

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.027

# 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响

朱 艳<sup>1</sup> 蔡焕杰<sup>1,2</sup> 宋利兵<sup>1,2</sup> 侯会静<sup>1</sup> 陈 慧<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;  
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为揭示温室内气候因子和加气灌溉下土壤温度、氧气含量和水分对土壤呼吸的影响,对比研究了加气灌溉和地下滴灌(对照)下,各因子与土壤呼吸速率的关系。结果表明:5 cm处土壤温度与土壤呼吸呈极显著正相关关系,加气灌溉和对照处理下相关系数分别为0.615和0.564,且两处理下5 cm处土壤温度分别解释了土壤呼吸变化的46.6%和32.4%。大气相对湿度和土壤氧气含量也影响着土壤呼吸的变化。加气灌溉和对照处理下,大气相对湿度解释了土壤呼吸速率变化的35.2%和23.7%。两处理下土壤氧气含量分别解释了20%左右的土壤呼吸变化。各因子交叉混合影响了76.8%(加气灌溉)和42.5%(对照)的土壤呼吸变化。由此可知,土壤温度是影响土壤呼吸变化的控制性因子,大气相对湿度和土壤氧气含量也是影响土壤呼吸变化的重要因子。各因子对土壤呼吸速率存在交叉影响,且加气灌溉下的拟合效果明显优于对照。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与对照差异显著,分别提高了33.16%和16.61%。加气灌溉明显改善了根区土壤环境,土壤呼吸的其他限制因素减少,因此加气灌溉下土壤温度、大气相对湿度、土壤含水率和土壤氧气含量对土壤呼吸的交叉影响更明显,对土壤呼吸变化的拟合效果更优。

**关键词:** 加气灌溉; 土壤呼吸; 土壤温度; 大气相对湿度; 土壤氧气含量

**中图分类号:** S152.7; S512.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0223-10

## Effects of Climatic Factors and Soil Parameters on Soil Respiration under Oxygation Conditions

Zhu Yan<sup>1</sup> Cai Huanjie<sup>1,2</sup> Song Libing<sup>1,2</sup> Hou Huijing<sup>1</sup> Chen Hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Oxygation, which can impose aerated water to root zone through Venturi tube and subsurface drip irrigation (SDI), has been showing yield improvement potentials and great application prospects. The impacts of climatic factors and soil temperature, oxygen concentration and moisture on soil respiration under oxygation and no aerated subsurface drip irrigation conditions were explored. Consequently, two treatments with three replicates were included. Plot experiments were conducted in a greenhouse during tomato growing season under these two different irrigation scenarios. The seasonal variation of soil respiration rate, soil temperature, soil oxygen concentration and soil moisture were described to investigate the relativity between soil respiration rate and these factors. Results showed that with oxygation and CK, soil temperature at the depth of 5 cm ( $T_5$ ) had a high significant positive correlation with soil respiration rate ( $R_s$ ), and the correlation coefficients were 0.615 and 0.564, respectively. Meanwhile, under the oxygation and CK conditions,  $T_5$  explained 46.6% and 32.4% variation of  $R_s$ , respectively.

收稿日期: 2016-07-31 修回日期: 2016-10-11  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50939005)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110204130004)  
**作者简介:** 朱艳(1989—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhuyan2015@nwsuaf.edu.cn  
**通信作者:** 蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究,E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

In addition, air humidity ( $R_H$ ) and soil oxygen concentration ( $O_s$ ) also affected the variation of  $R_s$ .  $R_H$  explained 35.2% and 23.7% variation of  $R_s$  under the oxygation and CK conditions, respectively. And  $O_s$  explained about 20% variation of  $R_s$  for the two treatments. The interaction of these factors affected 76.8% and 42.5% variation of  $R_s$  with oxygation and CK, respectively. Therefore, soil temperature was a controlling factor that constrained the soil respiration. Air humidity and soil oxygen concentration also were the important factors affecting the variation of soil respiration. Meanwhile, these factors had an interactive effect on variation of soil respiration rate, and the fitting result under oxygation was more effective. In addition, soil moisture was declined slightly with oxygation. The soil respiration rate and soil oxygen concentration under the oxygation conditions had a significant difference with CK, which were increased by 33.16% and 16.61% compared with CK, respectively. Thus, oxygation could improve soil environment effectively, and then decrease the limiting factors of soil respiration. As a result, under oxygation conditions, soil respiration was more sensitive to the interactions of soil temperature, relative humidity, soil moisture and soil oxygen concentration, and the fitness between these factors and soil respiration was better.

**Key words:** oxygation; soil respiration; soil temperature; air humidity; soil oxygen concentration

引言

通过避免表层土壤湿润、减少蒸发和深层渗漏、有效地控制径流等,地下滴灌在提高水分利用效率、节约灌溉用水和减小因灌溉对环境造成的不利影响方面显示了巨大的潜力<sup>[1-4]</sup>。地下滴灌下作物根系优先在滴头附近生长<sup>[5]</sup>,但是在灌水时甚至灌水后一段时间,滴头附近易形成持续的湿润锋而造成土壤缺氧<sup>[1,6]</sup>。与传统灌水方式相比,地下滴灌的作物产量经常没有显著性的提高,可能也是滴头附近持续的湿润锋造成的<sup>[6]</sup>。另一方面,地下滴灌下灌水频率经常较高,可能会频繁增大土壤含水量,进而造成根区土壤环境中氧气可利用性的降低<sup>[7]</sup>。地下滴灌下土壤氧气的扩散会因持续的湿润锋受到限制,进而使作物根系和作物经历缺氧<sup>[8-9]</sup>。根区氧气扩散过程也控制着用于根系呼吸的氧气的供应<sup>[10]</sup>,因此,在厌氧环境中土壤呼吸也会因土壤缺氧受到限制<sup>[11]</sup>。LOCH 等<sup>[12]</sup>和 BARBER 等<sup>[13]</sup>发现随着地下滴灌系统使用年限的增大,土壤结构和水力学特性可能会受到影响,进而影响土壤水分的分配,限制土壤氧气的有效扩散。加气灌溉是一种利用地下滴灌技术将加气灌溉水直接运输到作物根区土壤的灌水技术<sup>[14-15]</sup>。加气灌溉下氧气以气体状态悬浮和溶解氧形式溶解在加压灌溉水中通过地下滴灌管道和滴头输送到番茄根区土壤中<sup>[15]</sup>,可有效抵消地下滴灌的不利影响,缓解地下滴灌下作物的缺氧症状。

