

加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响*

李元¹ 牛文全^{1,2} 张明智² 薛璐² 王京伟¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用空气压缩机为大棚甜瓜根系供气, 采用正交试验设计, 研究滴灌带埋深(10、25、40 cm)、加气频率(每天加气1次、每2 d加气1次、每4 d加气1次、不加气)、灌水上限(灌水至田间持水量的70%、80%、90%)对大棚甜瓜种植下土壤酶活性及微生物数量的影响。研究表明: ①加气灌溉对土壤酶活性、土壤微生物数量均有显著影响。其中对细菌、放线菌数量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、真菌数量影响由大到小依次为滴灌带埋深、加气频率和灌水上限。②最适宜的滴灌带埋深为25 cm。③每天加气1次土壤脲酶活性最高, 细菌数量也最多; 每2 d加气1次土壤过氧化氢酶活性最高, 真菌数量最多。④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。

关键词: 甜瓜 根际通气 灌溉水平 土壤微生物 土壤酶活性

中图分类号: S627.9; S652 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0121-09

Effects of Aeration on Rhizosphere Soil Enzyme Activities and Soil Microbes for Muskmelon in Plastic Greenhouse

Li Yuan¹ Niu Wenquan^{1,2} Zhang Mingzhi² Xue Lu² Wang Jingwei¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the influence of lateral depth of subsurface drip irrigation, aeration frequency and irrigation amount on soil enzyme activities and soil microbes of muskmelon grown in greenhouse, the experiment was carried out with orthogonal test design and using an air compressor to aerate the roots of muskmelon. Results showed that: ① Aeration had a significant impact on soil enzyme activities and soil microbial quantity. According to the influencing degree on quantity of rhizosphere soil bacteria and actinomycetes, these factors can be arranged as follow (descending): aeration frequencies, depths of subsurface drip irrigation and irrigation amount; for the catalase, urease and fungi amounts, the order of these factors (descending) was: depths of subsurface drip irrigation, aeration frequencies and irrigation amount. ② The optimal lateral depth of subsurface drip irrigation was 25 cm. ③ The greatest bacteria amounts and urease activities could be obtained through aerating once a day; the greatest fungi amounts and catalase activities could be obtained through aerating once every two days. ④ Catalase activity and actinomycetes quantity can reach the maximum when soil water content was attended to 80% of the field capacity; urease activity and bacteria quantity can reach the maximum when irrigation amount was attended to 90% of the field capacity.

Key words: Muskmelon Rhizosphere aeration Irrigation level Soil microbes Soil enzyme activity

收稿日期: 2014-10-22 修回日期: 2014-11-05

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100507)

作者简介: 李元, 博士生, 主要从事土壤气体与设施蔬菜栽培研究, E-mail: liy681@nenu.edu.cn

通讯作者: 牛文全, 教授, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与节水技术研究, E-mail: niwq@nwsuaf.edu.cn

引言

土壤微生物是农田生态系统的重要组成部分,在土壤生化反应、有机质转化、生态系统过程中具有重要作用,是参与土壤碳、氮、磷、硫等元素转化的主要驱动力^[1-2]。土壤酶是土壤中各种生化反应的催化剂,其活性是表征土壤熟化和肥力水平高低的重要指标,主要由土壤微生物和植物根系分泌,其次,植物残体和土壤动物区系分解也可产生少量土壤酶^[3-5]。土壤中腐殖质的形成,木质素、纤维素、糖类物质的分解,有机氮的矿化、硝化和反硝化等大部分反应都是在微生物和酶的共同作用下完成的。然而由于设施农业一般均存在大量灌水或施肥、少耕、机械化操作等现象,这些农事活动将导致土壤紧实度增强,土壤孔隙度减小,在一定程度上阻碍了氧气、二氧化碳等气体在大气与土壤间的交换,造成土壤处于缺氧状态^[6]。土壤通气性的改变势必影响到土壤微生物数量和土壤酶活性。

