

基于加气水滴灌的土壤环境调节机理研究

杨海军 仵峰 方海平 胡钧 侯铮迟

Mechanism of soil environmental regulation by aerated drip irrigation

Yang Hai-Jun Wu Feng Fang Hai-Ping Hu Jun Hou Zheng-Chi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 019201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181357

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.68.20181357>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2019/V68/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[我国北方不同类型下垫面地表反照率特征](#)

Study on land-surface albedo over different types of underlying surfaces in North China

物理学报.2014, 63(8): 089201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.089201>

[云和降水扰动对黄土高原半干旱草地辐射收支及能量分配的影响](#)

Effects of clouds and precipitation disturbance on the surface radiation budget and energy balance over loess plateau semi-arid grassland in China

物理学报.2013, 62(20): 209201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.209201>

[陇中黄土高原自然植被下垫面陆面过程及其参数对降水波动的气候响应](#)

Responses of the land-surface process and its parameters over the natural vegetation underlying surface of the middle of Gansu in loess plateau to precipitation fluctuation

物理学报.2013, 62(1): 019201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.019201>

[空气热储存、光合作用和土壤垂直水分运动对黄土高原地表能量平衡的影响](#)

The influences of air heat storage, plant photosynthesis and soil water movement on surface energy balance over the loess plateau

物理学报.2012, 61(15): 159201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.159201>

[青藏高原地区土壤湿度的模拟及订正](#)

The simulation and revision of soil moisture over Tibetan Plateau

物理学报.2012, 61(2): 029201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.029201>

专题: 水科学重大关切问题研究

基于加气水滴灌的土壤环境调节机理研究*

杨海军¹⁾ 仵峰^{2)†} 方海平^{1)‡} 胡钧¹⁾ 侯铮迟^{1)††}

1)(中国科学院上海应用物理研究所, 水科学与技术研究室, 中国科学院微观界面物理与探测重点实验室, 上海 201800)

2)(华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046)

(2018年7月15日收到; 2018年12月26日收到修改稿)

土壤是粮食安全、水安全和更广泛的生态系统安全的基础. 我国水资源贫乏, 且分布不均. 传统农业采用大水漫灌方式用水量大, 还会破坏土壤团粒结构, 造成土壤板结、土地盐碱化等土壤退化现象. 地下滴灌技术节水效果明显, 水的有效利用率超过95%; 但也会在一定程度上破坏土壤结构. 研究表明, 使用加气水滴灌不但能增加作物产量, 还能提高作物品质. 本文综述了滴头埋深、加气滴灌频率、灌水量、植物生育期、加气方式与设备等几个因素对加气水滴灌效果的影响, 总结了加气水滴灌对土壤水环境、气环境、微生物环境、营养环境和矿物环境的影响规律, 并提出加气水滴灌对土壤环境的调节机理. 加气水滴灌会改变土壤结构, 其水、气、微生物、营养和矿物质等土壤环境的变化一方面是土壤结构变化的结果, 另一方面又会促进土壤结构的变化. 同步辐射X射线计算机断层扫描的原位实验结果也证实了加气水滴灌能改变土壤的结构.

关键词: 加气水, 滴灌, 土壤环境, 调节

PACS: 92.40.Xx, 89.60.-k

DOI: 10.7498/aps.68.20181357

1 引言

土壤是地球表面的一层疏松的物质, 由各种颗粒状矿物质、有机物质、水分、空气、土壤生物等组成. 土壤中的固(土壤颗粒)、液(土壤水)、气(土壤气体)三相构成了一个矛盾的统一体. 它们互相联系, 互相制约, 为作物提供必需的生活条件, 是土壤肥力的物质基础. 现在, 越来越多的有识之士认为: 土壤是粮食安全、水安全和更广泛的生态系统安全的基础^[1,2]. 因此, 联合国将每年的12月5日定为世界土壤日, 将2015年定为国际土壤年, 以期引起国际社会关注土壤问题.

我国水资源贫乏, 且分布不均. 农业是用水大户, 用水量约占经济社会用水总量的6%, 部分地区高达90%以上^[3]. 传统农业多采用大水漫灌方式

进行灌溉. 由于大部分水通过蒸发和深层渗漏等形式流失, 其用水量大, 亩次灌水量高达120多吨, 直接导致井灌区地下水储量减少, 华北平原因为超采造成的浅层地下水漏斗超过20000 km², 深层地下水漏斗70000 km², 已经成为世界上最大的地下水漏斗区^[4] (见图1(a)). 同时, 大水漫灌还会破坏土壤团粒结构, 造成土壤板结、土地盐碱化等土壤退化现象. 传统耕作采取多次耕翻耙耱, 为作物生长营造疏松的土壤耕层环境, 但不稳定的土壤结构极易被侵蚀, 导致土壤品质下降^[5]. 由于耕作改变了土地的原有状态, 也会破坏对地面的保护, 导致土壤风吹水蚀加剧, 使土壤失去活力. 耕作强度愈大, 自然本身的保护和营养恢复功能丧失得就愈多. 近几十年来, 我国机械耕作活动增强, 农产品产量大幅度上升, 但河流泛滥、沙尘暴狂飙、土壤退化、作业成本上升也是不争的事实^[6]. 以土壤退化

* 国家自然科学基金(批准号: U1632135, 11574339)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wufeng@ncwu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: fanghaiping@sinap.ac.cn

†† 通信作者. E-mail: houzhengchi@sinap.ac.cn

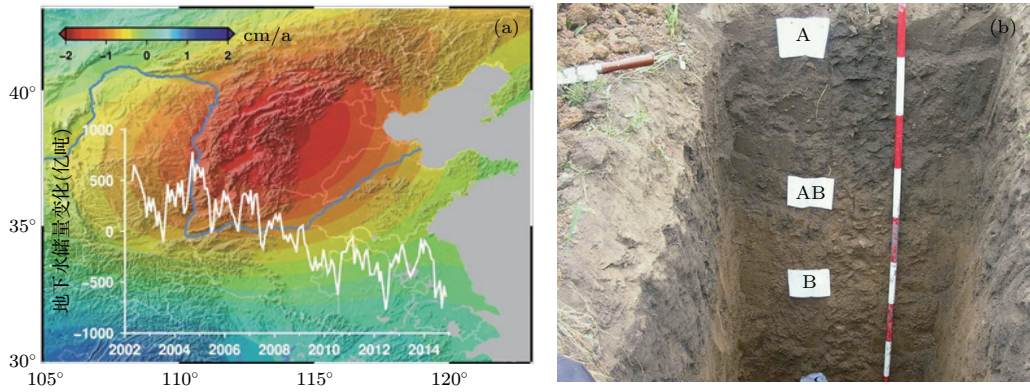


图1 (a) 利用 GRACE 卫星测量的华北地区地下水储量变化示意图^[10]和 (b) 退化中的东北黑土^[7]

Fig. 1. (a) Schematic map of groundwater reserves change in North China measured by GRACE satellite^[10]; (b) the degrading black soil in Northeast China^[7].

为例, 长期过度耕种导致支撑全国粮食产量 1/4 的东北黑土区以 1 cm/a 的速度持续退化, 土层厚度较开垦初期下降 60—70 cm^[7] (见图 1(b)); 不合理的大水漫灌措施导致黄淮海平原次生盐渍化严重; 中南地区红壤贫瘠、酸化等, 严重影响我国的粮食安全. 目前, 我国耕地退化面积占耕地总面积的 40% 以上^[8], 而且水资源已成为制约农业和国民经济发展的瓶颈, 寻求在当地水资源环境容量内的农业可持续发展之路已成为国人关注的焦点. 国务院先后颁布“水十条”和“土十条”应对我国日益严峻的环境问题. 要实现国家新增 5×10^{10} kg 粮食生产能力, 关键在水, 最根本的出路在于节水^[9]. 发展节水农业正成为国家战略^[3].

目前, 地下滴灌技术被认为是最节水的灌溉技术之一. 通过塑料管道和滴头将水直接输送到植物根部, 有效避免了漫灌中的无效水蒸发和过度灌溉的问题, 节水效果明显, 水的有效利用率超过 95%; 而且还能促进农作物生长; 节肥、省工. 该技术可以追溯到公元前 1 世纪 (西汉末年), 我国现存最早的一部农学专著《汜胜之书》记载用埋在土里的陶罐进行灌溉. 直到 1964 年, 以色列 Simcha Blass 父子采用塑料滴头进行灌溉, 现代滴灌系统基本成型. 采用滴灌技术以后, 以色列农业用水总量 30 年来一直稳定在 13×10^8 m³, 农业产出却翻了 5 番, 灌溉面积从 16.5×10^8 m² 增加到 $(22—25) \times 10^8$ m², 耕地从 16.5×10^8 m² 增加到 44×10^8 m²^[11]. 近 20 年来滴灌技术在全世界范围内以平均每年 33% 的速度增长, 总面积已达到 3.77×10^4 hm²^[12]. 我国滴灌面积现已达到近百万公顷, 增长速度已经位于世界前列, 主要分布在新

疆和内蒙古等缺水地区, 预计到 2020 年完全有可能达到或接近 16×10^5 hm²^[13].