许多研究显示了加气灌溉在促进作物生长和提高产量方面的潜力和应用前景<sup>[6,16-17]</sup>。加气灌溉对作物的有利影响直接得益于加气灌溉对土壤氧气

含量和水分的有效调控。另外,土壤氧气含量和水分也是影响根系和微生物呼吸的重要因素,尤其是在易造成根区土壤水分过多和氧气缺乏的地下滴灌情况下。土壤呼吸是在消耗氧气的同时向大气中释放 CO<sub>2</sub> 的过程,而由此造成的气体含量梯度是气体扩散的驱动力。FRIEDMAN 等<sup>[18]</sup>揭露扩散是土壤和大气以及土壤和作物根系气体交换的主要体制。所以,当土壤通气性较差时,土壤呼吸(产生 CO<sub>2</sub> 的过程)会受到限制,土壤 CO<sub>2</sub> 含量会显著增大<sup>[19]</sup>。表层土壤通气性的相关研究也表明,土壤呼吸、气体扩散等在表层土壤不同程度的覆盖或裸露时形成显著差异<sup>[19-21]</sup>。另外,虽然,试验作物番茄可在多种不同类型土壤中种植,却是对过高的土壤水分和土壤氧气缺乏最敏感的作物品种之一<sup>[22-23]</sup>。因此,本试验针对温室番茄,以不加气地下滴灌为对照,研究加气灌溉(根区土壤通气)下土壤氧气含量、土壤水分对土壤呼吸的影响。关于土壤水分和土壤温度对土壤呼吸的影响的研究已较多<sup>[24-26]</sup>,但土壤氧气含量对土壤呼吸的影响及其与其他因子对土壤呼吸的交叉混合影响的相关研究相对较少。另外,土壤呼吸及其影响因子的相关研究多是在森林和草原生态系统中<sup>[27-29]</sup>,关于农田生态系统的研究较少,关于种植作物温室中土壤呼吸的变化及其影响因子的研究则更少。而且关于加气灌溉的研究多是在促进作物生长、提高产量和水分利用效率方面,关于加气灌溉下根区土壤环境,像土壤呼吸、水分、氧气含量和温度变化的全面研究较少。

本文通过试验分析温室内的气候因子(大气温度、大气相对湿度)和加气灌溉下土壤参数(土壤温度、氧气含量和水分)对土壤呼吸的影响,通过与不

加气地下滴灌相比,分析加气灌溉对温室番茄根区土壤环境的影响,旨在探索加气灌溉下土壤环境的变化,为更深入地理解加气灌溉下土壤各环境因子间的关系提供理论指导,也可为加气灌溉的田间实践提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室(北纬 34°20′、东经 108°24′,海拔高度为 521 m)的日光温室内进行。温室内土壤类型为壤土,土壤质地为粘壤土,其中砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 26.0%、33.0%、41.0%(质量分数);0~50 cm 土层内每 10 cm 土层的平均土壤干容重分别为 1.27、1.34、1.42、1.37、1.33 g/cm<sup>3</sup>;0~60 cm 土层内土壤平均田间持水率为 32.1%(体积含水率),pH 值为 7.82。年平均日照时数为 2 163.8 h,无霜期为 210 d。

1.2 试验方法与设计

试验番茄品种为金鹏 10 号,属中早熟品种。试验地内每垄垄长 4 m、宽 0.8 m,每垄移植 11 株番茄苗,株距 35 cm。临近的两垄之间用埋深 100 cm 的塑料膜隔开,防止侧渗。1 垄即为 1 个试验小区。于 2015 年 8 月 31 日进行移植,移植时保证番茄幼苗为 3 叶 1 心至 4 叶 1 心,移植当天浇透底水,以保证番茄幼苗的成活。一般缓苗时间为 7~10 d,试验于 2015 年 9 月 9 日正式开始。三穗时打顶,其他日常管理措施均按照当地的管理措施进行。番茄全生育期时长 137 d,生育期划分为:苗期(2015-09-09—2015-09-28)、开花期(2015-09-29—2015-10-06)、结果期(2015-10-07—2015-12-02)、成熟期(2015-12-03—2016-01-16),自 2015-09-12 开始试验处理。

试验设 2 种灌水方式,分别为加气灌溉(OX)和不加气灌溉(对照处理,CK)。每个处理 3 次重复,1 次重复即为 1 个小区,试验共 6 个小区。不加气灌溉为地下滴灌,滴头埋深为 15 cm,距离作物茎秆 10 cm,滴头间距为 35 cm。加气灌溉试验中,Mazzei287 型文丘里加气设备安装在灌水毛管的首端,在毛管的进出水口均装有压力表,灌水时通过水泵形成加压灌溉水,同时调节灌水总管道末端的调节阀,保证灌水时每垄进口压力为 0.1 MPa,出口压力为 0.02 MPa,由排气法测得进气量占灌溉水量的 17%(体积分数)<sup>[30]</sup>。灌溉毛管中多余的水均可回流到供水水桶中。

通过放置在番茄冠层 20 cm 处的 E601 型标准

蒸发皿测得的蒸发量控制灌水量。灌水周期为 3~4 d 灌 1 次,在 08:00—12:00 之间进行,灌水量以灌水间隔内每天 08:00 测定的蒸发量为依据,计算公式<sup>[31]</sup>为

W=AEpankcp(1)

式中 W——灌溉水量,L  
A——单个滴头控制的小区面积,为 0.14 m<sup>2</sup>  
(0.35 m×0.4 m)  
Epan——2 次灌水时间间隔内的蒸发量,mm  
kcp——作物皿系数,取 1.0

BHATTARAI 等<sup>[14]</sup>研究表明,在相同灌水量下,与地下滴灌相比,加气灌溉在灌水的同时吸入空气,因此加气灌溉的灌水时间需要一定的延长。本试验中针对这一问题也进行了相关研究,得出了相同的结论。本试验中,在滴头流量为 4 L/h 的前提下,加气灌溉的灌水时间比不加气灌溉延长了约 3 min/L。

1.3 测定指标与方法

气象数据:温室内大气温度(Ta,℃),大气相对湿度(RH,%),净辐射(Rn,MJ/(m<sup>2</sup>·d))等气象数据,利用位于温室中部的自动气象站(Hobo, Onset Computer Corp., USA)采集。小型气象站距离地面 2 m 高度,每 5 s 采集一次数据,每 15 min 记录一次。

土壤呼吸速率(Rs):利用 Li-6400 型便携式气体分析系统连接 Li-6400-09 型土壤呼吸室测定。提前 24 h 选择每垄靠近中间的 2 株植株,分别在 1/2 株距处和距离其中一株植株 5 cm 处插入 PVC 环(内径为 10.2 cm,高为 5 cm),插入深度为 2 cm,每个处理的土壤呼吸速率为 6 个环测得的平均值,每个环测得的土壤呼吸速率是仪器 2 次循环测量的平均值。从 9 月 9 日起,每隔 10~15 d 测定一次,在 07:00—09:00 之间进行测量,相关研究表明该时段测得的土壤呼吸速率可以代表当日的平均值<sup>[32-33]</sup>。

