改善效果差异的影响,不同深度的冬小麦根系状况有了较大的变化(表 1),VAI 和 HP30 处理通气性改善效果显著,根系生长得到增强。0~10 cm 土层处根系生长最为旺盛,VAI 处理根系总表面积和根长密度较 CK 分别增加了 44.18% 和 37.21% ( $P<0.05$ );HP30 处理根长密度和根系总体积也有显著改善,较 CK 分别提高了 21.13% 和 32.69% ( $P<0.05$ );HP3K 和 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。而在 10~20 cm 土层,增氧处理根系的改善效果最为明显,VAI 的总表面积和根尖数较 CK 分别增大了 51.74% 和 84.86% ( $P<0.05$ );HP30 的根尖数较 CK 增大了 84.12% ( $P<0.05$ );HP3K 和 CK 处理仍无显著差异。20~30 cm 土层 VAI 的总表面积、根长密度和根尖数较 CK 提高了 38.31%、25.49% 和 69.02% ( $P<0.05$ );HP30、HP3K 和 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ )。

## 2.4 增氧灌溉对冬小麦生理指标的影响

拔节期、抽穗期和灌浆期的叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率测定结果见表 2~4。

表 2 不同生育期小麦光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$

Table 2 Wheat photosynthetic rate at different growth stages

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
VAI	17.12±1.29a	19.78±1.40a	19.36±0.94a
HP3K	16.78±1.64a	19.60±2.22a	17.06±0.96b
HP30	16.70±1.26a	19.22±2.17a	16.25±1.99bc
CK	15.40±1.71a	18.59±1.71a	13.50±1.23d

注:同一列不同字母表示在  $P<0.05$  水平下存在显著性差异。下同。

Note: The different letters in the same column indicates significant differences at the level of  $P<0.05$ . The same below.

表 3 不同生育期小麦气孔导度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$

Table 3 Wheat stomatal conductance at different growth stages

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
VAI	0.63±0.15a	0.68±0.06a	0.21±0.02a
HP3K	0.59±0.09a	0.58±0.08ab	0.17±0.03ab
HP30	0.47±0.13a	0.53±0.14ab	0.20±0.02a
CK	0.46±0.04a	0.49±0.05b	0.17±0.01b

表 4 不同生育期小麦蒸腾速率/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$

Table 4 Wheat transpiration rate at different growth stages

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
VAI	4.94±0.17a	6.43±0.35a	4.23±0.33a
HP3K	5.28±0.43a	5.64±0.37b	4.20±0.63ab
HP30	4.90±0.50a	5.41±1.01ab	4.39±0.30a
CK	4.87±0.44a	5.29±0.77b	3.79±0.25b

增氧处理的光合速率有了显著改善,灌浆期 VAI、HP3K 和 HP30 处理的光合速率较 CK 处理均有所提高,分别增大了 43.41%、26.37% 和 20.37% ( $P<0.05$ )。增氧灌溉处理冬小麦气孔导度有了显著增强,蒸腾速率提高。抽穗期 VAI 处理的气孔导度较 CK 处理增大了 38.78%,蒸腾速率增大了 21.55%;灌浆期 VAI 和 HP30 处理的气孔导度较 CK 处理增大了 23.53% 和 17.65% ( $P<0.05$ ),蒸腾速率增大了 11.61% 和 15.83% ( $P<0.05$ );HP3K 的气孔导度和蒸腾速率较 CK 均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

## 2.5 增氧灌溉对冬小麦产量和生物量的影响

冬小麦的产量、水分利用效率和秸秆生物量列于表 5。与对照相比,VAI 和 HP30 处理的产量增大了 36.27% 和 23.37%,HP3K 没有显著差异。VAI、HP3K、HP30 和 CK 处理的水分利用效率分别为 2.46、2.20、2.15  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  和 1.77  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,VAI 处理较 CK 增大了 38.98%,HP3K 和 HP30 处理却没有显著差异。VAI 和 HP30 的秸秆生物量较 CK 增大了 23.57% 和 9.23%。

表 5 不同处理小麦产量、水分利用效率和秸秆生物量

Table 5 Wheat yield, water use efficiency and straw biomass under different treatments