以往人们认为地下滴灌能较好地保持土壤结构, 因此, 研究方向主要集中在滴头设计、毛管埋深与间距以及灌溉制度等技术方面^[14]. 但是越来越多的研究发现: 滴头附近的土壤会产生空穴、土壤强度 (抗穿透性) 增加以及通透性降低等现象^[15,16], 如图 2 所示. 这些土壤物理性质的变化会导致滴头附近产生水涝, 并限制作物根系进入滴灌湿球获取水和养分的能力, 影响作物生长^[16]. 这说明地下滴灌会改变土壤环境, 需要对其进行深入研究并改良, 以解决滴灌引起的土壤退化问题. 同时, 由于地下排布的滴灌管线的影响, 无法使用传统农业中的耕作方法疏松土壤结构. 因此, 如何原位修复地下滴灌引起的土壤退化是目前急需解决的问题之一.

在滴灌中使用加气水可能修复因滴灌引起的土壤退化. 当灌溉水中存在空气泡时, 土壤孔隙中部分水被空气代替, 从而改善土壤中的氧气水平, 抑制了土壤厌氧呼吸, 有利于作物根系生长和好氧土壤生物的繁殖. 此外, 由于空气的存在, 孔隙中的流体 (水和气) 平均密度降低, 有利于减小流体对孔隙周围土壤颗粒的扰动, 保持土壤原来的三相结构. 当灌溉水中有气泡时, 由于气泡的密度比水低, 灌溉时会从下到上移动, 促进水中溶解和分散的营养物质、微生物和土壤颗粒等物质和能量在垂直方向上的运动和交换, (部分) 消除普通滴灌中湿球边界处的土壤在干湿循环时因重力和毛细作用引起的密度和强度增加的现象, 大大增加了土壤的透气性^[17]. 加气水滴灌的好处更能在通透性不良 (碱化

土、重黏土等)的土壤中得以体现^[18]. 在盐碱土中, 加气水滴灌的西红柿产量增加了38%. 它还能调节农作物生长, 提高产量, 并改善作物品质. 例如, 加气水滴灌能使番茄的开花期提前, 产量是普通滴灌的1.5倍, 标准果率提升近一倍^[19]; 能使西瓜的产量增加40%, 而且西瓜中的维生素C的含量和蛋白质含量也分别提高了50%和20%^[20]; 能促使植物的根更快地吸收养分, 使洋葱的生长速度增加

27%^[21]. 这与加气水滴灌改善土壤中植物根系缺氧问题有关. 当土壤中的O₂水平相对低并且CO₂水平相对高时, 有氧呼吸被抑制, 从而对植物生长产生不利影响^[22,23]. 此外, 加气水滴灌下的土壤环境更适宜土壤微生物的生命活动, 细菌、真菌、放线菌的数量显著高于不加气滴灌. 而放线菌菌落数与土壤肥力和有机质转化相关. 因此, 加气水滴灌还有可能提高土壤肥力、促进有机质转化^[23].

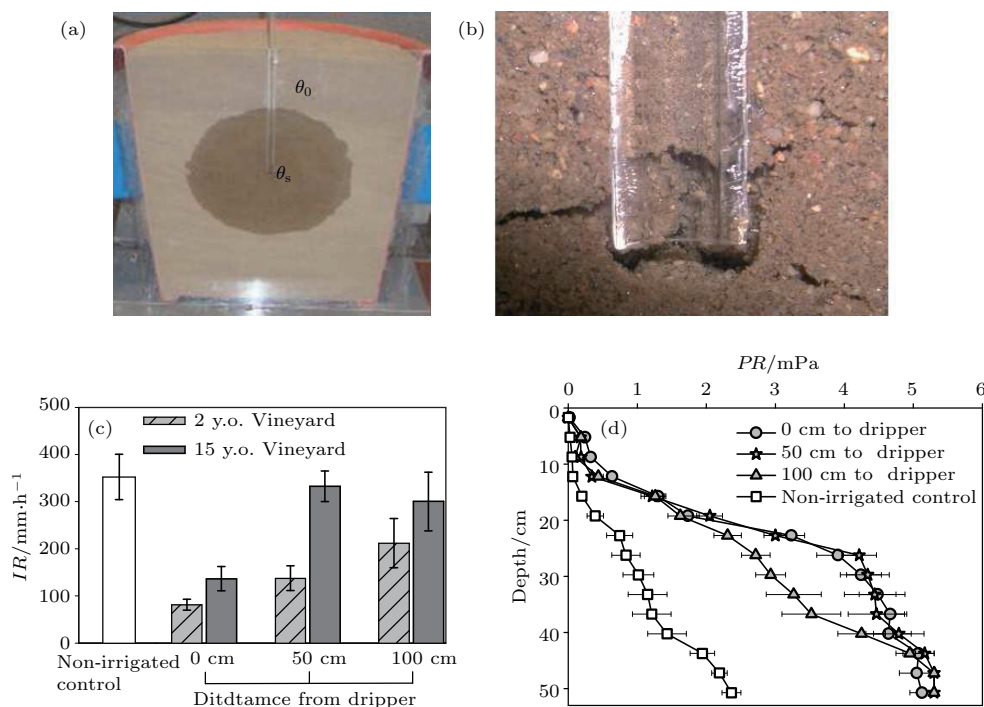


图2 滴灌产生的(a)湿球、(b)裂缝和空穴^[15]; 有无滴灌的土壤(c)地表稳态入渗速率和(d)抗穿透性能比较^[16]
 Fig. 2. (a) Wet balls, (b) cracks and holes produced by drip irrigation^[15]; comparison of soil surface steady infiltration rate (c) and penetration resistance (d) of drip irrigated Soil^[16].

2 影响加气滴灌效果的因素

2.1 滴头埋深

作为从普通滴灌发展起来的一种新技术, 滴头埋深等因素也同样影响加气滴灌的效果. 滴头埋深直接影响水分、养分在土壤中的运移, 而水分、养分在土壤中的分布状况可极大地影响植物根系的生长与分布及其对水分养分的吸收, 从而影响植物整体的生长发育, 最终影响到产量. 除此之外, 地下滴灌滴头的埋深, 直接影响水分在土壤深层渗漏, 并将养分淋移至深层土壤, 既造成损失, 又可能导致污染^[24].

滴头埋深通常由以下几个因素综合决定: 一是田间耕作深度, 避免因犁翻泥土造成损坏; 二是土

壤质地, 由于不同土壤质地对土壤水分吸力不同, 即使在灌溉定额相同的情况下, 水分在土壤中运动也不一样, 形成的湿润体形状也各有差异, 如沙性土壤中, 润湿体呈竖椭圆状, 黏性土壤中呈现扁平状, 这些不同的润湿体影响着滴灌带的埋深和间距; 三是作物根系的生长发育, 如果毛管理深太大则不利于作物幼苗生长, 但埋深太小又会影响作物生育后期对水分的需求.

李元等^[25]发现, 在15和40 cm的埋深下, 标准加气量(49.4 L/m²)时, 2次测定大棚番茄的净光合速率平均较不加气处理升高21.4%和65.0%. 埋深为15 cm时, 叶绿素含量、干物质积累量及产量随加气量的升高呈先升高后降低的趋势, 标准加气量下较不加气处理分别提升38.0%, 55.4%和59.0%. 埋深为40 cm时, 叶绿素含量、干物质积累

量及产量随加气量的升高呈持续升高趋势, 1.5 倍标准加气量 (74.2 L/m^2) 处理较不加气处理分别提升 33.7%, 36.2% 和 105.4%. 他们还研究了铝滴头埋深对大棚甜瓜(陕甜一号)果实形态、产量、品质的影响, 发现当埋深为 25 cm, 每天加气 1 次品质及果实形态指标最好, 产量最高^[26]. 蔡焕杰等^[27,28]研究了滴头埋深对温室番茄生长、产量和品质的影响, 发现在灌水频率相同的情况下, 滴头埋深对番茄生长的影响不大. 但相对而言, 15 cm 的滴头埋深更有利于提高作物的生长量、产量和品质. 他们还研究了滴头埋深对番茄植株生长、产量和果实品质的影响, 发现埋深 15 cm 和 25 cm 对番茄株高、茎粗和叶面积的影响没有显著性差异 ($P < 0.05$).

2.2 加气滴灌频率

滴灌水频率越低, 以滴头为中心形成的干燥范围越大, 根系受到水分胁迫时间越长. 当土体中水分缺乏时, 可能会错过作物需水高峰, 从而影响到作物的生长和养分吸收. 滴灌水频率越高, 滴头附近土壤中饱和水的区域越大, 可能导致淋洗渗漏, 一方面不利于节水, 另一方面导致土壤营养成分流失, 污染地下水源. 因此, 滴灌频率需根据作物生长特点和土壤质地等因素加以调节.