土壤氧气含量(Os):利用光纤式氧气测量仪(Fiber-optic oxygen meter firesting O2)和氧气敏感探针(Robust oxygen miniprobe)测定。提前 24 h 选择每垄靠近中间的一株植株插入探针,探针插入深度为 10 cm,距离作物茎秆 5 cm,插入探针时造成的土壤孔洞用湿土封实,然后将塑料薄膜覆好,尽可能避免大气对土壤空气的扰动。每次测定时间基本与土壤呼吸速率同步。因探针数量有限,每个处理只测 1 次重复,从 07:00—09:00 每 1 min 记录 1 次数据,仪器具体使用方法参照朱艳等<sup>[30]</sup>的方法。

土壤温度和土壤含水率:土壤温度(Ts)利用曲管地温计测定,每组地温计分 5 个深度插入,分别为 5、10、15、20、25 cm,每个小区埋入 1 组地温计。利用土钻取 0~50 cm 的土壤测定土壤质量含水率

( $\theta$ ),每 10 cm 为一层。土壤体积含水率( $W_s$ )为土壤质量含水率与土壤干容重的乘积(每 10 cm 为一层,分层计算)。土壤温度和土壤含水率的测定均与土壤呼吸速率同步。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 17.0 统计软件进行显著性和相关关系分析。用 SigmpPlot 12.0 绘图。

土壤呼吸速率与单个影响因子的拟合方程采用二次方程、指数方程、幂函数和线性方程 4 种形式。土壤呼吸速率与各因子的交叉混合作用的拟合采用线性方程

$$R_s = aT + bO_s + cR_H + dW_s + eTO_s + fTR_H + gTW_s + h$$

(2)

式中  $a、b、c、d、e、f、g$ ——系数  
 $h$ ——常数

为进一步寻求更优的方程,式(2)中贡献较小的项会被剔除,直至找到决定系数  $R^2$  最高的方程,最后剩余各项组成的方程即为式(2)的最终形式。选择  $T_a$ 和  $T_s$ 中与土壤呼吸相关系数最大者作为系数  $a、e、f、g$  对应各项中的  $T$ 。

2 结果与分析

2.1 加气灌溉对土壤呼吸和土壤参数的影响

土壤呼吸速率(以  $CO_2$  计)在番茄结果期(第 50~80 天)较高(图 1a,图中不同字母表示同一次测量中处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同),在第 31、107 天出现 2 个较低的转折点,变化规律与大气

温度  $T_a$ 和 5 cm 处土壤温度  $T_s$ 的变化趋势基本相同(图 1),与大气相对湿度的变化趋势相似。加气灌溉的土壤呼吸速率一直高于不加气灌溉,除初始值外,在整个生长期内基本均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。加气和不加气灌溉处理土壤呼吸速率的平均值分别为  $1.835 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和  $1.378 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,加气灌溉下土壤呼吸速率增大了 33.16%。

大气温度和 5 cm 处土壤温度的变化规律基本相同,在整个生育期内均大体呈下降的趋势,最低点出现在第 107 天(图 1b)。大气湿度在整个生育期内的波动比较大,最低、最高点分别出现在第 40 天和第 70 天左右,均在番茄结果期内。虽然 2 个处理 5 cm 处土壤温度曲线相近,但是在整个生育期内加气灌溉处理的土壤温度均显著高于不加气灌溉处理( $P < 0.05$ ),加气灌溉处理 5 cm 处土壤温度平均值为  $15.7^\circ\text{C}$ ,比对照提高了  $1.1^\circ\text{C}$ (CK 为  $14.6^\circ\text{C}$ )。其他深度的土壤温度变化规律与 5 cm 处土壤温度相似,未在图中展示。

整个生育期内,土壤氧气含量基本呈上升的趋势(图 1c),且 2 个处理间存在显著差异( $P < 0.05$ )。对照处理土壤氧气含量平均值为  $5.90 \text{ mL/L}$ ,加气灌溉处理为  $6.88 \text{ mL/L}$ ,比对照增大了 16.61%。土壤含水率在番茄生长前期较高且波动较大,在生长中后期变化幅度较小(图 1d)。对照处理 0~10 cm 土壤体积含水率和 10~20 cm 土壤体积含水率(分别用  $W_{10}$ 和  $W_{20}$ 表示)均高于加气灌溉处理,部分测定点存在显著差异( $P < 0.05$ )。加气灌溉 0~10 cm

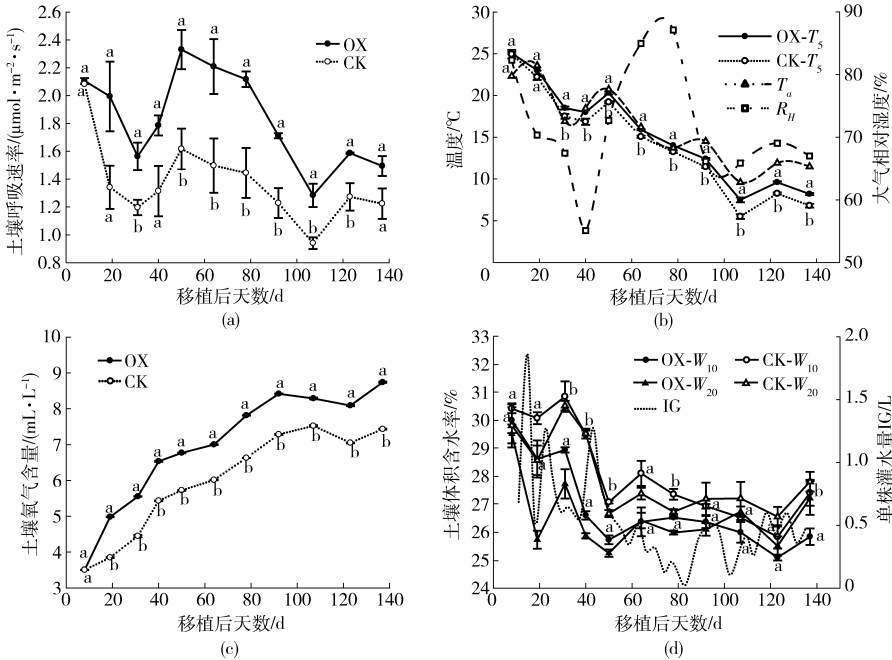


图 1 番茄整个生长期内加气(OX)和不加气灌溉(CK)下土壤呼吸速率、土壤温度、土壤体积含水率和土壤氧气含量的变化  
Fig. 1 Variations of soil respiration rate, soil temperature, soil moisture and soil oxygen concentration under conditions of oxygation (OX) and no aeration (CK) during growing season of tomato