处理 Treatment	产量 Yield $/(g \cdot \text{盆}^{-1})$ $/(g \cdot \text{pot}^{-1})$	千粒重 1000-grain weight/g	水分利用效率 WUE $/(kg \cdot \text{m}^{-3})$	秸秆生物量 Straw biomass $/(g \cdot \text{盆}^{-1})$ $/(g \cdot \text{pot}^{-1})$
VAI	162.19±9.33a	50.32±1.95a	2.46±0.14a	145.62±5.15a
HP3K	144.43±19.54ab	49.68±5.74a	2.20±0.29ab	124.48±10.32ab
HP30	146.84±14.72a	47.88±3.39a	2.15±0.22ab	130.01±5.75a
CK	119.02±7.77b	49.24±3.87a	1.77±0.12b	117.84±5.51b

## 3 讨论

### 3.1 增氧灌溉对冬小麦根际土壤通气性的改善效应

作为表征土壤透气性和土壤中氧含量的综合指标,土壤通气性反映了土壤气体的组成及其对植物的作用、土壤气体的吸附、产生、交换等各个方面<sup>[24]</sup>。土壤通气性与土壤质地和土壤容重关系密切,砂质土壤的通气性要好于粘质土壤,相同质地条件下,随着土壤容重的增大土壤通气性变差<sup>[25]</sup>。

增氧灌溉水气两相流中微气泡易附着土壤孔隙中,可持续向水中供氧,以维持土壤中良好的氧气环境<sup>[17]</sup>,可维持 24 h 以上<sup>[26]</sup>。文丘里空气射流器循环曝气将微小气泡和水混合起来输送到作物根区,双氧水灌溉于根际土壤中缓慢释放氧气<sup>[27]</sup>,可改善根区土壤缺氧环境。本试验中,VAI 和 HP30

处理的 *ODR* 值较 CK 均有显著提高,改善效果最少持续了 48 h,且 VAI 处理于 10、20、30 cm 深度的改善效果均很显著,HP30 处理在 10 cm 和 20 cm 处的改善效果显著;HP30 处理对 *Eh* 的改善效果更好,这可能是由于双氧水本身的强氧化性造成的。

土壤呼吸是表征土壤通气性的一个重要指标,它是土壤与大气之间进行气体交换的主要途径,主要来自作物根系的自养呼吸作用和土壤微生物的异养呼吸作用,土壤温度、水分及土壤通气状况均对土壤呼吸产生重要影响<sup>[28]</sup>。根系呼吸是植物活性最为敏感的方面,与土壤通气状况紧密相关。土壤通气不足,首先表现为根系呼吸强度下降,进而影响土壤呼吸<sup>[29]</sup>。已有研究表明增氧灌溉可显著改善作物根区的缺氧状况,根区土壤氧气浓度得到了提高,且浅层土壤氧气浓度要大于深层土壤<sup>[30]</sup>。这与本试验结论一致。增氧灌溉将含氧物质输送到作物根区,改善了土壤中的 *ODR* 和 *Eh*,增强了根系的自养呼吸作用<sup>[20]</sup>,还增强了好氧微生物的增长以及土壤酶活性<sup>[31]</sup>,进而改善了土壤呼吸,当温度和水分相近时,灌溉后 VAI 处理的土壤呼吸速率要大于 CK 处理。有研究得出,使用双氧水进行增氧灌溉会对土壤中的微生物量造成负面影响<sup>[32]</sup>,HP30 将农用双氧水输送到作物根区,改善了土壤的通气状况,可增强作物根系的自养呼吸,同时降低了土壤中的微生物量,影响了微生物的异养呼吸作用,导致其土壤呼吸速率和 CK 没有显著差异。

### 3.2 冬小麦根系生长对土壤通气性改善的响应

植株根系的生长对缺氧的胁迫较为敏感,氧气缺乏会抑制根系的生长<sup>[33]</sup>。增氧灌溉将氧气或含氧物质输送到根区,满足根系生长的需求,可促进植株的生长发育,有效提高植株的生物量积累及产量<sup>[16]</sup>。在 0~10 cm 土层,VAI 处理总表面积和根长密度较 CK 处理有显著提升;HP30 处理根长密度和根系总体积也有显著改善;而在 10~20 cm 土层,增氧处理 *ODR* 值改善效果最为显著,根系受益于这种改善,VAI 的总表面积和根尖数较 CK 处理增长显著,HP30 的根尖数较 CK 处理显著增多;20~30 cm 土层 VAI 处理的根长密度和根尖数较 CK 显著提高。有研究得出,作物根系经常处于缺氧的不利生长环境中,在灌溉过程中尤为明显<sup>[18]</sup>,增氧灌溉改善了根区氧气环境,促进了根系的干物质积累,在番茄研究中证明了这一点,增氧灌溉促进了植株根系的生长<sup>[29]</sup>。本试验中,VAI 处理在 10、20 cm 和 30 cm 深度对根系的改善比较显著,而 HP30 处理在 10 cm 和 20 cm 土层处比较显著,这与 *ODR* 表现相

