文章编号:1000-7601(2020)01-0183-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.24

加气灌溉对根区土壤肥力质量与作物生长的影响

曹雪松[1],李和平[1],郑和祥[1],冯亚阳[2],陈志忠[3],赵清虎[4]

(1.中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020; 2.内蒙古农业大学,内蒙古 呼和浩特 010018;
3.内蒙古河套灌区永济灌域管理局永济试验站,内蒙古 临河 015000;4.河南省鹤壁水文水资源勘测局,河南 鹤壁 458000)

摘 要:水、肥、气、热、光是保障作物生长发育的五大要素,传统的灌溉方式不但用水量大,还会导致土壤通气性不足、团粒结构破坏,五要素之间的平衡被打破,造成土壤板结、盐碱化等土壤退化现象,从而土壤肥力质量下降,对作物生长发育造成不利影响。综述了加气灌溉研究背景、加气灌溉条件下土壤肥力质量评价指标、加气灌溉对土壤和土壤肥力质量的影响、加气灌溉对作物生长的影响,总结了加气灌溉对土壤微环境、酶环境、营养环境和作物根系的影响规律以及加气灌溉对土壤微环境和作物根系的调节机理。大量研究表明,加气灌溉能够有效改善根区土壤结构和水力学特性,增强作物根区土壤通透性,明显增加作物根区土壤中细菌、真菌和放线菌的数量,提高土壤中过氧化氢酶与脲酶活性,改善作物根区土壤微环境;加气灌溉可以增加土壤中速效氮和速效磷的含量,提高土壤肥力质量,促进根系对营养物质的吸收和作物的生长发育,提高灌溉水利用效率,作物增产高达 10%以上。最后总结了现阶段加气灌溉还存在加气设备研发、加气时间与频次问题以及加气灌溉对土壤、微生物、作物根系、生态环境等的影响机制问题,提出了目前加气灌溉处于定量研究的探索阶段,还需要对加气灌溉中水-土-气-作物的耦合机制进一步开展研究。

关键词:加气灌溉;低氧胁迫;根区土壤肥力;作物生长

中图分类号:S274 **文献标志码**:A

Effect of aerated irrigation on crop growth and soil fertility quality in root zone

CAO Xuesong[1], LI Heping[1], ZHENG Hexiang[1], FENG Yayang[2], CHEN Zhizhong[3], ZHAO Qinghu[4]

(1. *Institute of Water Resources for Pastoral Area of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Huhhot*, *Inner Mongolia* 010020, *China*;
2. *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot*, *Inner Mongolia* 010018, *China*;
3. *Yongji Administration Bureau Experimend Station*, *Linhe*, *inner Mongolia* 015000;
4. *HeBi Hydrology and Water Resources Survey Bureau*, *HeBi*, *Henan* 458000, *China*)

Abstract: Water, fertilizer, gas, heat and light are the five key factors to ensure the growth and development of crops. The traditional irrigation method not only consumes a lot of water, but also leads to insufficient soil aeration, destruction of the aggregate structure, and the balance between the five elements is broken. Soil degradation, such as soil compaction and salinization, causes soil fertility to decline, which adversely affects crop growth and development. This paper reviews the research background of aerated irrigation, the evaluation index of soil fertility quality under aerated irrigation conditions, the effect of aerated irrigation on soil and soil fertility quality, the effect of aerated irrigation on crop growth, and summarizes the effects of aerated irrigation on soil microenvironment, enzyme environment, nutrition environment and crop root system, and the regulation mechanism of aerated irrigation on soil microenvironment and crop root system. Numerous studies have shown that aerated irrigation can effectively

收稿日期:2018-12-10 **修回日期**:2019-04-20

基金项目:中国水利水电科学研究院科研专项项目(MK2018J05);国家青年科学基金项目(41901052,51609153);国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFC040320504);内蒙古自治区自然基金(2019MS05001)

作者简介:曹雪松(1989-),男,河南商丘人,硕士,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:cxsmks@126.com

通信作者:李和平(1963-),男,内蒙古呼和浩特人,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事水资源高效利用及节水灌溉理论与技术研究。E-mail:mkslhp@163.com

improve the soil structure and hydraulic characteristics of the root zone, enhance the soil permeability of the crop root zone, significantly increase the number of bacteria, fungi and actinomycetes in the root zone of the crop, and increase the hydrogen peroxide in the soil. Enzyme and urease activities improve soil micro-environment in crop root zone, and aerated irrigation can increase the content of available nitrogen and available phosphorus in soil, improve soil fertility quality, promote nutrient absorption and crop growth and development of roots, and improve irrigation water utilization efficiency, crop yield increased by more than 10%. Finally, it is concluded that there are still problems in the research and development of gas filling equipment, the time and frequency of gas filling, and the influence mechanism of aerated irrigation on soil, microorganisms, crop roots, ecological environment, etc. In the exploration stage of quantitative research, it is necessary to further study the coupling mechanism of water-soil-gas-crop in aerated irrigation, in order to provide theoretical basis for future research.