和 10 ~ 20 cm 土壤体积含水率的平均值分别为 26.92%、26.55%，比对照处理分别下降了 4.5% 和 5.2%（对照处理分别为 28.19% 和 28.00%）。其他深度的土壤体积含水率变化规律与 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度的规律类似,图中未展示。

2.2 土壤呼吸与各影响因子的关系

通过比较各深度土壤温度和土壤体积含水率与土壤呼吸速率之间的相关系数,得出 5 cm 处土壤温度和 0 ~ 10 cm 土壤体积含水率与土壤呼吸速率之间的相关系数最大,因此在表 1 中仅分别展示了这两者与土壤呼吸速率之间的相关系数。另外,由于 5 cm 处土壤温度和大气温度是相关的,两者与土壤呼吸速率间的相关系数差异不大,5 cm 处土壤温度

与土壤呼吸速率的相关系数略大于大气温度与土壤呼吸速率间的相关系数,因此不再分析大气温度与土壤呼吸速率间的相关关系。

两处理中土壤呼吸速率与 5 cm 处土壤温度和大气相对湿度均存在极显著正相关关系,与土壤氧气含量间显著负相关(表 1)。但是,两处理中土壤呼吸速率与 0 ~ 10 cm 土壤含水率均没有显著相关关系。按相关系数大小,影响加气灌溉和对照处理土壤呼吸速率的各因子由大到小排序为:5 cm 处土壤温度、大气相对湿度、土壤氧气含量、0 ~ 10 cm 土壤体积含水率。由此可知,5 cm 处土壤温度对土壤呼吸速率的贡献均最大,0 ~ 10 cm 土壤体积含水率对土壤呼吸速率的贡献均最小。

表 1 加气灌溉与对照处理土壤呼吸速率与各影响因子之间的相关系数

| Tab.1 Correlation coefficients of soil respiration rates and its affecting factors under conditions of oxygation and CK |                   |            |                |                       |            |           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|----------------|-----------------------|------------|-----------|------------|
| 处理                                                                                                                      | 因子                | 土壤呼吸<br>速率 | 5 cm 处<br>土壤温度 | 0 ~ 10 cm 土壤<br>体积含水率 | 土壤氧气<br>含量 | 大气温度      | 大气相对<br>湿度 |
| 加气灌溉(OX)                                                                                                                | 土壤呼吸速率            | 1          | 0.615 **       | 0.150                 | -0.399 *   | 0.608 **  | 0.566 **   |
|                                                                                                                         | 5 cm 处土壤温度        |            | 1              | 0.723 **              | -0.925 **  | 0.973 **  | 0.243      |
|                                                                                                                         | 0 ~ 10 cm 土壤体积含水率 |            |                | 1                     | -0.853 **  | 0.636 **  | 0.198      |
|                                                                                                                         | 土壤氧气含量            |            |                |                       | 1          | -0.861 ** | -0.220     |
|                                                                                                                         | 大气温度              |            |                |                       |            | 1         | 0.142      |
|                                                                                                                         | 大气相对湿度            |            |                |                       |            |           | 1          |
|                                                                                                                         |                   |            |                |                       |            |           |            |
| 对照(CK)                                                                                                                  | 土壤呼吸速率            | 1          | 0.564 **       | 0.278                 | -0.469 **  | 0.537 **  | 0.476 **   |
|                                                                                                                         | 5 cm 处土壤温度        |            | 1              | 0.749 **              | -0.937 **  | 0.967 **  | 0.271      |
|                                                                                                                         | 0 ~ 10 cm 土壤体积含水率 |            |                | 1                     | -0.868 **  | 0.686 **  | -0.002     |
|                                                                                                                         | 土壤氧气含量            |            |                |                       | 1          | -0.895 ** | -0.169     |
|                                                                                                                         | 大气温度              |            |                |                       |            | 1         | 0.142      |
|                                                                                                                         | 大气相对湿度            |            |                |                       |            |           | 1          |
|                                                                                                                         |                   |            |                |                       |            |           |            |

注: \*\*表示在  $P < 0.01$  水平极显著相关, \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著相关。样本数量  $n$  为 33,下同。

加气灌溉下 5 cm 处土壤温度以幂函数形式解释土壤呼吸速率变化的 46.6%,对照处理以二次式的形式解释土壤呼吸速率变化的 32.4% ( $P < 0.01$ ) (表 2)。用这 4 种方程中任何一种形式来拟合土壤呼吸速率,加气灌溉下土壤呼吸速率对 5 cm 处土壤温度的敏感性都高于对照处理,加气灌溉下 5 cm 处土壤温度可解释土壤呼吸速率变化的 40% 左右,而

对照处理可解释 30% 左右。虽然两处理的拟合方程不同,但是在番茄整个生育期内,土壤呼吸速率均随着土壤温度的升高而增大(图 2a、图 3a)。

加气灌溉和对照处理下大气相对湿度均以二次式的形式分别解释了土壤呼吸速率变化的 35.2% 和 23.7% ( $P < 0.01$ ) (表 3)。类似于用 5 cm 处土壤温度拟合土壤呼吸速率,用大气相对湿度拟合土

表 2 5 cm 深度处土壤温度 ( $T_s$ ) 与土壤呼吸速率 ( $R_s$ ) 的回归关系

| Tab.2 Regression correlation between soil temperature at 5 cm depth ( $T_s$ ) and soil respiration rate ( $R_s$ ) |      |                                        |       |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------|-------|----------|
| 处理                                                                                                                | 函数形式 | 拟合方程                                   | $R^2$ | $P$      |
| 加气灌溉(OX)                                                                                                          | 二次式  | $R_s = -0.003T_s^2 + 0.145T_s + 0.483$ | 0.449 | <0.000 1 |
|                                                                                                                   | 指数   | $R_s = 1.267\exp(0.022T_s)$            | 0.402 | <0.000 1 |
|                                                                                                                   | 幂函数  | $R_s = 0.713T_s^{0.346}$               | 0.466 | <0.000 1 |
|                                                                                                                   | 线性   | $R_s = 0.039T_s + 1.217$               | 0.378 | <0.000 1 |
| 对照(CK)                                                                                                            | 二次式  | $R_s = 0.001T_s^2 + 0.009T_s + 1.063$  | 0.324 | 0.003    |
|                                                                                                                   | 指数   | $R_s = 0.98\exp(0.021T_s)$             | 0.311 | 0.001    |
|                                                                                                                   | 幂函数  | $R_s = 0.669T_s^{0.266}$               | 0.311 | 0.001    |
|                                                                                                                   | 线性   | $R_s = 0.03T_s + 0.933$                | 0.318 | 0.001    |