蔡焕杰等在日光温室地下滴灌条件下, 采用相同的灌水量, 研究不同加气频率(1天1次、2天1次、4天1次)对西瓜全生育期生长发育和产量的影响. 结果表明: 3种加气频率在产量上与对照组相比分别提高了 7.3%, 18.6%, 4.5%, 可溶性总糖和可溶性固形物含量提高显著; 从西瓜株高、叶面积、叶绿素、总生物量和产量等综合分析, 加气频率采用 2 天 1 次最优^[29]. 他们还采用温室小区对照试验, 比较加气灌水频率(3天1次、6天1次)对番茄植株生长及果实产量和品质的影响. 发现: 6天1次加气灌溉番茄株高、茎粗、产量均大于 3 天 1 次加气灌溉处理^[27]. 加气灌溉有利于温室番茄茎粗、株高的生长, 并且对番茄的产量和品质均有利. 在相同的灌水量条件下, 6 天 1 次较 3 天 1 次的加气灌水频率, 株高增加了 8.08%, 茎粗增加了 6.33%, 产量增加了 26.01%^[30]. 乔建磊等^[31]发现加气滴灌可以提高蓝莓叶片 PSII 反应中心最大荧光产量 (F_m), 且不同加气频率对叶片最大荧光 F_m 值具有显著影响 ($P < 0.05$); 加气滴灌有利于提高蓝莓叶片 PSII 光能俘获效率 (F_v/F_m), 同时提高了叶片实际光

化学效率 (yield) 和光化学猝灭系数 (qP), 且加气频率不同, 叶片 PSII 电子传递活性表现出较大的差异. 加气滴灌可以有效提高蓝莓叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量, 且加气频率不同其作用效果也有所不同; 但加气处理对蓝莓叶片中叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的比值影响不大, 在整个试验期间均无显著差异 ($P > 0.05$)^[32]. 姚帮松等^[33]发现, 在试验设计范围内, 水稻单穴最大分蘖数随增氧灌溉频率的降低而增加, 但是单穴有效穗数和成穗率却大致随着增氧灌溉频率的增加而提高. Wang 等^[34]在 2001 年和 2002 年的地表田间试验中, 研究了灌溉频率对土壤水分分布、马铃薯根系分布、马铃薯块茎产量和水分利用效率的影响. 他们发现滴灌频率对土壤水分分布有一定的影响, 这取决于马铃薯生长阶段、土壤深度和灌水器距离. 滴灌频率对马铃薯根系生长也有一定影响: 频率越高, 0—60 cm 土层根长密度越高, 0—10 cm 土层根长密度越低. 另一方面, 即使在作物以最高频率灌溉时, 马铃薯根系也不受湿润土壤体积的限制. 高频灌溉提高马铃薯块茎生长和水分利用效率. 在 2001 年和 2002 年将灌溉频率从 1 天 1 次减少到 8 天 1 次, 分别显著导致 33.4% 和 29.1% 的减产量^[34].

2.3 灌水量

灌水量对作物产量、品质及水分利用效率的影响不及加气频率和滴灌带埋深^[35]. 研究表明, 对甜瓜的果实形态、品质及产量影响的大小顺序依次为加气频率、滴灌带埋深和灌水控制上限. 灌水量控制在田间持水量的 80% 时, 果实可溶性固形物含量最高, 但灌水量为 70% 田间持水量时, 可溶性总糖、产量、水分利用效率最高^[26]. 加气灌溉可以对番茄开花时间产生影响. 如图 3 所示, 第一层花中, 高水加气处理 (T1) 平均比对照组提前 2 d 开花; 第二层花与第三层花的几种加气处理与对照组差别不大. 在不同的灌溉水平下, 中水更利于提前开花时间; 如果灌水量过低, 反而延后开花时间^[36]. 他们进一步系统考察了灌水量对温室番茄生长、产量及品质的影响, 发现 K_{cp} 为 1.0 的灌水量处理对番茄的生长、产量、水分利用效率和品质最优^[30].

加气滴灌的灌水量还会影响土壤的 N_2O 和 CO_2 的排放^[37], 并影响土壤中的微生物^[38]. 但它对土壤中细菌、放线菌数量以及过氧化氢酶和脲酶活性、真菌数量的影响也不及加气频率和滴灌带埋

深. 当灌水至田间持水量的80%, 过氧化氢酶活性最高, 放线菌数量最多; 灌水至田间持水量的90%, 脲酶活性最高, 细菌及真菌数量最多 [35].

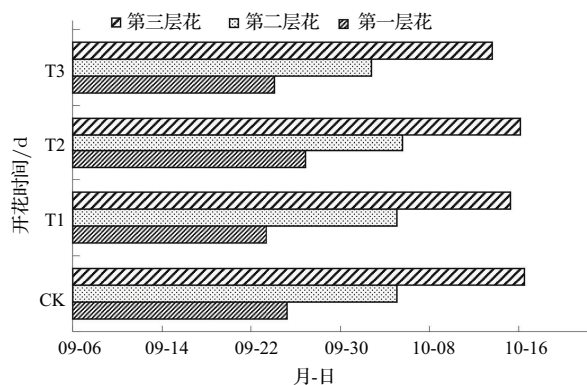


图3 加气滴灌对番茄开花时间的影响 T1, T2, T3 分别为高水、低水、中水加气处理, 其蒸发皿(作物皿)系数 K_{cp} 分别为 1.2, 1.0, 0.4; CK 为对照组, 其 K_{cp} 为 1.2 [36]

Fig. 3. Effect of drip irrigation on the blossom time of tomato. T1, T2 and T3 were respectively treated with high water, low water and medium water. The K_{cp} of evaporation dish (crop dish) was 1.2, 1.0 and 0.4 respectively. CK was the control group with its K_{cp} of 1.2 [36].

2.4 植物生育期

植物在不同的生育期对土壤水分的需求不同. 苗期需水量稍少, 随着作物的生长而增加, 到生长旺期需水量最大, 成熟期逐渐减少. 因此, 在不同的生育期进行加气滴灌的效果理应不同.

目前, 大部分研究是对植物的全生育期进行加气滴灌处理. 例如, 在日光温室地下滴灌条件下, 在西瓜全生育期内向温室小型西瓜根区加气, 3种加气频率(1天1次, 2天1次, 4天1次)在产量上与普通滴灌相比分别提高了7.3%, 18.6%, 4.5%, 可溶性总糖和可溶性固形物含量提高显著 [29]. 温室小区试验中, 番茄全生育期单株总灌水量为18.28 L的条件下, 加气滴灌对植株生长量及果实产量和品质的影响明显优于普通滴灌 [27]. 在番茄生长后期加气 and 整个生育期加气均能明显改善番茄的品质, 提高果实中的番茄红素、VC、有机酸和可溶性糖的含量, 降低硝酸盐的含量 [39].

蔡焕杰等 [40] 研究表明, 番茄在不同生育时期对根际加气的响应不同, 且加气效果不具有叠加性, 即单独生育时期加气效果较全生育时期加气处理明显. 苗期加气处理可提前首层开花时间; 全生育时期加气处理可以提高叶绿素含量11.1%; 开

花后加气处理也可提前二、三层开花时间, 并增高14.8%; 坐果期加气处理可以促进干物质累积, 提高根冠比(见表1), 增粗5.6%, 获得最大产量.

姚帮松等 [41] 研究发现, 在不同生育期对根区通气增氧处理可促进根系生长, 提高根系活力. 根区加气滴灌处理的杂交水稻根总长、根总体积、根总表面积、平均根系直径、根干重和根尖数等特征指标都明显优于对照组, 且表征根系活力的氯化三苯基四氮唑(TTC)还原强度随着增氧频率的降低而减弱.

表1 不同生育时期加气处理对番茄干物质积累量和根冠比的影响 [40]

Table 1. Effects of rhizosphere ventilation at different growth stages on dry matter weights and root/shoot ratio of tomato.

处理	地上部 鲜重/g	地上部 干重/g	地下部 鲜重/g	地下部 干重/g	根冠比/%
CK	489.4a	40.3a	48.8c	2.5c	5.1c
T1	617.7a	41.9a	62.0c	3.8c	6.1a
T2	629.8a	49.2b	74.0b	4.1b	5.6b
T3	643.0a	43.9a	78.4a	5.3a	6.7a
T4	590.9a	47.9a	68.4c	3.4c	5.0c
T5	577.5a	46.4a	77.4a	4.5b	5.8b

* 采用 Duncan's multiple range test 分析, 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05, n = 3$).

By Duncan's multiple range test analysis, different small letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

2.5 加气方式与设备

加气方式与设备决定了灌溉水中氧气的存在形式和气泡大小及分布, 从而影响加气灌溉的效果. 研究表明, 文丘里、空气压缩机等加气设备均可用于微灌加气技术, 但不同的加气设备及其加气运行模式可产生不同效果 [42]. 机械加气滴灌和化学溶氧滴灌可在旺长期和现蕾期提高烟草根干重、总根数、主根数. 机械加气滴灌根冠比随着烟草的生长呈现接近并递增的趋势; 而化学溶氧加气滴灌和常规滴灌烟草根冠比随着烟草的发育呈现逐渐降低的趋势. 机械加气滴灌方式可使烟草根系活力达到最优, 根系体积扩大, 不定根及细根量增多, 根系活力增强 [43]. 机械加氧灌溉比化学加氧灌溉更有利于烟草根系的扎深, 化学加氧灌溉比机械加氧灌溉更有利于营养物质向地面植株的分配 [44]. 但化学溶氧滴灌方式总节水效果和增产效果均比机械

加气滴灌好. 机械加气滴灌可使烟草根系活力达到最优, 根系体积扩大, 不定根及细根量增多, 总耗水量增加; 而化学溶氧加气滴灌根系的发育要比冠部的发育慢, 可节约部分水^[45]. 加气灌溉能够明显提高温室番茄产量, 且文丘里加气法和水气分离加气法处理的温室番茄产量分别比未通气灌溉增加了30%和5%左右. 高水且采用文丘里加气的水分利用效率以及干物质累积量均最大. 温室番茄以高水且采用文丘里加气灌溉为宜^[46].