Keywords: aerated irrigation; hypoxic stress; soil fertility in root zone; crop growth

植物的正常生长发育离不开 O_2,有了 O_2 植物的根系才能维持正常的呼吸作用,发挥其吸收营养物质和水分的功能。作物根系的呼吸作用不但为植物生命活动供给能源,而且呼吸作用的中间代谢产物还为植物的物质合成提供了必需的原料[1]。然而,洪涝灾害、一次性灌水过多、土壤板结以及无土栽培等都极易使得植物根系供氧不足,导致作物出现低氧胁迫。低氧胁迫是由于土壤紧实或者地下水位较高或者不合理灌溉导致的土壤或营养液通气性不畅,作物根系及微生物呼吸作用减弱,使作物呼吸作用和生长发育表现异常的现象[2]。低氧胁迫已经成为影响植物正常生长发育的重要逆境因子之一,而由于水分过多引起的水涝型低氧胁迫表现得尤为突出,同时土壤中水分过多还会破坏土壤团粒结构,造成土壤板结、土壤盐碱化等土壤退化现象。低氧胁迫对植物的危害很大:一是可以改变植物的呼吸代谢途径(有氧呼吸受到抑制,植物需要通过无氧呼吸途径产生的部分能量来维持生命活动);二是增加土壤中的还原性毒害物质(H_2S以及铁、锌、铜、钙形成的不溶性亚硫酸化合物等);三是使植物对水分的吸收减少,对矿物质元素的吸收失衡;四是使植物体内的激素代谢紊乱。加气灌溉能改善土体中固(土壤颗粒)、液(土壤水)、气(土壤气体)三相比例和土壤湿润体的通透性,可有效调节土壤微生物活性、土壤酶活性、土壤养分的有效性、土壤酸碱性及土壤的氧化还原反应等土壤微环境,进而改善土壤性状,提高土壤生产力,从而提高作物根系对土壤养分、水分的吸收能力,促进作物自身的新陈代谢及整个植株的生长发育。

国内外学者在加气灌溉对作物产量及品质的影响、加气方法、加气对土壤与作物的影响机理等方面进行了诸多研究,并取得了一定的研究成果。笔者综述了加气灌溉研究背景、加气灌溉条件下土壤肥力质量评价指标、加气灌溉对土壤和土壤肥力质量的影响、加气灌溉对作物生长的影响、加气灌溉提高作物产量和品质的机理,总结了加气灌溉研究中存在的问题,提出了加气灌溉理论与技术的研究展望,以期为今后的研究提供参考。

1 加气灌溉研究背景

加气灌溉(Aerated irrigation)是由澳大利亚昆士兰中心大学 David Midmore 和詹姆士库克大学的苏宁虎教授提出的一种极为节水的新技术[3]。加气灌溉是以水为载体,利用地下滴灌技术,通过加气设备将空气或纯氧溶解在灌溉水中,以水气混合液和微型气泡的形式随灌溉水输送到作物根区土壤,向根区通气,从而解决作物根区微环境的缺氧情况,满足作物根系有氧呼吸和土壤中微生物对 O_2 的需求。研究表明,地下滴灌技术能更好地提高灌溉水分利用效率,且能减小对环境的不利影响[4],使表层土壤的蒸发减小,因此水分流失可忽略[5-6],而且滴头附近的根部优先生长,提高了作物的水分可利用性[7]。但是,地下滴灌过程中土壤水分入渗将土壤空气驱逐开来,导致土壤出现周期性的滞水现象[8-9],造成土壤通气性下降[10]。而作物根系对土壤缺氧特别敏感,根际缺氧会直接抑制作物对土壤中水分和养分的吸收[11],影响作物的正常生长。而长时间进行地下滴灌还会影响滴头附近的土壤结构和水力学特性,限制作物根区 O_2 扩散,而扩散又是土壤和大气以及土壤和作物根系气体交换的主要体制[12],进而影响根系的呼吸作用。而且地下滴灌灌水初期,滴头附近土壤含水率急速接近饱和,与周围临近土壤形成较大的水势梯度,驱使土壤水快速扩散,形成一个由内到外含水率逐渐减小的湿润体。在滴灌过程中,由于稳定的水源供给,湿润体内土壤含水率普遍较高。在滴灌入渗过程