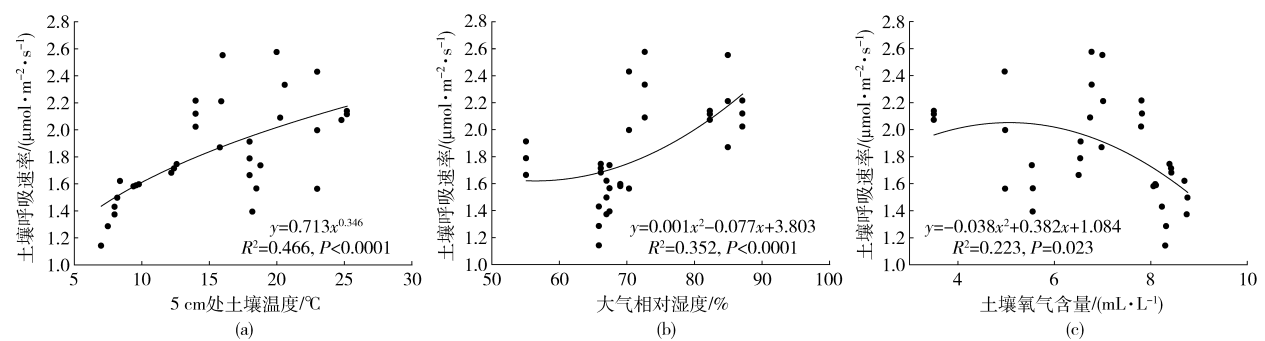


图2 加气(OX)处理下各影响因子与土壤呼吸速率间的回归方程

Fig.2 Regression equation between factors and soil respiration under condition of oxygation (OX)

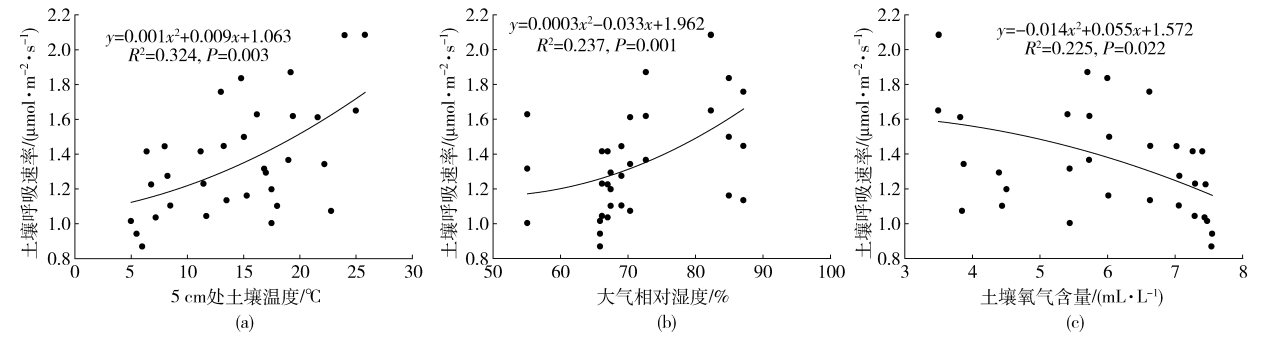


图3 不加气(CK)处理下各影响因子与土壤呼吸速率间的回归方程

Fig.3 Regression equation between factors and soil respiration under condition of no aeration (CK)

表3 大气相对湿度( $R_H$ )与土壤呼吸速率( $R_s$ )的回归关系

Tab.3 Regression correlation between relative humidity ( $R_H$ ) and soil respiration rate ( $R_s$ )

| 处理       | 函数形式 | 拟合方程                                   | $R^2$ | $P$      |
|----------|------|----------------------------------------|-------|----------|
| 加气灌溉(OX) | 二次式  | $R_s = 0.001R_H^2 - 0.077R_H + 3.803$  | 0.352 | <0.000 1 |
|          | 指数   | $R_s = 0.752\exp(0.012R_H)$            | 0.311 | <0.000 1 |
|          | 幂函数  | $R_s = 0.05R_H^{0.843}$                | 0.290 | <0.000 1 |
|          | 线性   | $R_s = 0.022R_H + 0.226$               | 0.320 | <0.000 1 |
| 对照(CK)   | 二次式  | $R_s = 0.0003R_H^2 - 0.033R_H + 1.962$ | 0.237 | 0.001    |
|          | 指数   | $R_s = 0.583\exp(0.012R_H)$            | 0.219 | 0.001    |
|          | 幂函数  | $R_s = 0.043R_H^{0.805}$               | 0.208 | 0.003    |
|          | 线性   | $R_s = 0.016R_H + 0.189$               | 0.237 | 0.001    |

壤呼吸速率仍是加气灌溉下土壤呼吸速率对大气相对湿度的敏感性高于对照处理。当用二次方程拟合土壤呼吸速率与大气相对湿度之间的关系时,2个处理土壤呼吸速率随大气相对湿度的变化趋势相似,均随大气相对湿度的增大而增大(图2b、图3b)。

加气灌溉和对照处理下土壤氧气含量仍是分别用二次式的形式解释土壤呼吸速率变化时,方程的 $R^2$ 最高,分别为0.223和0.225( $P<0.05$ )(表4)。不同于土壤呼吸速率对土壤温度和大气湿度的敏感性,土壤呼吸对土壤氧气含量的敏感性在对照处理下相对略高。两处理下土壤氧气含量均只解释了土壤呼吸速率的20%左右,低于土壤温度和大气湿度对土壤呼吸速率的影响。加气灌溉下,当土壤氧气含量低于5.03 mL/L时,土壤呼吸速率随土壤氧气含量的增大而增大,当土壤氧气含量高于5.03 mL/L

时,土壤呼吸速率随土壤氧气含量的增大而减小(图2c)。且从图中可看出,土壤氧气含量大部分实测值大于5.03 mL/L,即加气灌溉大部分情况下土壤呼吸随土壤氧气含量的增大而减小。对照处理下的情形不同于加气灌溉,土壤呼吸随土壤氧气含量的增大一直是减小的(图3c)。所以在大部分情况下,两处理均是随着土壤氧气含量的增大,土壤呼吸速率减小,这也与土壤呼吸速率与土壤氧气含量显著负相关吻合(表1)。

综合考虑各因子对土壤呼吸速率的交叉影响,利用方程式(2)可得出如下线性方程如表5所示。

综合考虑各因子的影响作用,线性方程的 $R^2$ 高于任何一个单因子回归方程。加气灌溉下各影响因子可解释土壤呼吸速率76.8%的变化,与对照处理下只可解释土壤呼吸速率42.5%的变化相比,加气