似,VAI 和 HP30 处理对 10 cm 和 20 cm 处土壤 *ODR* 的改善较为明显,而 30 cm 处 VAI 处理改善显著。有研究得出,双氧水增氧灌溉对作物根系的改善区域集中于滴头附近<sup>[18]</sup>,HP30 处理对根系的改善集中于滴头(15 cm 深度)处,而 VAI 处理的改善区域比较广泛。

增氧灌溉改善了土壤通气性,进而促进根系的生长,根系的生长和 *ODR* 值呈显著的线性关系<sup>[10]</sup>。这与本试验结论一致,在效果最为明显的 20 cm 深度处,各时期 VAI 处理灌后 48 h 平均 *ODR* 值较 CK 平均增大了 74%,根系总表面积受益于这种改善,增大了 51.74%;而在 10 cm 深度,各时期 VAI 处理灌后 48 h 平均 *ODR* 值较 CK 增大了 63.2%,根系总表面积增大了 44.18%;30 cm 深度这两个数据分别为 59.8% 和 38.31%。可以看出增氧灌溉对 *ODR* 的改善效果对根系的生长有直接影响,改善效果的强弱和根系表面积有一定的正相关关系,这证明了增氧灌溉对土壤通气性的改善可促进根系生长。

### 3.3 冬小麦生理活动和产量对土壤通气性改善的响应

增氧灌溉可改善作物根区的缺氧环境,促进了作物的生长,提高了作物的叶绿素含量<sup>[17]</sup>和光合作用效率<sup>[14]</sup>。本试验中,光合作用有较大的改善,叶片蒸腾作用也受益于土壤通气性的改善,VAI 和 HP30 处理的蒸腾速率和气孔导度有所提高,这同上文土壤通气性的测量结果一致。Sojka<sup>[34]</sup>的研究得出,根区的低氧环境会导致光合速率的降低,增氧灌溉改善了低氧环境,光合速率得到增强。水分过多时,根区的低氧环境会导致根系吸收水分效率的降低<sup>[35]</sup>,影响植株的生长,降低了叶片的蒸腾速率。*ODR* 值与植物的生理反应、营养特性和植物生长密切相关<sup>[10]</sup>,冬小麦生长旺盛时期根系的需氧特征使灌溉造成的缺氧环境愈发严重,*ODR* 值也有一定的差异,拔节期灌水后 *ODR* 最低值仍位于  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以上,抽穗期已降至  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  以下,灌浆期甚至低于  $10 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ,增氧灌溉将含氧物质输送到作物根区,可有效缓解灌溉造成的缺氧状况,在缺氧情况严重的生长旺盛期效果更加显著,灌浆期 VAI 处理的光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有显著提高,土壤通气性状态对作物生理反应有重要的影响。高产、优质是农业生产追求的主要目标,根区低氧胁迫会使根向冠层传递缺氧信号,影响水、植物生长素等生长物质的运输和储存,导致作物减产<sup>[36]</sup>。从产量可以看出,相对于 CK 处理来说,VAI 和

HP30 的产量均有提高,HP3K 却没有显著差异,VAI 为最高产量。这与 Lei 等<sup>[26]</sup>所研究的在玉米产量受到增氧灌溉的增产效果相一致,辣椒的产量也能从双氧水地下滴灌中受益<sup>[19]</sup>。VAI 处理的水分利用效率较 CK 有所提高,而其他处理却没有显著差异。植株的生物产量和整个生育期的总蒸发量成正比<sup>[13]</sup>,由上文可知,VAI 处理的蒸腾速率较 CK 显著提高,这与产量数据表现一致。

总的来说,与土壤呼吸和  $E_h$  相比,ODR 值与作物生长的相关关系更为紧密。本试验中,各处理的 ODR 值与根系指标、光合指标、蒸腾速率和产量的变化趋势相同,ODR 的改善对作物的生长有一定的影响。有研究指出,土壤通气性的改善和温室番茄产量呈正相关关系<sup>[37]</sup>,这与本试验结论一致。