中，随着湿润体的不断扩展，土壤空隙中充满水，含水率增大，土壤中的空气被排出，土壤透气性迅速减弱。灌水停止后，土壤水分在自身重力、吸力梯度的作用下会继续向外作扩散运动。湿润体内部土壤含水率随时间的延长而减少，土壤通透性有所改善，但土壤湿润体核心区即作物根系主要分布区的土壤含水率仍较高，使得根区土壤多处于还原状态，因此降低了土壤孔隙中 O_2 的可利用性和移动性，更加剧了作物根区土壤 O_2 含量降低的趋势[10]。

加气灌溉作为地下滴灌系统的改进和发展，通过向作物根区直接输送水分和 O_2，改变了土壤的缺氧状态。已被大量研究证实：加气灌溉能提高土壤导气率，改善土壤氧环境，显著提高作物根区土壤呼吸速率，使根系有氧呼吸顺利进行，促进作物的生长，提高作物产量，改善作物品质，提高水分利用效率，保障土壤微生物活动，提高土壤酶活性等，显示出其在解决因灌水、土壤紧实等导致的根区缺氧问题方面的潜力[13-19]。其机理是促进作物地上部光合作用及光合产物的积累与运转、促进根系生长发育及对土壤矿物质元素的吸收和增加土壤微生物群落多样性及酶活性。但是加气灌溉过程中水气传输不均匀会导致大量气泡从滴头附近向大气散失[20]，因此如何将空气或 O_2 以超微气泡的形式均匀地输送到作物根区，是决定加气灌溉能否大范围推广的关键。

2 加气灌溉对土壤肥力质量的影响

土壤是地球陆地上能够生长绿色植物的疏松表层。20 世纪 90 年代中期，科研工作者开始用“土壤质量”评价土壤的健康状况。土壤质量是综合表征土壤维持生产力、环境净化能力以及保障动植物健康而不发生土壤退化及其他生态环境问题的能力，简单来说就是土壤的一种运行能力。土壤质量评价指标通常包括物理指标、化学指标和生物指标，各项指标的不同取值组合决定了土壤质量的状况。Larson W E 和 Pierce F J[21] 提出评价土壤质量的最小数据集，最小数据集中参数的选择基于它们对土壤质量控制的能力。Doran J W[22] 提出的土壤质量指标体系（表 1），满足了大多数农业生产下对显示土壤质量状况的需要。

土壤之所以能生长绿色植物，是由于它具有一种独特的本质属性——土壤肥力。土壤肥力是指土壤能够满足作物生长发育所必需的水分、养分、空气、热量的能力。土壤肥力的高低主要取决于土壤水分、养分、空气和温度及其在一定条件下的协调程度。

表 1 土壤质量指标体系

Table 1 Soil quality index system

土壤质量指标 Soil quality index	土壤质量指标体系 Soil quality index system
物理指标 Physical index	土壤质地、土壤表土和根层深度、土壤容重、土壤渗透性、土壤持水性（水分特征曲线） Soil texture, soil topsoil and root depth, soil bulk density, soil permeability, soil water characteristic curve
化学指标 Chemical index	土壤有机质（总 C、总 N）、pH 值、电导率、可释放 N、可释放 P、可释放 K Soil organic matter (total C, total N), pH, soil conductivity, soil releasable N, soil releasable P, soil releasable K
生物指标 Biological indicators	生物量、潜在矿化 N、土壤呼吸、土壤水分含量、土壤温度、土壤酶活性 Biomass, potential mineralized N, soil respiration, soil moisture content, soil temperature, soil enzyme activity