3 土壤环境调节机理

3.1 加气水滴灌与土壤水环境调节

水分既是植物光合作用形成碳水化合物不可或缺的物质, 也是构成植物体本身不可缺少的物质, 同时也是植物体内输送养分的载体, 是农作物生长发育的重要环境因子. 植物所需水分主要来自土壤水, 植物吸收土壤水受土壤水气状况的影响. 以棉花为例, 75%的田间持水量下棉花产量最高; 过高的土壤水分含量不利于棉花根系生长和棉花质量^[47].

滴灌最先需要解决的就是土壤缺水问题. 因此, 加气水滴灌对土壤的水环境调节至关重要. 与普通滴灌不同的是, 加气滴灌中, 水中加入的气体与土壤之间的相互作用会进一步提高水分利用率, 改善作物的产量和品质. 雷宏军等^[48]以温室番茄为研究对象, 研究循环曝气地下滴灌对番茄生理及品质的影响. 结果表明, 与普通地下滴灌相比, 曝气处理后番茄的水分利用效率提高了20.72%; 番茄最大根长增加了16.75%, 根冠质量之比提高了25.81%; 番茄果实前5次产量提高了29.15%; 维生素C含量提高了13.25%; 可溶性固形物含量提高了8.62%; 糖酸比提高了22.05%; 而总酸含量和硬度分别下降了15.50%和11.19%. 姚帮松等^[49]研究了加气水滴灌对盆栽马铃薯产量和水分利用效率的影响, 发现: 1天3次和1天1次的加气滴灌使马铃薯的产量分别增加了16.05%和11.23%; 株高平均增长了6.83%; 茎粗平均增长了12.78%; 水分利用效率分别提高了16.07%和11.22%.

3.2 加气水滴灌与土壤气环境调节

水、肥、气、热是保障土壤肥力的四大要素, 传统的灌溉方式往往忽视了气这一重要因素. 良好

的土壤通气性是作物正常生长发育的保证. 加气灌溉通过采用合理的方法改善土壤通气状况, 协调土壤四大要素之间的关系, 提高土壤肥力, 满足作物生长的需要; 可提高作物产量、改善作物品质^[50]. 氧是植物生命活动所必需的营养因子, 充足的氧供应才能满足植物正常生长发育的需求^[51]. 土壤氧气含量是影响土壤呼吸变化的重要因子. 研究表明, 加气灌溉下土壤含水率略有下降, 土壤呼吸速率和土壤氧气含量分别比对照提高了33.16%和16.61%. 而且加气灌溉明显改善了根区土壤环境, 减少了限制土壤呼吸的其他因素^[52]. 番茄生长前期, 土壤呼吸与充气孔隙度和氧气含量显著正相关; 番茄生长后期, 土壤和土壤微生物呼吸与土壤氧气含量显著负相关($P < 0.05$)^[53]. 加气灌溉条件下, 温室番茄根区土壤氧气含量、土壤呼吸、温度和植物根系呼吸均有所增大. 与不加气相比, 土壤和植物根系呼吸显著增大了25.5%和38.8% ($P < 0.05$), 加气滴灌促进了土壤、土壤微生物和植物根系呼吸, 有效改善了土壤通气性^[53].

以大棚立体种植油麦菜为例, 油麦菜株高、叶片数和茎粗与灌溉水中溶氧量正相关. 溶氧量为8 mg/L时, 单株鲜质量和干质量最大, 分别为56.25, 10.71 g; 溶氧量为1.2 mg/L时, 株鲜质量和干质量最小, 分别为42.64, 3.52 g^[54]. 土壤水溶解氧也能显著影响水稻的生长. 灌水后根区较高的土壤水溶解氧含量一般能够持续5天左右, 加气灌溉对0—20 cm土层土壤水溶解氧含量影响显著, 对深层土壤影响较小^[55]. 已有研究表明, 增氧可以提升棉花生长潜力. 持续性增氧的水培棉花的根体积、根系总吸收面积、根活性面积、根系生物量、株高、地上部生物量、氮和钾的吸收量的促进作用均达到显著水平, 分别比不增氧增加了194.62%, 261.89%, 301.73%, 57.15%, 22.76%, 38.03%, 35.27%, 84.78%, 间歇性增氧对根系生物量、株高、地上部分生物量的促进作用显著, 分别比不增氧高30.83%, 15.65%, 21.19%^[47].

加气灌溉引起的土壤中氧气含量改变势必会影响土壤微生物活动和作物根系生长, 进而影响土壤CO₂和N₂O的产生和排放. 其中, CO₂是大气中最重要温室气体, 对全球变暖起到重要作用. 不同灌溉水平下, 夏玉米地土壤CO₂排放通量与土壤充水孔隙率呈指数正相关关系, 相关性达显著水平($P < 0.05$). 亏缺灌溉在一定程度上抑制了土壤

CO₂ 的排放, 土壤充水孔隙率低于 50% 时, CO₂ 排放通量维持在较低水平; 但当土壤充水孔隙率高于 50% 时, CO₂ 排放通量随着土壤充水孔隙率的增加而有大幅度增加^[56]. 温室小区试验中, 在番茄的整个生育期, 不同加气灌溉模式下土壤 CO₂ 排放通量随移植后天数增加总体呈现先增加后减小的趋势, 峰值均出现在番茄开花坐果期. 加气和充分灌溉处理较对应的不加气和亏缺灌溉处理增加了番茄整个生育期土壤 CO₂ 平均排放通量和排放量, 但差异不显著 ($P > 0.05$). 土壤 CO₂ 排放通量与土壤充水孔隙率呈负相关, 但相关性不显著 ($P > 0.05$)^[57]. 不同加气灌溉模式下, 加气和充分供水处理均增加了秋冬茬温室番茄整个生育期的土壤 N₂O 排放量, 以加气充分灌溉最大 (120.34 mg/m²), 分别是加气亏缺灌溉和不加气亏缺灌溉的 1.89 和 4.21 倍 ($P < 0.01$). 可见, 加气灌溉增加了温室番茄地土壤 N₂O 排放, 且在亏缺灌溉条件下, 加气灌溉对温室番茄地土壤 N₂O 排放的影响显著^[37]. 充分灌水温室芹菜地 N₂O 排放显著 ($P < 0.05$) 高于亏缺灌溉; 施氮显著 ($P < 0.05$) 增加了土壤 N₂O 排放, 施氮量 150, 200 和 250 kg/hm² 的 N₂O 累积排放量分别是不施氮的 2.30, 4.14 和 7.15 倍. 灌水和施氮提高芹菜产量的同时, 显著增强了土壤 N₂O 排放^[58].

3.3 加气水滴灌与土壤微生物环境调节

土壤微生物在土壤中进行氧化、硝化、氨化、固氮、硫化等过程, 促进土壤有机质的分解和养分的转化. 它们是土壤中物质转化的动力, 土壤酶与微生物细胞一起推动物质转化. 由于加气水滴灌改变了土壤的水、气、热等环境条件, 对土壤微生物的数量和菌落将产生无法避免的影响. 加气灌溉下的土壤环境更适宜土壤好氧微生物的生命活动. 番茄在各生育期加气时的根区土壤中细菌、真菌数量均明显提高; 高水水平和中水水平下加气灌溉处理的细菌、真菌、放线菌的数量也显著高于普通滴灌^[59].

在日光温室内, 加气滴灌增加了番茄全生育期的土壤硝化细菌数量, 平均增加了 2.1%; 同时降低了约 9.7% ($P > 0.05$) 的土壤反硝化细菌数量. 增加灌水量, 土壤硝化细菌和反硝化细菌数量均逐渐增加 ($P > 0.05$)^[38]. 牛文全等^[35] 发现, 加气灌溉对大棚甜瓜根系土壤酶活性、土壤微生物数量均有显著影响. 对细菌、放线菌数量的影响由大到小依次为加气频率、滴灌带埋深和灌水上限; 对过氧化

氢酶和脲酶活性、真菌数量的影响由大到小依次为滴灌带埋深、加气频率和灌水上限. 每天加气 1 次土壤脲酶活性最高, 细菌数量也最多; 每两天加气 1 次土壤过氧化氢酶活性最高, 真菌数量最多. 灌水至田间持水量的 80% 过氧化氢酶活性最高, 放线菌数量最多; 灌水至田间持水量的 90% 脲酶活性最高, 细菌及真菌数量最多.