表 4 土壤氧气含量 ( $O_s$ ) 与土壤呼吸速率 ( $R_s$ ) 的回归关系

Tab. 4 Regression correlation between soil oxygen concentration ( $O_s$ ) and soil respiration rate ( $R_s$ )

| 处理        | 函数形式 | 拟合方程                                   | $R^2$ | $P$   |
|-----------|------|----------------------------------------|-------|-------|
| 加气灌溉 (OX) | 二次式  | $R_s = -0.038O_s^2 + 0.382O_s + 1.084$ | 0.223 | 0.023 |
|           | 指数   | $R_s = 2.581\exp(-0.052O_s)$           | 0.170 | 0.017 |
|           | 幂函数  | $R_s = 3.107O_s^{-0.288}$              | 0.146 | 0.028 |
|           | 线性   | $R_s = -0.092O_s + 2.469$              | 0.159 | 0.022 |
| 对照 (CK)   | 二次式  | $R_s = -0.014O_s^2 + 0.055O_s + 1.572$ | 0.225 | 0.022 |
|           | 指数   | $R_s = 2.068\exp(-0.075O_s)$           | 0.212 | 0.007 |
|           | 幂函数  | $R_s = 2.644O_s^{-0.394}$              | 0.205 | 0.008 |
|           | 线性   | $R_s = -0.107O_s + 1.994$              | 0.220 | 0.006 |

表 5 各因子与土壤呼吸速率 ( $R_s$ ) 的回归关系

Tab. 5 Regression correlation between soil respiration rate ( $R_s$ ) and factors

| 处理        | 自变量                             | 拟合方程                                                               | $R^2$ | $P$      |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------|----------|
| 加气灌溉 (OX) | $R_H, W_{10}, O_s, T_5, W_{10}$ | $R_s = 0.017R_H - 0.136W_{10} + 0.197O_s + 0.003T_5W_{10} + 1.686$ | 0.768 | <0.000 1 |
| 对照 (CK)   | $T_5, R_H, T_5O_s, T_5R_H$      | $R_s = -0.185T_5 - 0.032R_H + 0.006T_5O_s + 0.003T_5R_H + 3.014$   | 0.425 | <0.000 1 |

灌溉下各因子的交叉拟合效果明显提高。

3 讨论

3.1 加气灌溉下土壤环境的变化

本试验中,与对照相比,加气灌溉下土壤呼吸速率和土壤氧气含量显著增大,分别提高了 33.16% 和 16.61%。BHATTARAI 等<sup>[14]</sup>的研究也表明对照不加气灌溉,在番茄开花期加气灌溉下土壤中溶解氧增大了 14.1%。同时,BHATTARAI 等<sup>[14]</sup>也探索了灌水后土壤氧气含量的变化情况,结果表明加气灌溉下土壤溶解氧含量仅下降了 25%,而不加气灌溉下降了 45%。由此可知,地下滴灌灌水时或灌水后一段时间根区易遭受缺氧的危害。在土壤湿度较高的情况下,土壤水分对土壤呼吸的影响主要受氧气浓度的控制<sup>[34]</sup>。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<sup>[35-36]</sup>。因此与对照相比,加气灌溉下较高的土壤呼吸速率可能得益于较高的土壤氧气含量和进而改善的土壤环境。李元等对大棚甜瓜的研究也表明,加气灌溉改善了土壤水气环境,促进了土壤微生物数量和多样性的变化<sup>[37]</sup>。BHATTARAI 等<sup>[38]</sup>对枣树和棉花的研究结果也表明,与不加气灌溉相比,加气灌溉下土壤呼吸速率分别增大到 124% 和 183%。但是 HOU 等<sup>[17]</sup>在其试验地温室内的研究结果表明加气灌溉对 CO<sub>2</sub> 累积排放量没有造成显著性影响,可能是因为该试验中土壤呼吸的测定仪器、收集和分析气体的方法均与之不同所致。

本试验中,与对照相比,加气灌溉下土壤温度和土壤含水率也有所改变,5 cm 处土壤温度升高了 1.1℃,0 ~ 20 cm 土壤含水率下降了 5% 左右。

WOLF<sup>[39]</sup>将土壤中空气、水分和养分的最优平衡状态定义为“金三角(Fertile triangle)”,当达到这种最优平衡状态时,作物生产力可达到最大。加气灌溉下根系缺氧的状况得到有效改善,虽然“金三角”的状态几乎很少能达到,但是加气灌溉下的根系土壤环境也可能在接近这种状态或达到一种适宜的平衡。LETEY 等<sup>[40]</sup>也提出当土壤中溶解氧或氧气扩散速率下降到临界值以下时,作物对养分和水分的吸收和运输会显著减少。加气灌溉下,土壤氧气含量显著增大,根系缺氧状况得到明显改善,因此作物对水分和养分的吸收会优于对照,进而土壤含水率会有所下降。关于加气灌溉的研究也均表明加气灌溉下作物水分利用效率会得到提高<sup>[1,11,38]</sup>。另外,良好的土壤环境也保证了土壤微生物旺盛的生长和繁殖活动,因此加气灌溉下土壤温度也显著提高。

3.2 土壤呼吸速率与各因子之间的相关关系

在番茄的整个生长期内,除个别测定点外,大气温度和 5 cm 处土壤温度均与土壤呼吸速率的变化趋势相似(图 1a、1b)。但是大气温度和土壤温度随着季节的变化一直在下降。而土壤呼吸速率在番茄开花结果期达到最大值。BUCHMANN<sup>[27]</sup>的研究表明,4 个云冷杉试验站点的 5 cm、10 cm 和 15 cm 的土壤温度与土壤呼吸速率呈现相同显著的季节性变化过程。ZHANG 等<sup>[41]</sup>研究了中国西北部沙漠灌木丛 2005 年 3—10 月份土壤呼吸的影响因子,结果表明土壤呼吸速率随大气温度呈现类似的季节性变化趋势。但是本试验中土壤和大气温度的最高点却与土壤呼吸的最高点不对应。一方面可能是因为虽然土壤和大气温度在第 1 次测定时最高,但是此时番茄幼苗刚刚缓苗结束,生长并不旺盛,因此土壤呼吸

受到限制;另一方面可能是由于移苗时浇透底水,第一次测定时土壤含水率过高,而土壤氧气含量最低,因此土壤呼吸速率也有可能受到土壤含水率和土壤氧气含量的限制。而 10 月中上旬土壤和大气温度略有回升,番茄生命活动也逐渐旺盛,因此土壤呼吸速率在此时(第 50 天)达到最高值。已有研究表明作物生长旺盛期,营养和生殖生长最旺盛时,土壤呼吸作用也达到峰值<sup>[42-43]</sup>。在番茄开花结果期(第 50~80 天),虽然土壤温度明显下降,但是土壤呼吸的下降较为缓慢,可能也是因为开花结果期是番茄生命力最为旺盛的时段。