水利是农业的命脉，作物的生长发育、土壤微生物的活动以及土壤养分的分解和转化都需要大量的水，同时还可以通过控制土壤水分来协调土壤养分、空气和温度，使土壤肥力达到满足作物生长发育的最佳效果。土壤空气和土壤温度则对土壤水分的蒸发与运动、土壤微生物活动、土壤各种养分的转化、作物根系的发育有密切关系。土壤作为作物生长发育的基质，其中的通气状况直接影响到作物根系的呼吸作用及根区有机质的分解，进而影响作物根系的生长。大量研究表明，加气灌溉能提高土壤中 O_2 含量，提高土壤呼吸强度，从而促进土壤微生物分解，使得动植物和自身的残体以及根际分泌物等有机 C、N 矿化释放到土壤中，或固定于土壤微生物自身体内，推动土壤肥力质量化学循环的运行，进而维系作物生长对土壤养分的需求[23]。土壤微生物既是土壤肥力质量的供应源又是其储存库，土壤微生物参与有机物的分解及营养物质的转化，在养分转化中起到枢纽作用，对土壤肥力质量的保持起着重要的作用。一般土壤表层的微生物数量最多，随着土层加深，微生物数量减少，这是因为土壤表层的通气状况良好，土壤表面的温度较高，有利于土壤微生物的活动与繁殖[24]。张成娥等[25]研究表明土壤微生物数量、C 与 N 量、呼吸强度及生理活性，在根际、近根际土壤大于整个土体，并随着土壤深度的加深而降低。Payero 等[26] 研究表明充分灌溉后作物根区 O_2 浓度降低，影响作物根系呼吸，作物产量反而下降。朱艳等[27] 研究得出，加气灌溉下土壤微生物呼吸增大了 11.5%（$P<0.05$），土壤和植物根系呼吸增大了 25.5% 和 38.8%（$P<0.05$），说明加气灌溉通过调控土壤水气配合条件，促进了土壤、土壤微生物和植物根系呼吸，有效改

善了土壤通气性。陈慧等[28]研究了加气灌溉条件下土壤 N_2O 排放对硝化与反硝化细菌数量的响应,结果表明,不同灌水定额的加气灌溉处理能够增加土壤 N_2O 排放,平均增加了4.7%,且随着灌水量的增加,土壤 N_2O 排放也在增加,平均增加了1.9%。赵丰云等[29]研究了加气灌溉对干旱区葡萄根区土壤细菌群落结构的影响,研究结果表明加气灌溉可以增加放线菌门和硝化螺旋菌门的丰度,且在40~50 cm土层加气处理放线菌门和硝化螺旋菌门比未加气处理高16.7%和22.7%。雷宏军等[30]研究了番茄地土壤 N_2O 排放量对水肥气耦合滴灌的响应,结果表明曝气条件下 N_2O 排放总量较对照平均增加35.16%。

综上所述,加气灌溉不但可以增加土壤中 O_2 浓度,提高水分利用效率,激活土壤中微生物活性,降低作物对化学肥料的依赖性,同时还能改善土体中固(土壤颗粒)、液(土壤水)、气(土壤气体)三相比例,增加土壤湿润体的通透性,精确调控根际生长微环境,是土壤氧化还原状况[31-32]、微生物活性[33]、养分存在形态(有效性)及温室气体(CH_4 和 N_2O)排放[34-36]的重要影响因子,对土壤肥力质量、生物活性及土壤质量评价有重要的意义。加气灌溉影响土壤湿润体的通透性,土壤的透气状况与土壤质地、结构、渗透性、生物量及酶活性等参数指标紧密相关,故加气灌溉对土壤肥力质量有一定的影响作用。