于坤等^[60] 研究了单纯根际注气对土壤细菌群落结构的影响. 根际注气即可促进与硝化作用相关的亚硝化螺菌属, 磷钾代谢相关的假单胞菌属、芽孢杆菌属, 抑制与反硝化相关的罗尔斯通菌属, 表明加气灌溉能促进植株对氮磷钾的吸收与提高硝化作用、解磷解钾相关菌群数量有关. 根际注气可有效改变细菌群落丰度, 但对细菌群落多样性影响较小. 注气处理增加了放线菌门和硝化螺旋菌门的丰度, 其中在 40—50 cm 土层注气处理放线菌门和硝化螺旋菌门分别比未注气高 16.7% 与 22.7%, 达到极显著水平.

即便是普通滴灌也能恢复盐碱地土壤酶活性. Kang 等^[61] 研究发现, 滴灌条件下盐碱地土壤的碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性随栽培年限的增加而增加, 分别为 4.5, 1.39, 19.39 和 20.25, 3.17, 61.33 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. 碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性均随滴头水平距离和垂直距离的增加而降低. 滴灌 3 年后, 土壤酶活性与土壤环境因子之间的相关性大于未垦地; 4—6 年后, 土壤酶活性应达到天然羊草草原的水平.

3.4 加气水滴灌与土壤营养环境调节

加气滴灌可以改善作物的根系生长环境, 从而促进根系对养分的吸收^[31]. 雷宏军等^[62] 研究发现, 循环曝气滴灌有效提高了作物氮、磷、钾的吸收效率. 其中, 郑州黏土和洛阳粉壤土氮素吸收量较常规滴灌分别显著提高了 23.68% 和 27.72% ($P < 0.05$). 不同土壤作物磷、钾吸收效率均有显著提高 ($P < 0.05$), 其中郑州黏土分别增加了 27.54% 和 62.81%, 洛阳粉壤土增加了 25.20% 和 63.26%, 驻马店砂壤土增加了 26.86% 和 23.97%. 于坤等^[63] 通过氮同位素示踪标记表明: 注气处理可显著促进葡萄新生部位对硝态氮的吸收, 抑制铵态氮的吸收利用. 但根际注气并未影响葡萄根系对硝态氮的偏好, 宜选择硝态氮作为氮肥来源.

3.5 加气水滴灌与土壤矿物环境调节

土壤矿物占土壤固相物质的绝大多数, 一般约占干土重的95%以上, 是土壤最基本的物质成分. 土壤矿物质是营养元素的重要来源, 构成了土壤的骨骼, 影响土壤的质地、孔隙、通气性、透水保水性、供肥保肥性等一系列肥力性状. 其中, 可溶性矿物在灌溉时能全部或部分溶解淋失, 影响电导率和pH分布, 从而影响滴灌局域的土壤矿物环境.

Kang等^[64]采用田间试验研究了我国东北松嫩平原盐碱地土壤滴灌对种子萌发和星星草生长的影响. 结果表明, 滴灌对土壤含水量、饱和土壤提取物的电导率(CE_c)和pH分布有一定的影响, 抑制了根区盐分的积累, 使种子萌发. 整个土壤剖面的CE_c和pH随着土壤基质势的增加而降低. 试验两年后, 分蘖数、株高、穗数、长度、地上生物量和覆盖度均显著增加, 土壤基质势为15—20 kPa的生长效果优于其他处理.

4 总结与展望

土壤是粮食安全、水安全和更广泛的生态系统安全的基础. 受水土资源的制约, 发展节水农业正成为国家战略. 传统农业采用大水漫灌方式进行灌溉, 用水量大. 而且不合理的灌溉和耕作会破坏土壤环境, 直接导致华北平原地下水漏斗、东北黑土区持续退化、黄淮平原次生盐渍化严重等问题. 地下滴灌技术是最节水的灌溉技术之一, 但是它在一定程度上也影响土壤环境. 加气水滴灌一方面能改善滴灌时作物根系缺氧情况, 另一方面能促进土壤微生物生长, 提高土壤肥力; 而且还能改善土壤结构, 修复土壤.

加气滴灌对作物生长、产量及品质的影响因素主要有: 滴头埋深、滴灌频率、灌水量、作物生育期以及加气设备和方式等. 其中, 灌水量对作物产量、品质及水分利用效率的影响不及加气频率和滴头埋深. 虽然目前大部分研究采用全生育期加气, 但是不同生育时期对加气的响应不同, 且加气效果不具有叠加性. 不同的加气设备及其加气运行模式可产生不同效果. 机械加气滴灌可使烟草根系活力达到最优; 化学溶氧加气滴灌根系的发育要比冠部的发育慢, 可节约部分用水. 而温室番茄以高水且采用文丘里加气灌溉为宜. 孙景生等^[65]研究发现,

地下渗灌较地下滴灌显著提高灌溉水生产效率, 且以地下渗灌加气灌溉的水分生产效率最高. 加气灌溉结合地下渗灌可以实现温室芹菜节水高产, 可能成为加气灌溉的一种新方式.

近年来, 微纳米气泡也被尝试用于加气滴灌中. 吕谋超等研究发现, 微纳米加气灌溉模式下番茄株高、茎粗、单株叶面积增长速度较常规灌溉得到显著提高, 表现为苗期、开花期、坐果期番茄生长优势明显. 微纳米加气灌溉可改变番茄的产量分布特征, 促进番茄提早成熟从而获得更大的经济效益. 微纳米加气灌溉对番茄VC量、可溶性固形物和蛋白质均有不同程度提高, 有机酸呈降低趋势, 对糖酸比的影响不大^[66]. 微纳米气泡加氧质量浓度对水培蔬菜的生长与品质指标影响差异显著. 油菜、小白菜、小油菜的干质量随加氧质量浓度的升高呈先增加后减少的趋势, 而根长随加氧质量浓度的升高呈递增趋势; 加氧质量浓度为10 mg/L时, 蔬菜VC量较高; 加氧质量浓度为15 mg/L时, 干质量和叶片长度均能达到较高水平; 加氧质量浓度为20 mg/L时, 蔬菜可溶性糖量较高; 加氧质量浓度为30 mg/L时, 蔬菜根系较发达^[67].

污水和微咸水也能用于加气水滴灌, 微咸水中的NaCl介质对氧总传质系数的增幅显著. Hassanli等在伊朗南部用城市污水进行了为期25个月的滴灌. 统计结果表明, 0, 30, 60和60—90 cm土层的盐分分别从8.2, 6.8和7 dS/m降低到1.07, 1.12和3.5 dS/m. 土壤pH值在0—30和30—60 cm土层中分别提高0.8和0.6. 25个月的污水灌溉导致土壤容重略有增加, 平均渗透率略有下降^[68]. 微咸水中NaCl的存在及活性剂添加对提高曝气灌溉的氧传质效率, 实现节能高效的灌溉有重要作用. 生物降解活性剂BS1000(醇烷氧基化物质量浓度、1, 2, 4 mg/L)的添加促进氧传质过程的发生, 提高了曝气水中的溶氧饱和度. 随着BS1000浓度增加, 氧总传质系数逐渐增加, 而溶氧饱和度呈现下降的趋势. BS1000质量浓度在2 mg/L及以上时, NaCl介质对氧总传质系数的增幅显著; NaCl介质对曝气水中的溶氧饱和度起到抑制作用. 添加活性剂BS1000可使氧总传质系数平均提高18.85%以上($P < 0.05$)^[69].

滴灌还是一种有效的盐碱地复垦方法. Kang等^[70]将滴灌技术用于盐碱地复垦中. 结果表明, 在玉米栽培和滴灌后, 土壤物理环境和养分状况均

得到改善,有利于微生物的活性和植物的生长.若能采用加气水滴灌,将有可能提高盐碱地土壤修复效率.

在加气水滴灌的土壤环境调节机理方面,研究人员大多考虑了加气水滴灌对土壤肥力的四大因素(水、肥、气、热)以及营养和矿物质等的影响,并认为,通气提高作物产量和品质的机理是促进作物地上部分光合作用及光合产物的积累运转、促进根系生长发育及对土壤矿质元素吸收和增加土壤微生物群落多样性及酶活性^[71].也有研究表明,加气水滴灌效果与土质有关,在黏壤土和粉质黏壤土中效果明显,而在砂壤土中效果不明显.在黏质型土壤中,0.1 MPa加气滴灌对作物生长有较好的促进作用^[72].甚至有人在温室小区试验中发现加气灌溉对试验中观测的土壤生境因子的影响不显著($p > 0.05$).但他们认为土壤生境因子的微小改变可能会大幅改变土壤的环境效应和作物产量及品质^[73].

我们认为,加气水滴灌能改善土壤结构.而土壤结构的改良会调节土壤的环境,它们相互促进,进一步提高土壤肥力.已有研究表明,灌溉时水分子自上而下渗流过程中,黄土层中微小颗粒、可溶物也随之下迁,形成坡顶至坡脚黄土颗粒粒度、结构特征、可溶物含量截然不同的特征^[74].短时间曝气能很快提高土壤的透气性^[69].曝气后10 min内棕壤林地土壤的透气性水平分别为3.7, 2和1.5倍,

娄土壤分别为3, 2.5和2倍^[75].滴头附近的土壤会产生空穴、土壤强度(抗穿透性)增加以及通透性降低等现象^[15,16].这些证据都表明(加气水)滴灌会改变土壤结构.