已有研究表明,根际低氧胁迫是限制作物产量的主要逆境因素之一^[7]。低氧胁迫下根系氧供应不足,根系活力低下,好氧性土壤微生物、土壤动物活动减缓。因此,高紧实度土壤势必降低土壤酶活性,低下的土壤酶活性间接影响到土壤养分循环和作物对养分的利用,土壤中有有机质分解缓慢,可供植株直接利用的矿质元素含量不足,限制了土壤肥效的充分发挥^[8-10]。同时,低氧胁迫下叶片脱落酸(ABA)浓度增加,ABA的积累降低了气孔密度和开度,抑制茎、叶生长,造成净光合速率降低,导致植株生长缓慢,干物质积累减少,限制产量及品质的提升^[11]。Buttery等^[12]对不同土壤紧实度条件下大豆和菜豆进行研究,发现高紧实度土壤中植株株高、地上干物质质量都较生长在紧实度低的土壤中低。

给土壤适当通气能有效解除土壤低氧胁迫,提高土壤导气率,改善土壤氧环境^[13],使根系有氧呼吸顺利进行,提高植株水分利用效率^[6,14],保障土壤微生物活动、提高土壤酶活性^[15]。前人研究表明,加气灌溉对黄瓜、棉花、大豆、西葫芦、南瓜等作物产量及品质均有显著的改善,尤其对粘重土壤效果更加明显^[16-18]。目前相关研究多关注于植株水分利用效率、产量和品质,有关土壤微生物群落、土壤酶活性研究很多^[19-21],但加气条件下土壤酶活性研究相对不足,尤其是水、气、滴灌带埋深复合条件下对土壤酶活性影响的研究更少。因此,为提高土壤养分循环和利用效率,开展加气条件下土壤微生物、土壤酶研究十分必要。

甜瓜(*Cucumis melo* L.)是世界各国普遍栽培的

瓜类作物^[22],在中国其种植面积约占世界总面积的40%,是重要的园艺经济作物^[23],而甜瓜产量和品质对土壤肥力非常敏感。本文以大棚甜瓜为研究对象,通过设置不同的加气频率、灌水上限、滴灌带埋深,研究不同水、气、埋深处理对大棚甜瓜种植下土壤微生物数量、土壤酶活性的影响,确定适宜的水、气、埋深组合,为改善大棚甜瓜根际氧环境,提高甜瓜产量,改善甜瓜品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2014年4月24日至7月12日在陕西杨凌(108°02'E,34°17'N)温室大棚内进行,试验大棚长108 m,宽8 m。栽培小区长5.5 m,宽1.5 m。试验区属半干旱偏湿润区,年均日照2 163.8 h,无霜期210 d。大棚前茬种植番茄,供试甜瓜品种为陕甜一号。试验用土为壤土,土壤容重1.35 g/cm³,田间持水率为28.17%(质量含水率),pH值7.82,土壤孔隙度49.38%。砂砾(0.02~2 mm)质量分数25.4%,粉粒(0.002~0.02 mm)质量分数44.1%,粘粒(<0.002 mm)质量分数30.5%。

1.2 试验设计

每个小区内铺设直径16 mm的2条地下滴灌带,滴头间距30 cm,滴灌带间距0.5 m。土壤中所通气体为空气,在主滴灌带上连接气泵,通过地下滴灌带为土壤供水、供气。将20 d苗龄的幼苗移栽后覆膜,种植行距0.5 m,株距0.4 m。每个小区栽培2行,每行13株。