3 加气灌溉对作物生长的影响及增产机理

3.1 加气灌溉对作物生长的影响

水、肥、气、热、光作为植物生长发育的5大外部因素,共同调控着作物的生长发育。长期以来,研究的重点主要为水、肥调控对作物生长发育的影响,对气的研究较少。为此,水气结合的灌溉方式(加气灌溉)成为了新的研究课题。Bhattarai 等[37]首次报道了加气灌溉可以提高灌溉效率和作物产量。Abuarab M 等[17]研究表明,相较于地下滴灌,加气灌溉下玉米产量分别提高12.27%(2010)和12.5%(2011),水分利用效率和灌溉水分利用效率均最大,且与对照存在显著性差异;加气灌溉下IWUE分别为1.096 kg·m^{-3}(2010)和1.112 kg·m^{-3}(2011),而地下滴灌IWUE分别为0.911 kg·m^{-3}(2010)和0.922 kg·m^{-3}(2011)。Ben-Noah I 等[38]研究表明加气灌溉可以大幅度增加辣椒的数量、单重和产量。Li Y 等[39]研究得出曝气灌溉能显著增加番茄的果实数量、宽度和长度、产量、维生素C及番茄红素量。Pendergast L 等[40]研究得出在地下滴灌灌溉水体中注入12%的空气可以提高鹰嘴豆产量27%(2006)和10%(2007)。Abuarab M E 等[41]研究得出加气灌溉改善作物的生长环境,从而提高水分生产率与作物的产量和质量。邱莉萍等[42]研究表明根际通气状况对土壤养分的转化有很大影响。卢泽华等[43]研究得出番茄不同生育期对根际加气的响应不同,坐果期进行加气效果最佳。李云开等[44]研究得出微纳米气泡爆炸时的能量可以完成污染物的氧化降解和水质净化作用,将微纳米气泡装置安装于滴灌系统末端,不仅可以改善根区的土壤气体含量,防止根区产生低氧胁迫,而且可以净化再生水水质,灭杀再生水中的微生物和灌水器附生生物膜中的微生物,进而降低灌水器堵塞程度。朱练峰[45]以水稻为研究对象,发现微纳米气泡水加气在生育前期提高了秀水09、国稻6号和两优培九的分蘖成穗率和有效穗数,齐穗期提高了剑叶光合能力、灌浆期延缓了叶片衰老进而提高了水稻产量。温改娟等[46]研究表明,加气灌溉的番茄株高较不加气灌溉增加1.44%、茎粗增加3.02%、产量增加19.49%,并且品质明显优于不加气处理。张敏[47]研究表明,在作物水分适度亏缺条件下,加气灌溉能提高甜瓜可溶性糖含量。周云鹏等[48]研究了微纳米气泡加气质量浓度对水培蔬菜生长与品质指标的影响,研究表明水培蔬菜的质量随加气质量浓度的升高呈先增加后减少的趋势,而根长随加气质量浓度的升高呈递增趋势,水培蔬菜适宜的加气灌溉质量浓度为10~20 mg·L^{-1}。赵丰云等[49]研究表明,地下滴灌根际加气可促进葡萄新梢和茎粗增加,显著提高葡萄新梢、细根等植株干物质量的积累。杜娅丹等[50]研究表明加气灌溉可提高作物产量、水分利用效率(总平均值分别提高19.3%和17.9%)。雷宏军等[51]研究了不同土壤条件下增氧灌溉方式对作物生长、产量及养分利用的影响,结果表明曝气地下滴灌对紫茄生长、水分和养分利用的促进作用较为显著,且不同土壤类型下曝气地下滴灌对砂壤土紫茄产量增产及水分利用效率提升效果最优。综上所述,加气灌溉对作物产量、品质有一定的影响,但影响程度的大小也受土壤条件、作物种类及土壤水分状况等因素的影响。

3.2 加气灌溉条件下作物增产机理

产量是水、肥、气、热、光共同作用于作物的外在表现,产量最大化是农民追求的最终目标。加气灌溉在一定程度上能够增加作物产量,国内外学者

也对加气灌溉条件下作物增产机理进行了初步研究。加气灌溉影响土壤微生物群落多样性,进而影响酶活性[52-53]。过氧化氢酶和脱氢酶的活性对土壤通气状况最为敏感,故常用来表征土壤通气状况的变化[54]。Jenkins K B 等[55]和 Greenway H 等[56]研究得出,微纳米气泡技术能够提高土壤微生物活性。Nosalewicz A 等[57]研究表明,土壤在通气不良的情况下,脱氢酶活性增大。李元等[58]利用空气压缩机向根系供气,研究了加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响,研究结果表明加气灌溉对土壤酶活性、土壤微生物数量均有显著影响。尹晓霞等[59]通过加气灌溉对温室番茄根区土壤环境及产量的影响研究发现,加气灌溉能够明显增加土壤中 O_2含量,改善土壤呼吸功能,使得土壤中的好氧性微生物(细菌、真菌和放线菌)数量显著增加,根区 O_2相对充足,从而促进了番茄根系的生长。陈慧等[28]研究了加气灌溉对设施番茄地硝化/反硝化细菌数量的影响,结果表明加气较不加气处理增加了土壤硝化细菌数量,平均增加了 2.1%,但加气灌溉减小了土壤反硝化细菌数量,平均降低了 9.7%($P>0.05$)。杜娅丹等[60]研究表明加气灌溉可有效改善土壤生物环境,提高 N 利用率,并将更多 N 转移至干物质。