但由于实验条件的限制,目前绝大部分研究都聚焦在加气水滴灌的效果上,加气水滴灌对土壤结构的改变少有报道.显微成像技术,尤其是计算机断层扫描技术为研究土壤的内部结构提供了保障,它能分辨出土壤中的孔隙结构及其连通性^[76-79],甚至能分辨出土壤孔隙中空气、水和有机质的空间分布^[80,81].这些结构信息将为分析土壤的含水量及分布^[82-84]、孔隙率和透气性^[85-87]、土壤强度^[88,89]、土壤中营养物质与矿物质的流动^[90-92]、土壤微生物的活动^[93-97]提供有利的帮助^[98-100].近年来,随着研究条件的改善,国内越来越多的研究人员利用该方法研究了各种土壤结构以及长期耕种对土壤结构的影响^[101-108].

我们的前期研究结果也表明,加气水滴灌能改善土壤的结构.利用上海光源X射线成像线站,我们对土壤进行断层扫描并数字重构,原位研究加气水滴灌前后土壤的结构及其变化情况后发现:加气水滴灌后,大孔(红色)的数量明显变少;小孔(蓝色)的密度明显增加,土壤孔隙的连通性增加,如图4所示.这些结构变化将有利于增加土壤的透气性,促进植物的生长.

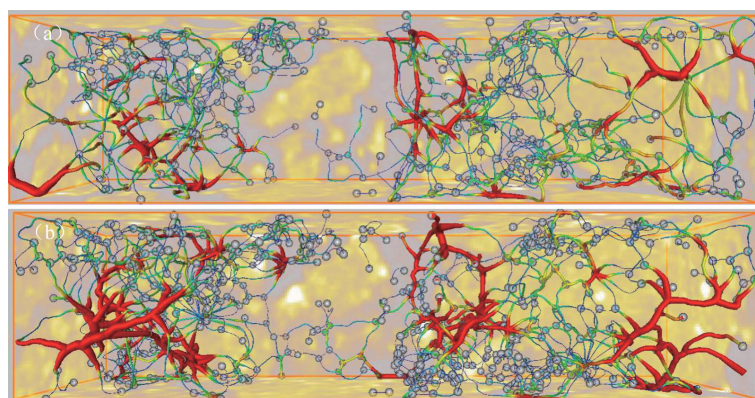


图4 加气滴灌前后土壤中孔隙的分布情况 (a) 加气滴灌前; (b) 加气滴灌后

Fig. 4. The connectivity of pores in soil before (a) and after (b) aerated drip irrigation.

我们也注意到,土壤的结构与功能的关系已经引起了土壤学界的关注.在今年的土壤科学领域国际知名期刊《Geoderma》上发表了一篇题为“*Soil structure as an indicator of soil functions: A review*”的综述文章详细讨论了各种土壤的性状与

土壤结构之间的关系^[109].正如文中指出,土壤的结构与功能之间的关系尚不明确.孔隙度、大孔隙度、孔隙距离和孔隙的连通性是几个相关土壤功能的主要指标.成像仪器似乎是最可靠的工具来表征它们,但是我们无法得出这些土壤结构指标与土壤

功能之间的确切关系的任何结论. 这需要研究大量不同土壤类型和管理实践, 以跨越这些性质的整个范围, 并得出可靠的结论; 应努力通过一个“土壤结构库”产生大量的土壤类型的知识, 以便表征和推导类似功能的土壤的关系. 作者认为, 应该大量采用原位成像的实验方法减少影响土壤结构的因素, 促进土壤结构与功能之间关系的研究.

因此, 基于加气水滴灌的土壤环境调节机理的研究应该立足于加气水滴灌对土壤结构的改变, 分析和总结出加气水滴灌改变土壤结构的规律, 在此基础上结合加气水对土壤微生物、土壤宏观性能以及农作物产量和质量的影响规律, 深入理解加气水滴灌时土壤中固、液、气三相之间的相互作用机理, 为确定固-液-气三相的最佳平衡点以及土壤环境调节和修复机理提供实验支持. 未来滴灌应用范围会更广阔^[110]. 加气水滴灌的土壤环境调节机理的研究将促进地下滴灌技术的发展, 有利于降低地下滴灌的成本并提高农作物的产量和质量, 为我国的节水农业的发展和推广、土壤的修复和改良提供有力的理论和实验指导, 推动我国农业可持续发展.

参考文献

- [1] Zhu Y G, Li G, Zhang G L, Fu B J 2015 *Acta Geogr Sin* **70** 1859 (in Chinese) [朱永官, 李刚, 张甘霖, 傅伯杰 2015 地理学报 **70** 1859]
- [2] <http://www.soilsforlife.org.au/world-soil-day>
- [3] 2012 国家农业节水纲要 (2012—2020 年)
- [4] 李晓明, 李凯 <http://scitech.people.com.cn/GB/10580061.html>
- [5] Chen Q, Sun T, Song C Y 2014 *Pratacult Sci* **31** 650 (in Chinese) [陈强, 孙涛, 宋春雨 2014 草业科学 **31** 650]
- [6] Zhao C Y 2009 *Technology and Life* **1** 3 (in Chinese) [赵春阳 2009 科技与生活 **1** 3]
- [7] <http://politics.people.com.cn/BIG5/n/2013/0822/c366035-22658099-2.html>
- [8] http://news.xinhuanet.com/politics/2014-11/06/c_127182973.htm
- [9] http://www.gov.cn/gzdt/2012-12/13/content_2289915.htm
- [10] 2018 重力卫星揭露华北地下水超采: 年均亏损 60—80 亿吨 <http://www.hahasou.com/a/32961.html>
- [11] <http://www.h2o-china.com/news/38088.html>
- [12] Li A 2011 *M.S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) [黎安 2011 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [13] Zhang J 2015 *World Journal of Forestry* **4** 13
- [14] Cheng X J, Xu D, Zhang H 1999 *Water Saving Irrigation* **4** 13 (in Chinese) [程先军, 许迪, 张昊 1999 节水灌溉 **4** 13]
- [15] Sinobas L R, Rodríguez M G 2012 *A Review of Subsurface Drip Irrigation and Its Management* (InTech) p177 <https://www.intechopen.com/books/water-quality-soil-and-managing-irrigation-of-crops/a-review-of-subsurface-drip-irrigation-and-its-management>
- [16] Currie D R 2006 *Ph. D. Dissertation* (Adelaide: The University of Adelaide)
- [17] Niu W, Guo Q, Zhou X, Helmers M J 2011 *Soil Sci. Soc. Am. J.* **76** 815
- [18] Bhattarai S P, Pendergast L, Midmore D J 2006 *Sci. Hortic-Amsterdam* **108** 278
- [19] Lu Z H 2012 *M. S. Thesis* (Yangling: Northwest A&F University) (in Chinese) [卢泽华 2012 (杨凌: 西北农林科技大学)]
- [20] Liu J 2011 *M.S. Thesis* (Yangling: Northwest A&F University) (in Chinese) [刘杰 2011 (杨凌: 西北农林科技大学)]
- [21] Bagatur T 2014 *Arab J. Sci. Eng.* **39** 2525
- [22] Niu W Q, Guo C, Shao H B, Wu P T 2011 *Afr. J. Biotechnol.* **10** 949
- [23] Zhu Y, Cai H J, Chen H, Xu J T, Wang Y F 2016 *Water Saving Irrigation* (8) 65 (in Chinese) [朱艳, 蔡焕杰, 陈慧, 徐家屯, 王云霏 2016 节水灌溉 (8) 65]
- [24] Ren J, Wen X M, Wang Z H, An J B 2007 *Journal of Water Resources and Water Engineering* **18** 48 (in Chinese) [任杰, 温新明, 王振华, 安俊波 2007 水资源与水工程学报 **18** 48]
- [25] Li Y, Niu W Q, Lü W, Gu J, Zou X Y, Wang J W, Liu L, Zhang M Z, Xu J 2016 *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* **32** 125 (in Chinese) [李元, 牛文全, 吕望, 古君, 邹小阳, 王京伟, 刘璐, 张明智, 许健 2016 农业工程学报 **32** 125]
- [26] Li Y, Niu W Q, Xu J, Zhang R C, Wang J W, Zhang M Z 2016 *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* **32** 147 (in Chinese) [李元, 牛文全, 许健, 张若婵, 王京伟, 张明智 2016 农业工程学报 **32** 147]
- [27] Wen G J, Cai H J, Chen X M, Liu H Y 2013 *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)* **41** 113 (in Chinese) [温改娟, 蔡焕杰, 陈新明, 刘红英 2013 西北农林科技大学学报 (自然科学版) **41** 113]
- [28] Zhu Y, Cai H J, Song L B, Chen H 2017 *T. Chin. Soc. Agric. Mach.* **48** 199 (in Chinese) [朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 陈慧 2017 农业机械学报 **32** 199]
- [29] Liu J, Cai H J, Zhang M, Chen X M, Wang J 2010 *Water Saving irrigation* 24 (in Chinese) [刘杰, 蔡焕杰, 张敏, 陈新明, 王健 2010 节水灌溉 24]
- [30] Wen G J, Cai H J, Chen X M, Wang J, Yu L Y 2014 *Agricultural Research in the Arid Areas* **32** 83 (in Chinese) [温改娟, 蔡焕杰, 陈新明, 王健, 虞连玉 2014 干旱地区农业研究 **32** 83]
- [31] Qiao J L, Zhang C, Xu J, Wang C H, Zhao Z Y, Xiao Y K 2017 *J. Irrig. Drain.* **36** 14 (in Chinese) [乔建磊, 张冲, 徐佳, 王程翰, 赵振影, 肖英奎 2017 灌溉排水学报 **36** 14]
- [32] Qiao J L, Zhang C, Xu J, Wang C H, Zhao Z Y, Xiao Y K 2017 *Journal of Chinese Agricultural Mechanization* **38** 89 (in Chinese) [乔建磊, 张冲, 徐佳, 王程翰, 赵振影, 肖英奎 2017 中国农机化学报 **38** 89]