除去番茄不同生育期可能会对土壤呼吸速率造成影响外,在番茄整个生长期内,土壤温度与土壤呼吸速率呈极显著正相关关系(表 1)。加气灌溉和对照处理下土壤温度各解释了土壤呼吸速率变化的 45% 和 30% 左右,由此可知土壤温度是土壤呼吸速率变化的一个重要影响因子。这与大部分研究结果是一致的。温度几乎影响土壤呼吸过程的各个方面,包括生物化学反应、土壤底物和氧气的运输等<sup>[34]</sup>,根系生长和呼吸,微生物群体的生长和呼吸也依赖着适宜的温度<sup>[44-46]</sup>。同时,土壤温度还可以通过改变土壤含水率而对土壤呼吸造成间接影响<sup>[37]</sup>。本试验中,土壤温度与土壤含水率和土壤氧气含量也呈极显著的相关关系,由此可知,土壤温度不仅直接影响土壤呼吸速率的变化,还通过影响土壤含水率和土壤氧气含量间接影响土壤呼吸速率的变化。从各因子可交互影响土壤呼吸速率的 76.8% 和 42.5%,明显优于土壤温度仅影响土壤呼吸速率的 46.6% 和 32.4% 也可看出。

本试验中灌水量是依据蒸发量计算的,蒸发量受温室内大气温湿度的影响,灌水量会直接影响土壤各因子,如土壤水分、土壤温度、土壤氧气含量、土壤呼吸、土壤微生物等。因此在温室相对封闭的小环境中,气候变化会直接间接影响土壤呼吸速率的变化。从大气温湿度与土壤呼吸速率的变化趋势相似也可看出(图 1a、1b)。赵冰清等<sup>[47]</sup>的研究表明,大气湿度对土壤呼吸速率的直接影响较大,为 0.549,但通过土壤温度和大气温度对土壤呼吸速率有较大的负间接影响作用,因此大气湿度对毛竹林土壤呼吸速率的影响不明显。本试验中大气相对湿度通过其他因子对土壤呼吸速率的间接影响不显著,主要是存在极显著的正直接影响作用(表 1)。加气灌溉和对照处理下,大气相对湿度可分别解释土壤呼吸速率变化的 35.2% 和 23.7% 左右,由此可知本试验中大气相对湿度是影响土壤呼吸速率的另一重要因子。

土壤呼吸的过程是作物根系和土壤微生物等消耗氧气、释放 CO<sub>2</sub> 的过程。因此本试验中,土壤呼吸速率和土壤氧气含量的变化大体呈现此消彼长的趋势(图 2c、图 3c),土壤氧气含量与土壤呼吸速率呈显著负相关关系(表 1)。土壤呼吸,包括底物分解、微生物呼吸、根系呼吸等,均与土壤氧气的消耗相对应,且这些过程通常都是随着温度的增大(下降)而增大(下降)<sup>[48]</sup>。本试验中,土壤温度与土壤氧气含量也呈极显著负相关关系(表 1),且在番茄整个生长期内,土壤温度与土壤氧气含量的变化趋势也相反(图 1)。与对照相比,加气灌溉下土壤呼吸和土壤氧气含量均显著增大。加气灌溉下伴随着土壤通气性的改善,土壤环境得到有效改善,一是作物根系和土壤微生物对水分的利用增大,因此随着土壤含水率的下降土壤氧气含量会增大,二是随着土壤通气性的改善,伴随着经常的灌水,土壤空气的流通及和大气空气的交换作用增强,土壤氧气含量也会随之增大。所以,加气灌溉下即使因土壤呼吸作用的增强对氧气的消耗增大,土壤氧气含量仍显著高于对照。相比于对照,加气灌溉下显著增大的土壤呼吸和土壤氧气含量得益于改善的土壤通气性和土壤环境。

本试验中,除了因移苗时浇透底水导致前期土壤含水率较大外,土壤含水率在整个生长期内变化规律不是很明显,对土壤呼吸的影响也较小。YAN 等<sup>[26]</sup>的研究表明当土壤质量含水率低于 14.8% 或高于 26.2% 时,土壤呼吸速率与土壤含水率线性相关,但当土壤质量含水率在 14.8%~26.2% 之间时,土壤呼吸速率与土壤含水率没有显著相关关系。很多研究也表明土壤湿度只有在最低和最高的情况下才会抑制土壤呼吸速率,土壤呼吸速率的最适含水率可能有一个较宽的范围<sup>[49-50]</sup>。本试验中,土壤含水率可能处在最适含水率范围内,因此土壤呼吸速率与土壤含水率间没有显著的相关关系。

大气温湿度、土壤温度、土壤氧气含量和土壤含水率之间是相互影响的(表 1),因此各因子的交互混合对土壤呼吸变化的拟合效果明显优于单因子,而且加气灌溉下各因子的交叉拟合效果明显优于对照。BUCHMAN 的<sup>[27]</sup>研究表明随表层土壤通气性的下降,土壤的相对表观气体扩散系数和土壤呼吸速率明显下降,细根密度也显著下降,而土壤中 CO<sub>2</sub> 含量却明显增大。BHATTARAI 等<sup>[3]</sup>也提出当土壤孔隙中的土壤含水率增大时,土壤中的气体交换呈指数形式下降,当土壤达到饱和时,气体交换功能会停止。本试验中对照处理是地下滴灌,滴头附近土壤经常容易接近饱和,土壤氧气可利用性低,土壤通

气性差,因此  $O_2$  的扩散、底物的运输、根系的生长、 $CO_2$  的排放等都有可能被影响,进而成为土壤呼吸的限制因素。因此对照处理下仅用大气温湿度、土壤温湿度和土壤氧气含量对土壤呼吸进行拟合,效果较差。而加气灌溉得益于改善的根区土壤环境,土壤呼吸的各影响因子可能处于合适的范围而不再是限制因素,因此大气温湿度、土壤温湿度和土壤氧气含量对土壤呼吸的拟合效果明显优于对照。

## 4 结论

(1) 5 cm 处土壤温度是影响温室番茄土壤呼吸速率变化的控制性因子,加气灌溉和对照处理下分

别解释了土壤呼吸变化的 46.6% 和 32.4%。大气相对湿度、土壤氧气含量与土壤呼吸速率也呈显著相关关系,是影响土壤呼吸变化的重要因子。气候因子和土壤参数的交叉混合对土壤呼吸的拟合优于单因子,加气灌溉和对照处理下各解释了土壤呼吸变化的 76.8% 和 42.5%,加气灌溉下的拟合效果明显优于对照。

(2) 加气灌溉下根区土壤环境得到明显改善,与对照相比,土壤呼吸速率增大了 33.16%,土壤氧气含量提高了 16.61%,5 cm 处土壤温度升高了 1.1℃,0~10 cm 土壤体积含水率下降了 4.5%。