加气灌溉通过改善土壤的通透性,进而促进作物根系生长发育及对土壤矿质营养元素的吸收利用,促进作物地上部分光合作用及光合产物的运转和积累,最终达到提高产量和品质的目的。当土壤 CO_2浓度相对较高,而 O_2浓度相对较低时,将会限制作物根系呼吸作用,从而影响根系正常生理机能和植物的生长发育,进而影响其产量和品质,这一点已得到一些试验的证实。在根系有氧呼吸过程中,O_2参与了合成三磷酸腺苷(ATP)的化学反应,然而,如果根区 CO_2浓度很高,就阻碍了根系的有氧呼吸,影响了体内一些化学反应的正常进行[61]。徐欢欢[62]研究结果表明,对大棚秋黄瓜通 O_2进行处理,黄瓜根系的生长、坐果率及叶片光合速率都有所提高。史春余等[63]研究得出,改善土壤通气性可增加功能叶片三磷酸腺苷(ATP)含量、提高功能叶片 ATP 酶活性,促进^{14}C 同化物由叶片向块根的运转和分配。郭超等[64]研究认为,通气提高玉米根系活力,促进其对土壤矿质元素的吸收和利用。李元等[65]研究了不同土壤加气量与加气深度组合对番茄光合作用、叶绿素含量、干物质积累及产量的影响,结果表明对番茄根区土壤加气可显著提高叶片叶绿素含量和气孔导度,增强光合作用,增加干物质积累及产量;且随加气量的升高,大棚番茄净光合速率总体上呈先升高后降低的趋势。朱艳等[66]研究了加气灌溉下土壤参数对土壤呼吸的影响,结果表明加气灌溉下土壤呼吸速率和土壤 O_2含量与对照差异显著,分别提高了 33.16%和 16.61%。这是因为加气灌溉下 O_2充足,能够促进根系有氧呼吸及好氧微生物的活动,土壤有机质迅速分解,加快矿质化,使得土壤中的有效养分能够得到充分的供应,从而有利于作物根系的吸收以及作物根尖细胞分裂、根系生长和吸水面积的扩大。但如果土壤中 CO_2浓度相对过高或 O_2相对不足,则作物根系呼吸减弱,根系生长发育受到抑制,能量释放减少,从而阻碍根系对营养物质的吸收、利用及代谢,这不但会影响根压的产生和根系吸水,而且还会因无氧呼吸累积过多的酒精而使根系中毒受伤,甚至引起作物死亡。

通过对作物根区进行加气灌溉补充 O_2来解决土壤 O_2不足的问题,一直是生产者和研究者所关注的问题,加气灌溉技术也被大量研究证实能改善土壤通气性,对作物产量、品质及水分利用效率等产生积极影响。目前,加气灌溉条件下作物增产机理研究还处于起步阶段,今后可进一步采用基因技术、分子生物学技术等手段开展加气灌溉对土壤微生物作用机制、作物生长机制的研究,能更直观地反映出加气灌溉对土壤肥力质量与作物的影响,丰富加气灌溉研究成果。

4　加气灌溉研究存在问题与展望

4.1　存在问题

目前,对加气灌溉的“定量研究”还处于探索阶段,虽然已取得了一定的科研成果,但仍有不少问题需要进一步研究:(1)不同的加气设备和加气模式对作物的加气效果;(2)加气灌溉的有关气体利用率;(3)加气灌溉对特定作物及其根际土壤微环境的影响机制;(4)加气灌溉对土壤呼吸、微生物数量、土壤酶活性、有机碳矿化等的影响机制;(5)加气灌溉对土壤环境与生态环境的影响;(6)加气灌溉对作物增产的微生物学机制与机理;(7)加气灌溉条件下水气交互作用影响。

4.2　研究展望

针对加气灌溉方面的研究目前还处于基础阶段,随着加气灌溉技术的日趋成熟,加气灌溉的推广应用将为水资源短缺和粮食安全保障提供解决方案。未来的研究还应针对以下几个方面开展:(1)大田自然条件下特定作物加气灌溉研究;(2)针