- [33] Xiao W H, Liu Q, Yao B S, Li Z H, Peng P F 2015 *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* **37** 774 (in Chinese) [肖卫华, 刘强, 姚帮松, 李子豪, 彭沛夫 2015 江西农业大学学报 **37** 774]
- [34] Wang F X, Kang Y H, Liu S P 2006 *Agr Water Manage* **79** 248
- [35] Li Y, Niu W Q, Zhang M Z, Xue L, Wang J W 2015 *T. Chin. Soc. Agric. Mach.* **46** 121 (in Chinese) [李元, 牛文全, 张明智, 薛璐, 王京伟 2015 农业机械学报 **46** 121]
- [36] Lu Z H, Cai H J, Wang J 2011 *Water Saving Irrigation* 67 (in Chinese) [卢泽华, 蔡焕杰, 王健 2011 节水灌溉 67]
- [37] Chen H, Hou H J, Cai H J, Zhu Y 2016 *T. Chin. Soc. Agric. Eng.* **32** 111 (in Chinese) [陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 朱艳 2016 农业工程学报 **32** 111]
- [38] Chen H, Li L, Cai H J, Zhu Y, Wang Y F, Xu J T 2018 *T. Chin. Soc. Agric. Mach.* **49** 303 (in Chinese) [陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 朱艳, 王云霏, 徐家屯 2018 农业机械学报 **32** 303]
- [39] Zhu Y 2015 M.S. Thesis (Yangling: Northwest A&F University) (in Chinese) [朱艳 2015 硕士学位论文 (陕西杨凌: 西北农林科技大学)]
- [40] Lu Z H, Cai H J, Wang J, Li Z J 2012 *Scientia Agricultura Sinica* **45** 1330 (in Chinese) [卢泽华, 蔡焕杰, 王健, 李志军 2012 中国农业科学 **49** 1330]
- [41] Xiao W H, Yao B S, Zhang W P, Zhang L C, Huang W, Liu Z P 2016 *China Rural Water and Hydropower* 41 (in Chinese) [肖卫华, 姚帮松, 张文萍, 张立成, 黄蔚, 刘祝平 2016 中国农村水利水电 41]
- [42] Nan X, Huang X Q, Han Q B, Li W, Li H Y 2017 *China Rural Water and Hydropower* 10 (in Chinese) [南茜, 黄修桥, 韩启彪, 李文, 李宏燕 2017 中国农村水利水电 10]
- [43] Zhang W P, Yao B S, Xiao W H, Zou Y M 2012 *Mod. Agric. Sci. Technol.* 9 (in Chinese) [张文萍, 姚帮松, 肖卫华, 邹运梅 2012 现代农业科技 9]
- [44] Xiao W H, Yao B S, Zhang W P, Zhang L C 2014 *China Rural Water and Hydropower* 30 (in Chinese) [肖卫华, 姚帮松, 张文萍, 张立成 2014 中国农村水利水电 30]
- [45] Zhang W P, Yao B S, Xiao W H, Yang L J 2013 *J. Irrig. Drain.* **32** 142 (in Chinese) [张文萍, 姚帮松, 肖卫华, 杨良玖 2013 灌溉排水学报 **32** 142]
- [46] Yin X X, Cai H J 2014 *J. Irrig. Drain.* **33** 33 (in Chinese) [尹晓霞, 蔡焕杰 2014 灌溉排水学报 **33** 33]
- [47] Rao X J, Jiang P A, Fu Y B, Feng Y Z, Wang X Y, Wang Z G 2016 *Cotton Sci.* **28** 276 (in Chinese) [饶晓娟, 蒋平安, 付彦博, 冯耀祖, 王新勇, 王治国 2016 棉花学报 **28** 276]
- [48] Lei H J, Zang M, Zhang Z H, Liu X, Xu J X, Pan H W 2015 *J. Drain. Irrig. Mach. Eng.* **33** 253 (in Chinese) [雷宏军, 臧明, 张振华, 刘鑫, 徐建新, 潘红卫 2015 排灌机械工程学报 **33** 253]
- [49] Chen T, Yao B S, Xiao W H, Liu D D 2013 *China Rural Water and Hydropower* 70 (in Chinese) [陈涛, 姚帮松, 肖卫华, 刘朵朵 2013 中国农村水利水电 70]
- [50] Lei H J, Hu S G, Pan H W, Zang M, Liu X, Li K 2017 *Acta Pedol. Sin.* **54** 297 (in Chinese) [雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 臧明, 刘鑫, 李轲 2017 土壤学报 **54** 297]
- [51] Zheng X L, Wang R J, Zhao Q F, Liu Y P, Wang Y Y, Sun Z Q 2017 *Chin. J. Plant Ecol.* **41** 805 (in Chinese) [郑小兰, 王瑞娇, 赵群法, 刘勇鹏, 王媛媛, 孙治强 2017 植物生态学报 **41** 805]
- [52] Zhu Y, Cai H J, Song L B, Hou H J, Chen H 2016 *T. Chin. Soc. Agric. Mach.* **47** 223 (in Chinese) [朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 侯会静, 陈慧 2016 农业机械学报 **47** 223]
- [53] Zhu Y, Cai H J, Song L B, Chen H 2016 *T. Chin. Soc. Agric. Eng.* **32** 163 (in Chinese) [朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 陈慧 2016 农业工程学报 **32** 163]
- [54] Ma J M, Tian J C, Zhang R W 2017 *J. Irrig. Drain.* **36** 60 (in Chinese) [马继梅, 田军仓, 张瑞弯 2017 灌溉排水学报 **36** 60]
- [55] Liu J T, Huang W Y, Yang S H, Xu J Z, Cui J, Liao L X 2015 *Jiangsu Agricultural Sciences* **43** 389 (in Chinese) [刘锦涛, 黄万勇, 杨士红, 徐俊增, 崔杰, 廖林仙 2015 江苏农业科学 **43** 389]
- [56] Yang F, Hou H J, Cai H J, Chen H, Wang X W 2017 *China Rural Water and Hydropower* 98 (in Chinese) [杨凡, 侯会静, 蔡焕杰, 陈慧, 王晓文 2017 中国农村水利水电 98]
- [57] Chen H, Hou H J, Cai H J, Zhu Y, Wang C 2016 *Scientia Agricultura Sinica* **49** 3380 (in Chinese) [陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 朱艳, 王超 2016 中国农业科学 **49** 3380]
- [58] Du Y D, Zhang Q, Cui B J, Gu X B, Niu W Q 2017 *T. Chin. Soc. Agric. Eng.* **33** 127 (in Chinese) [杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 谷晓博, 牛文全 2017 农业工程学报 **33** 127]
- [59] Zhu Y, Cai H J, Chen H, Xu J T, Wang Y F 2016 *Water Saving Irrigation* 65 (in Chinese) [朱艳, 蔡焕杰, 陈慧, 徐家屯, 王云霏 2016 节水灌溉 65]
- [60] Zhao F Y, Yang X, Dong M M, Jiang Y, Yu K, Yu S L 2017 *T. Chin. Soc. Agric. Eng.* **33** 119 (in Chinese) [赵丰云, 杨湘, 董明明, 蒋宇, 于坤, 郁松林 2017 农业工程学报 **33** 119]
- [61] Kang Y H, Liu S H, Wan S Q, Wang R S 2013 *Paddy Water Environ* **11** 87
- [62] Lei H J, Yang H G, Feng K, Zang M, Pan H W 2017 *J. Irrig. Drain.* **36** 13 (in Chinese) [雷宏军, 杨宏光, 冯凯, 臧明, 潘红卫 2017 灌溉排水学报 **36** 13]
- [63] Zhao F Y, Yu S L, Sun J L, Jiang Y, Liu H F, Yu K 2018 *T. Chin. Soc. Agric. Mech.* **49** 228 (in Chinese) [赵丰云, 郁松林, 孙军利, 蒋宇, 刘怀锋, 于坤 2018 农业机械学报 **49** 228]
- [64] Liu S H, Kang Y H, Wan S Q, Wang Z C, Liang Z W, Jiang S F, Wang R S 2012 *Agr Water Manage* **109** 127
- [65] Ma X J, Sun J S, Liu H, Gong X W, Li H H, Cui Y S 2018 *J. Irrig. Drain.* **37** 29 (in Chinese) [马筱建, 孙景生, 刘浩, 龚雪文, 李欢欢, 崔永生 2018 灌溉排水学报 **37** 29]
- [66] Zhang W Z, Zhai G L, Wang X S, Lv M C, Xu R, Deng Z 2017 *J. Irrig. Drain.* **36** 24 (in Chinese) [张文正, 翟国亮, 王晓森, 吕谋超, 许睿, 邓忠 2017 灌溉排水学报 **36** 24]
- [67] Zhou Y P, Xu F P, Liu X J, Wang K Y, Wang X R, Li Y K 2016 *J. Irrig. Drain.* **35** 98 (in Chinese) [周云鹏, 徐飞鹏, 刘秀娟, 王克远, 王昕然, 李云开 2016 灌溉排水学报 **35** 98]
- [68] Hassanli A M, Javan M, Saadat Y 2008 *Environ Monit Assess* **144** 151