## 4 结 论

该文以冬小麦为供试作物,研究了不同增氧方式下土壤通气性与冬小麦生长的响应规律,结果表明,增氧灌溉可显著改善植株根区的缺氧环境,对植株的生长发育有显著的促进作用。

1) 增氧灌溉可显著改善土壤通气性。灌溉后 VAI 处理土壤呼吸有显著增强。VAI 处理和 HP30 处理的氧气扩散速率也有显著增强,且能长时间保持在阈值以上,不影响作物的正常生长。

2) 增氧灌溉促进了作物的根系生长。VAI 和 HP30 处理的根系总表面积、根长密度、根系总体积和根尖数较 CK 有显著提升。

3) 增氧灌溉提高了作物的生理指标。VAI、HP3K 和 HP30 增氧处理的光合作用、蒸腾速率和气孔导度均有显著提高。

4) 增氧灌溉提高了作物的产量。相对于对照,VAI 处理和 HP30 处理的产量有显著提高,VAI 处理的水分利用效率也有显著提高。

## 参 考 文 献:

[1] WOLF B. The fertile triangle: the interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity [J]. *Soil Science*, 1999, 165 (8):677-679.

[2] Bhattarai S P, Midmore D J, SU N. Sustainable Irrigation to Balance Supply of Soil Water, Oxygen, Nutrients and Agro-Chemicals [C]//ERIC Lichtfouse, Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. New York: Springer, 2010:253-286.

[3] Bhattarai S P, SU N, Midmore D J. Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments [J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 313-377.

[4] Meek B D, Ehlig C F, Stolzy L H, et al. Furrow and Trickle Irrigation; Effects on Soil Oxygen and Ethylene and Tomato Yield [J]. *Jour-*

*nal of the Soil Science Society of America*, 1983, 47(4):631-635.

[5] Silberbush M, Gornat B, Goldberg D. Effect of irrigation from a point source (trickling) on oxygen flux and on root extension in the soil [J]. *Plant and Soil*, 1979, 52(4):507-514.

[6] Meyer W S, Barrs H D, Smith R, et al. Effect of irrigation on soil oxygen status and root and shoot growth of wheat in a clay soil [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1985, 36(2):171-185.

[7] Kirkham M B. Chapter 12-Oxygen Diffusion Rate [C]//Principles of Soil & Plant Water Relations. Burlington: Academic press, 2014: 185-200.

[8] Feng G, Wu L, Letey J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime [J]. *Soil Science*, 2002, 167(8):495-503.

[9] Lemon E R, Erickson A E. The measurement of oxygen diffusion in the soil with a platinum microelectrode I [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1952, 16(2):160-163.

[10] Mukhtar S, Baker J K, Kanwar R S. Effect of short-term flooding and drainage on soil oxygenation [J]. *Transactions of the Asae*, 1996, 39 (3):915-920.

[11] Feng G, Wu L, Letey J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime [J]. *Soil Science*, 2002, 167(8): 495-503.

[12] Bohrerova Z, Stralkova R, Podesvova J, et al. The relationship between redox potential and nitrification under different sequences of crop rotations [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 77(1):25-33.

[13] Pett-ridge J, Firestone M K. Redox fluctuation structures microbial communities in a wet tropical soil. [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(11):6998-7007.

[14] Unger I M, Motavalli P P, Muzika R M. Changes in soil chemical properties with flooding: A field laboratory approach [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 131(1):105-110.

[15] Grable A R. Soil aeration and plant growth [J]. *Advances in Agronomy*, 1966, 18:57-106.

[16] Torabi M, Midmore d J, Walsh K B, et al. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygenation [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4):621-630.

[17] 雷宏军,臧明,张振华,等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014,30(22): 63-69.

[18] 雷宏军,杨宏光,冯凯,等. 循环曝气灌溉条件下小白菜生长及水分与养分利用 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11):13-18.

[19] 程峰,姚帮松,肖卫华,等. 不同增氧滴灌方式对香芹生长特性的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3):91-94.

[20] 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*, 2015, 144(3):285-298.

[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(8): 51-61.

[22] 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.

[23] 刘鑫,刘智远,雷宏军,等. 不同增氧滴灌方式春小麦生长及产量比较 [J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(9):813-819.