对不同区域、不同作物的加气灌溉研究；(3)为了提高加气灌溉效率，应针对特定作物开展加气灌溉的适宜加气方式、加气时间、加气频率与加气量的研究；(4)加气灌溉与作物施肥等农田管理措施相结合，提高土壤肥力质量等相关研究；(5)为扩大加气灌溉的推广力度，应开展有关性能优良、实用性强的加气滴灌系统的研发；(6)为使加气灌溉中气泡不从灌溉水中溢出，需要开展气泡粒径大小对加气灌溉效率的影响研究以及最适宜粒径的气泡发生装置的研发等；(7)深化研究加气灌溉条件下水气耦合作用、农田环境水分和养分的环境效应；(8)加气灌溉对土壤生物群落和土壤理化性质长效的作用机制研究；(9)加气灌溉中水-土-气-作物的耦合机制研究。

参 考 文 献：

[1] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming[J]. The New Phytologist, 2000, 147(1): 141-154.

[2] 汪天, 王素平, 郭世荣,等. 植物低氧胁迫伤害与适应机理的研究进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(4): 847-853.

[3] Su N. Generalisation of various hydrological and environmental transport models using the Fokker-Planck equation[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(4): 345-356.

[4] 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.

[5] Phene C J, Davis K R, Hutmacher R B, et al. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn[J]. Irrigation Science, 1991, 12(3): 135-140.

[6] Phene C J, Hutmacher R B, Ayars J E, et al. Maximizing water use efficiency with subsurface drip irrigation[J]. Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA), 1992,7:21-24.

[7] Machado R M A, Do Rosário M, Oliveira G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation[C]//Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 333-341.

[8] Dhungel J, Bhattarai S P, Midmore D J. Aerated water irrigation (oxygation) benefits to pineapple yield, water use efficiency and crop health[J]. Advances in Horticultural Science, 2012, 26(1): 3-16.

[9] Su N, Midmore D J. Two-phase flow of water and air during aerated subsurface drip irrigation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(3): 158-165.

[10] 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]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(4): 631-635.

[11] 陈新明. 加氧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.

[12] Friedman S P, Naftaliev B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 132-147.

[13] Niu W Q, Fan W T, Persaud N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. Pedosphere, 2013, 23(6): 790-798.

[14] 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.

[15] Chen X, Dhungel J, Bhattarai S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 4(4): 236-248.

[16] 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.

[17] 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(6): 493-499.

[18] Huber S. New uses for drip irrigation—partial root zone drying and forced aeration [D]. Muchen, Germany: Technische Universitat Munchen, MSc, 2000.

[19] Niu W Q, Guo Q, Zhou X B, 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.

[20] Goorahoo D, Carstensen G, Zoldoske D F, et al. Using air in subsurface drip irrigation(SDI) to increase yields in bell peppers[J]. International Water and Irrigation, 2002, 22(2): 39-42.

[21] Larson W E, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management[J]. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, 1994, 35: 37-51.

[22] Doran J W. Defining soil quality for sustainable environment[M]. Wisconsin, US: Soil Science Society of America,1994.

[23] Hopkins D W. Biological diversity and function in soils[M]. England: Cambridge University Press,2005.

[24] 谢龙莲, 陈秋波, 王真辉,等. 环境变化对土壤微生物的影响[J]. 热带农业科学, 2004, 24(3): 39-47.

[25] 张成娥, 陈小莉, 郑粉莉. 子午岭林区不同环境土壤微生物生物量与肥力关系研究[J]. 生态学报, 1996, 18(2): 218-222.

[26] Payero J O, Tarkalson D D, Irmak S, et al. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(8): 895-908.

[27] 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.

[28] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰,等. 加气条件下土壤 N_2O 排放对硝化/反硝化细菌数量的响应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 303-311.

[29] 赵丰云, 杨湘, 董明明,等. 加气灌溉改善干旱区葡萄根际土壤化学特性及细菌群落结构.[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 119-126.

[30] 雷宏军, 杨宏光, 刘欢,等. 水肥气耦合滴灌番茄地土壤 N_2O 排放特征及影响因素研究.[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 95-104.

[31] 蔡祖聪. 土壤质地. 温度和Eh对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学

报, 1998, 35(2): 145-154.

[32] 姜军, 徐仁扣, 潘经健,等. 宜兴乌栅土干湿交替过程中土壤 pH 与 Eh 的动态变化及原因初探[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 218-223.

[33] 郑有飞, 石春红, 吴芳芳,等. 土壤微生物活性影响因子的研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1209-1214.