## 参 考 文 献

- 1 CAMP C R. Subsurface drip irrigation: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1353–1367.
- 2 QASSIM A. Subsurface irrigation: a situation analysis[R]. International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage. DPI, Victoria, 2003.
- 3 BHATTARAI S P, MIDMORE D J, SU N. Sustainable irrigation to balance supply of soil water, oxygen, nutrients and agro-chemicals [M]//ERIC Lichtfouse. Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture, New York: Springer, 2010: 253–286.
- 4 LI Y, NIU W, XU J, et al. Root morphology of greenhouse produced muskmelon under sub-surface drip irrigation with supplemental soil aeration[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 287–294.
- 5 MACHADO R M A, DO ROSARIO M, OLIVEIRA G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality undersubsurface drip irrigation [M]//JUN Abe. Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth, Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 333–341.
- 6 BHATTARAI S P, DHUNGEL J, MIDMORE D J. Oxygation improves yield and quality and minimizes internal fruit crack of cucurbits on a heavy clay soil in the semi-arid tropics[J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 2(3): 17–25.
- 7 KLÄRING H P, ZUDE M. Sensing of tomato plant response to hypoxia in the root environment[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(1): 17–25.
- 8 KLEPPER B. Crop root system response to irrigation[J]. Irrigation Science, 1991, 12(3): 105–108.
- 9 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.
- 10 BENJAMIN J G, NIELSEN D C, VIGIL M F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production[J]. Geoderma, 2003, 116(1): 137–148.
- 11 GAMBRELL R P, PATRICK Jr W H. Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments[M]//HOOK D D, CRAWFORD R M M. Plant Life in Anaerobic Environments, Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers, 1978: 375–423.
- 12 LOCH R J, GRANT C G, MCKENZIE D C, et al. Improving plants' water use efficiency and potential impacts from soil structure change-research investment opportunities[R]. CRCIF Technical Report, 2005: 3.14/1.
- 13 BARBER S A, KATUPITIYA A, HICKEY M. Effects of long-term subsurface drip irrigation on soil structure[C]//Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference, 2001.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 DHUNGEL J K, MIDMORE D J, WALSH K B, et al. Oxygation enhanced pineapple yield and quality[J]. Acta Horticulturae, 2011, 889: 551.
- 17 HOU H, CHEN H, CAI H, et al.  $CO_2$  and  $N_2O$  emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Atmospheric Environment, 2016, 132: 69–76.
- 18 FRIEDMAN S P, NAFTALIEV B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 132–147.
- 19 GAERTIG T, SCHACK-KIRCHNER H, HILDEBRAND E E, et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 159(1): 15–25.
- 20 BLUME H P. BÖDEN städtisch-industrieller Verdichtungsräume: BLUME H P, FELIX-HENNIGSEN P, FISCHER W R, et al. Handbook of soil science[J]. Weinheim: Wiley-VCH, 1996.
- 21 WELTECKE K, GAERTIG T. Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel, Germany[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(3): 329–338.
- 22 BRADFORD K J, YANG S F. Physiological responses of plants to waterlogging[J]. HortScience, 1981, 16(1): 25–30.

23 WIEN H C. The physiology of vegetable crops[M]. Wallingford, UK: CABI Publishing, 1997.

24 DAVIDSON E C, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217–227.

25 PANGLE R E, SEILER J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO<sub>2</sub> efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont[J]. Environmental Pollution, 2002, 116: S85–S96.

26 YAN M, ZHOU G, ZHANG X. Effects of irrigation on the soil CO<sub>2</sub> efflux from different poplar clone plantations in arid Northwest China[J]. Plant and Soil, 2014, 375(1–2): 89–97.

27 BUCHMANN N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11): 1625–1635.

28 CHEN W, JIA X, ZHA T, et al. Soil respiration in a mixed urban forest in China in relation to soil temperature and water content[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 54: 63–68.

29 LIU W, ZHANG Z, WAN S. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(1): 184–195.

30 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):1671–9387.

ZHU Yan, CAI Huanjie, HOU Huijing, et al. Effects of aerated irrigation on root-zoon environment and yield of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2016, 44(5):1671–9387. (in Chinese)

31 赵伟霞,蔡焕杰,单志杰,等. 无压灌溉日光温室番茄高产指标[J]. 农业工程学报,2009,25(3):16–21.

ZHAO Weixia, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. High yield indicators of greenhouse tomato under non-pressure irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 16–21. (in Chinese)

32 JIA B, ZHOU G, WANG Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1): 60–76.

33 WANG M, LIU X, ZHANG J, et al. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration at temperate *Leymus chinensis* meadow steppes in western Songnen Plain, China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(3): 287–296.

34 LUO Yiqi, ZHOU Xuhui. Soil respiration and the environment[M]. New York: Academic Press,2006:257–305.

35 LINN D M, DORAN J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(6): 1267–1272.

36 RICE C W, SMITH M S. Denitrification in no-till and plowed soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1168–1173.

37 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.

LI Yuan, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effects of aeration rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(8):121–129. (in Chinese)

38 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.

39 WOLF B. The fertile triangle: the interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity[M]. New York: Haworth Press, 1999:211.

40 LETEY J, STOLZY L H, LUNT O R, et al. Growth and nutrient uptake of Newport bluegrass as affected by soil oxygen[J]. Plant and Soil, 1964, 20(2): 143–148.

41 ZHANG L H, CHEN Y N, ZHAO R F, et al. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10): 1200–1211.

42 韩广轩,朱波,江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物生态学报,2006,30(3):450–456.

HAN Guangxuan, ZHU Bo, JIANG Changsheng. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the Central Sichuan Basin[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3): 450–456. (in Chinese)

43 孟磊,丁维新,蔡祖聪,等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展,2005,20(6): 687–692.

MENG Lei, DING Weixin, CAI Zucong, et al. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(6): 687–692. (in Chinese)

44 KASPAR T C, BLAND W L. Soil temperature and root growth[J]. Soil Science, 1992, 154(4): 290–299.

45 ATKIN O K, EDWARDS E J, LOVEYS B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 141–154.

46 MIKAN C J, SCHIMEL J P, DOYLE A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1785–1795.

47 赵冰清,张会兰,王玉杰,等. 重庆缙云山环境因子对毛竹林土壤呼吸特征的作用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 239–245.

ZHAO Bingqing, ZHANG Huilan, WANG Yujie, et al. The role of environmental factors on *Phyllostachys* forest soil respiration characteristics in Jinyun Mountain of Chongqing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(2): 239–245. (in Chinese)

48 BAJRACHARYA R M, LAL R, KIMBLE J M. Diurnal and seasonal CO–C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 286–293.

49 LIU X, WAN S, SU B, et al. Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem[J]. Plant and Soil, 2002, 240(2): 213–223.

50 XU L, BALDOCCHI D D, TANG J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(4):1–8.