- [69] Lei H J, Liu H, Zhang Z H, Surya B, Ron B 2017 *T. Chin. Soc. Agric. Eng.* **33** 96 (in Chinese) [雷宏军, 刘欢, 张振华, Surya B, Ron B 2017 农业工程学报 **33** 96]
- [70] Tan J L, Kang Y H 2009 *Agr Sci China* **8** 1228
- [71] Wang L L, Zhai G L 2016 *Chin. Agric. Bull.* **32** 90 (in Chinese) [王帘里, 翟国亮 2016 中国农学通报 **32** 90]
- [72] Lei H J, Zhang Q, Zhang Z H, Xu J X 2013 *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)* **34** 29 (in Chinese) [雷宏军, 张倩, 张振华, 徐建新 2013 华北水利水电学院学报 **34** 29]
- [73] Hou H J, Chen H, Cai H J 2016 *Journal of Water Resources and Water Engineering* **27** 225 (in Chinese) [侯会静, 陈慧, 蔡焕杰 2016 水资源与水工程学报 **27** 225]
- [74] Wang J, Hou X Q, Li X Q, Yao Z X 2016 *Urban Roads Bridges & Flood Control* 208(in Chinese) [王健, 侯小强, 李小强, 姚正学 2016 城市道桥与防洪 208]
- [75] Niu W Q, Guo Q, Zhou X B, Helmers M J 2012 *Soil Sci Soc Am J* **76** 815
- [76] Phogat V K, Aylmore L A G 1989 *Aust J Soil Res* **27** 313
- [77] Grevers M C J, Dejong E 1994 *Sssa Spec Publ* 73
- [78] Hu Y B, Feng J, Yang T, Wang C 2014 *Hydrol Process* **28** 3419
- [79] Zhang J M, Xu Z M, Li F, Hou R J, Ren Z 2017 *J Mt Sci-Engl* **14** 474
- [80] Heijs A W J, Delange J, Schoute J F T, Bouma J 1995 *Geoderma* **64** 183
- [81] Finizola A, Aubert M, Revil A, Schutze C, Sortino F 2009 *J Volcanol Geoth Res* **183** 213
- [82] Hainsworth J M, Aylmore L A G 1983 *Aust J Soil Res* **21** 435
- [83] Anderson S H, Gantzer C J, Boone J M, Tully R J 1988 *Soil Sci Soc Am J* **52** 35
- [84] Hopmans J W, Vogel T, Koblik P D 1992 *Soil Sci Soc Am J* **56** 355
- [85] Beraldo J M G, Scannavino F D A, Cruvinel P E 2014 *Eng Agr-Jaboticabal* **34** 1162
- [86] Katuwal S, Arthur E, Tuller M, Moldrup P, de Jonge L W 2015 *Soil Sci Soc Am J* **79** 1577
- [87] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, Lamande M, Wildenschild D, de Jonge L W 2015 *Geoderma* **237** 9
- [88] Peyton R L, Anderson S H, Gantzer C J, Wigger J W, Heinze D J, Wang H 1994 *Sssa Spec Publ* 59
- [89] Shi B, Murakami Y, Wu Z, Chen J, Inyang H 1999 *Eng Geol* **54** 321
- [90] Hanson J E, Binning L K, Drieslein R A, Stoltenberg D E, Gehring M A, Bonanno A M 1991 *Preferential Flow* 129
- [91] Comina C, Cosentini R M, Della Vecchia G, Foti S, Musso G 2011 *Acta Geotech* **6** 195
- [92] Marchuk A, Rengasamy P, McNeill A, Kumar A 2012 *Soil Res* **50** 638
- [93] Tollner E W, Verma B P, Cheshire J M 1987 *T Asae* **30** 1605
- [94] Tollner E W 1991 *Agr Ecosyst Environ* **34** 251
- [95] Thieme J, Schneider G, Knochel C 2003 *Micron* **34** 339
- [96] Fischer D, Pagenkemper S, Nellesen J, Peth S, Horn R, Schloter M 2013 *J Microbiol Meth* **93** 121
- [97] Rabot E, Lacoste M, Henault C, Cousin I 2015 *Vadose Zone J* **14**
- [98] Baveye P, Rogasik H, Wendroth O, Onasch I, Crawford J W 2002 *Meas Sci Technol* **13** 775
- [99] Sleutel S, Cnudde V, Masschaele B, Vlassenbroek J, Dierick M, Van Hoorebeke L, Jacobs P, De Neve S 2008 *Comput Geosci* **34** 931
- [100] Taina I A, Heck R J, Elliot T R 2008 *Can J Soil Sci* **88** 1
- [101] Zhou H, Peng X, Peth S, Xiao T Q 2012 *Soil Till Res* **124** 17
- [102] Zhao D, Xu M X, Liu G B, Yao X, Tuo D F, Zhang R R, Xiao T Q, Peng G Y 2017 *Soil Till Res* **165** 239
- [103] Wang Y, Li C H, Hu Y Z 2018 *Arab J Geosci* **11**199
- [104] Yang Y H, Wu J C, Zhao S W, Han Q Y, Pan X Y, He F, Chen C 2018 *Sci Rep* **8**695
- [105] Zhou H, Mooney S J, Peng X H 2017 *Soil Sci Soc Am J* **81** 1270
- [106] Yu X, Fu Y, Lu S 2017 *Eur J Soil Sci* **68** 66
- [107] Yao X L, Fang L L, Qi J L, Yu F 2017 *J Offshore Mech Arct* **139**021501
- [108] Wang J M, Guo L L, Bai Z K 2017 *Arch Agron Soil Sci* **63** 1685
- [109] Rabot E, Wiesmeier M, Schluter S, Vogel H J 2018 *Geoderma* **314** 122
- [110] Han Q B, Feng S Y, Cao L L, Huang X Q, Fan Y S, Li H 2015 *J. Drain Irrig. Mach. Eng.* **33** 1001 (in Chinese) [韩启彪, 冯绍元, 曹林来, 黄修桥, 范永申, 李浩 2015 排灌机械工程学报 **33** 1001]

SPECIAL TOPIC — Critical topics in water research

Mechanism of soil environmental regulation by aerated drip irrigation*

Yang Hai-Jun¹⁾ Wu Feng^{2)†} Fang Hai-Ping^{1)‡} Hu Jun¹⁾ Hou Zheng-Chi^{1)††}

1) (*Division of Interfacial Water & CAS Key Laboratory of Interfacial Physics and Technology, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*School of water conservancy, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450046, China*)

(Received 15 July 2018; revised manuscript received 26 December 2018)

Abstract

Soil is the foundation of food security, water safety and wider ecosystem security. China's water resources is featured by its poverty and uneven distribution. Flood irrigation in traditional agriculture not only uses large amount of water, but also destroys soil aggregate structure, resulting in soil degradation, such as soil compaction and soil salinization. Underground drip irrigation have obvious water saving efficiency with the effective utilization rate of water larger than 95%, but it will also destroy the soil structure to a certain extent. It has been reported in many researches that using aerated water drip irrigation can not only increase crop yields, but also improve crop quality. The influence of several factors such as the burial depth of drop head, the frequency of dripping, the amount of irrigation, the growth period of plant, the mode of aerating and the equipment and so on, and the effects of the aerated drip irrigation on the water environment, the air environment, the microbial environment, the nutrient environment and the mineral environment of soil are summarized. And the regulation mechanism of soil environment by the aerated drip irrigation is put forward. The changes in water, gas, microorganism, nutrition and minerals are the result of the change of soil structure. The experimental results of in situ synchrotron radiation X-ray computed tomography confirmed that aerated drip irrigation can change the structure of soil.

Keywords: aerated, drip irrigation, soil environment, regulation

PACS: 92.40.Xx, 89.60.-k

DOI: 10.7498/aps.68.20181357

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1632135, 11574339).

† Corresponding author. E-mail: wufeng@ncwu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: fanghaiping@sinap.ac.cn

†† Corresponding author. E-mail: houzhenchi@sinap.ac.cn