[34] 孙英杰, 吴昊, 王亚楠. 硝化反硝化过程中 N_2O 释放影响因素[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 384-388.

[35] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰,等. 稻田 CH_4和 N_2O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 270-274.

[36] 张晓艳, 张广斌, 纪洋,等. 冬季淹水稻田 CH_4产生、氧化和排放规律及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2011, 19(11): 2540-2545.

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

[38] 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.

[39] Li Y, Niu W Q, Dyck M, et al. Yields and nutritional of greenhouse tomato in response to different soil aeration volume at two depths of subsurface drip irrigation[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-10.

[40] Pendergast L, Bhattarai S P, Midmore D J. Evaluation of aerated subsurface drip irrigation on yield, dry weight partitioning and water use efficiency of a broad-acre chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a vertosol[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 38-46.

[41] Abuarab M E, El-Mogy M M, Hassan A M, et al. The effects of root aeration and different soil conditioners on the nutritional values, yield, and water productivity of potato in clay loam soil[J]. Agronomy, 2019, 9(8): 418-434.

[42] 邱莉萍, 刘军, 王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(3):277-280.

[43] 卢泽华, 蔡焕杰,王健,等. 不同生育时期根际加气对温室番茄生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1330-1337.

[44] 李云开, 宋鹏, 周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J].农业工程学报,2013,29(15):98-107.

[45] 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.

[46] 温改娟, 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.

[47] 张敏. 加气灌溉条件下温室甜瓜生长效应的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2011.

[48] 周云鹏, 徐飞鹏, 刘秀娟,等. 微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 98-100.

[49] 赵丰云, 郁松林, 孙军利,等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 228-234.

[50] Du Y D, Niu W Q, Gu X B, et al. Crop yield and water use efficiency under aerated irrigation: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210(26): 158-164.

[51] 雷宏军, 王露阳, 潘红卫,等. 紫茄生长及养分利用对增氧地下滴灌的响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 8-14.

[52] Jezierska-Tys S, Frac M. Impact of dairy sewage sludge on enzymatic activity and inorganic nitrogen concentrations in the soils[J]. Int. Agrophys, 2009, 23(1): 31-37.

[53] Fraser D G, Doran J W, Sahs W W, et al. Soil microbial populations and activities under conventional and organic management [J]. Journal of Environmental Quality, 1988, 17(4): 585-590.

[54] Singh D K, Kumar S. Nitrate reductase, arginine deaminase, urease and dehydrogenase activities in natural soil (ridges with forest) and in cotton soil after acetamiprid treatments[J]. Chemosphere, 2008, 71(3): 412-418.

[55] Jenkins K B, Michelsen D L, Novak J T. Application of oxygen microbubbles for in situ biodegradation of p-xylene-contaminated groundwater in a soil column[J]. Biotechnology Progress, 1993, 9(4): 394-400.

[56] Greenway H, Armstrong W, Colmer T D. Conditions leading to high CO_2(>5 kPa) in waterlogged-flooded soils and possible effects on root growth and metabolism[J]. Annals of Botany, 2006, 98(1): 9-32.

[57] Nosalewicz A, Nosalewicz M, Others. Effect of soil compaction on dehydrogenase activity in bulk soil and rhizosphere[J]. Int. Agrophys, 2011, 25: 47-51.

[58] 李元, 牛文全, 张明智,等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 121-129.

[59] 尹晓霞. 加气灌溉对温室番茄根区土壤环境及产量的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2014.

[60] Du Y, Niu W Q, Zhang Q, et al. Effects of nitrogen on soil microbial abundance, enzyme activity, and nitrogen use efficiency in greenhouse celery under aerated irrigation[J]. Soil Sci Soc Am J, 2018, 82(3): 606-613.

[61] Bertrand A, Castonguay Y, Nadeau P, et al. Oxygen deficiency affects carbohydrate reserves in overwintering forage crops[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(388): 1721-1730.

[62] 徐欢欢. 增氧灌溉对大棚秋黄瓜生长的影响[D]. 长沙, 湖南农业大学,2012.

[63] 史春余, 王振林, 余松烈. 土壤通气性对甘薯产量的影响及其生理机制[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2): 173-178.

[64] 郭超, 牛文全. 根际通气对盆栽玉米生长与根系活力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1194-1198.

[65] 李元, 牛文全, 吕望,等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累.[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 125-132.

[66] 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.