- [24] Smith K A. Soil Aeration [J]. Soil Science, 1977, 123(5):284-291.
- [25] Niu W, Guo Q, Zhou X, et al. Effect of aeration and soil water redistribution on the air permeability under subsurface drip irrigation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3):815-820.
- [26] Lei H, Bhattarai S, Balsys R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems [J]. Irrigation Science, 2016, 34(6):1-10.
- [27] 刘朵朵, 姚帮松, 张文萍, 等. 根区供氧对滞水油菜生长特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3):128-130.
- [28] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):140-146.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Li Y, Niu W, Wang J, et al. Effects of Artificial Soil Aeration Volume and Frequency on Soil Enzyme Activity and Microbial Abundance when Cultivating Greenhouse Tomato [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5):1208-1221.
- [32] 易晓华, 何华, 金静. 土壤水分和膜下增氧对番茄根际土壤微生物量的影响[J]. 北方园艺, 2015, (21):172-177.
- [33] Thomson C J, Armstrong W, Waters I, et al. Aerenchyma formation and associated oxygen movement in seminal and nodal roots of wheat [J]. Plant Cell & Environment, 1990, 13(4):395-403.
- [34] Sojka R E. Measurement of root porosity (volume of root air space) [J]. Environmental & Experimental Botany, 1988, 28(4):275-280.
- [35] Drew M C. Sensing soil oxygen [J]. Plant Cell & Environment, 2006, 13(7):681-693.
- [36] Pendergast L, Bhattarai S P, Midmore D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertisol [J]. Crop & Pasture Science, 2013, 64(11):1171-1181.
- [37] 臧明, 雷宏军, 潘红卫, 等. 增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23):109-118.

(上接第15页)

#### 参考文献:

- [1] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊, 2006, (04): 320-324.
- [2] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2001, (05):433-438.
- [3] Chen L D, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective [J]. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4):389-403.
- [4] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1):14-22.
- [5] 吴普特, 汪有科, 韩宇平, 等. 孟岔生态型现代农业发展模式创建与启示[J]. 中国发展观察, 2008, (11): 53-55.
- [6] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. 土壤学报, 2004, 41(01):1-6.
- [7] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学, 1996, (01):78-85.
- [8] 杨文治, 马玉玺, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(01):1-9.
- [9] 马建鹏, 董建国, 汪有科, 等. 黄土丘陵区枣林地土壤水分时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(07):851-859.
- [10] 靳姗姗. 典型覆盖措施对黄土丘陵旱林土壤水分循环的影响[D]. 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
- [11] 白一茹. 黄土丘陵区枣林土壤性质时空特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [12] 蔺君. 黄土丘陵沟壑区竹节式聚水沟水分特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [13] 李虹辰, 赵西宁, 高晓东, 王莱文, 史银光. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(08):2297-2303.
- [14] 魏新光, 陈滇豫, Liu Shouyang, 等. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):194-202.
- [15] 聂真义. 黄土丘陵区枣树修剪对其蒸腾及林地水分的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [16] 苏嫻, 焦菊英, 马祥华. 黄土丘陵沟壑区主要群落地上生物量季节变化及其与土壤水分的关系[J]. 水土保持研究, 2012, 19(06):7-12.
- [17] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(08):1640-1647.
- [18] 赵英, 汪有科, 韩立新, 等. 山地枣树茎直径对不同生态因子的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(17):5476-5483.
- [19] 余檀, 汪有科, 高志永, 等. 陕北黄土丘陵山地枣树生物量模型[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3):311-316.
- [20] 刘勇, 上官周平. 子午岭森林群落土壤水分与生物量关系研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(05):150-154.
- [21] 刘晓丽, 汪有科, 马理辉, 等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报, 2013, 44(07):90-97.
- [22] 魏新光, 王铁良, 刘守阳, 等. 种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(07):171-180.
- [23] Misson L. Influences of canopy photosynthesis and summer rain pulses on root dynamics and soil respiration in a young ponderosa forest[J]. Tree Physiology, 2006, 26(7):833-844.
- [24] 白岗栓, 杜社妮, 侯喜录. 不同修剪措施对苹果幼树生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(01):91-95.
- [25] Ma L H, Liu X L, Wang Y K, et al. Effects of drip irrigation on deep root distribution, rooting depth, and soil water profile of jujube in a semiarid region[J]. Plant and Soil, 2013, 373(12):995-1006.
- [26] 卫新东, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):88-97.