试验设3个灌水上限(I), I_{70} 、 I_{80} 和 I_{90} 分别为每次灌水至田间持水率的70%、80%和90%。4个加气频率(A), A_1 、 A_2 、 A_4 和 A_N 分别为每天加气1次、每2 d加气1次、每4 d加气1次和不加气。3个滴灌带埋深(D), D_{10} 、 D_{25} 和 D_{40} 分别为滴灌带埋深10、25、40 cm。采用部分追加法正交试验设计,共12个处理,每个处理重复3次,即: $D_{10} A_N I_{70}$ 、 $D_{10} A_1 I_{80}$ 、 $D_{10} A_2 I_{90}$ 、 $D_{10} A_4 I_{70}$ 、 $D_{25} A_N I_{80}$ 、 $D_{25} A_1 I_{90}$ 、 $D_{25} A_2 I_{70}$ 、 $D_{25} A_4 I_{80}$ 、 $D_{40} A_N I_{90}$ 、 $D_{40} A_1 I_{70}$ 、 $D_{40} A_2 I_{80}$ 、 $D_{40} A_4 I_{90}$ 。

每次加气量计算式为^[24]

$$V = \frac{1}{1000} SL(1 - \rho_b / \rho_s) \quad (1)$$

式中 V ——每次加气量,L

S ——茎的横截面积,1 500 cm²

L ——茎长,550 cm

ρ_b ——土壤容积密度,1.35 g/cm³

ρ_s ——土壤密度,2.65 g/cm³

据此得出每个小区加气量为407.83 L。

灌水量计算式为^[25]

$$M = s\rho_b p h \theta_f (q_1 - q_2) / \eta \quad (2)$$

式中 M ——灌水量, m^3

s ——计划湿润面积, $5.5 m^2$

ρ_b ——土壤容重, 取值 $1.35 g/cm^3$

p ——湿润比, 取值 100%

h ——湿润层深度, 取值 $0.2 m$

θ_f ——田间最大持水量

q_1, q_2 ——灌水上限、土壤实测含水率(以相对田间持水率的百分比表示)

η ——水分利用系数, 地下滴灌取 0.95

全生育期分别于 5 月 19 日、6 月 17 日灌水, 共灌水 2 次。利用土钻在小区内两条滴灌带之间取样, 用干燥法测定土壤含水率。所有小区施肥及管理水平均一致。

1.3 测定指标及方法

分别于定植后 32、42、60 d 采集土样测定花期、果实膨大期和成熟期土壤酶活性, 取成熟期根际土测定土壤微生物数量。

1.3.1 土壤酶指标

采集地表下 10~25 cm 根际土充分混合均匀后作为一个土样, 每个处理重复取样 3 次。过氧化氢酶活性采用滴定法(0.1 mol/L 的标准 $KMnO_4$ 液滴

定)测定, 土壤过氧化氢酶活性使用每克干土所消耗 $KMnO_4$ 溶液的毫升数表示, 单位为 mL/g ^[26]。脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定, 土壤脲酶活性使用每克土 24 h(1 d)后所生成的 NH_3-N 质量表示, 单位为 $mg/(g \cdot d)$ ^[27]。

1.3.2 土壤微生物指标

将采集的土样用灭菌塑料袋包扎密封, 于 4℃ 保存, 用于微生物数量测定。采用稀释平板涂抹法混菌接种, 同一土样(0.1 mL 菌悬液)接种 3 个连续的稀释度, 每个稀释度重复 3 次。细菌选用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基培养, 真菌选用马丁氏培养基培养, 放线菌选用改良高氏一号培养基培养^[28]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 22 软件进行 Duncan 多重比较及交互作用方差分析, 对同一处理获得的数据取均值后进行极差分析, Origin Pro 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同加气灌溉处理对大棚甜瓜土壤酶活性的影响

2.1.1 过氧化氢酶活性

由表 1 可知, 花期土壤过氧化氢酶活性最高, 成熟期次之, 果实膨大期最低。花期、果实膨大期、成

表 1 不同加气灌溉处理对大棚甜瓜各生育阶段土壤过氧化氢酶活性的影响

Tab.1 Effects of aeration at different growth stages on soil catalase activity

mL/g

处理	不同生育期过氧化氢酶活性			均值
	花期	果实膨大期	成熟期	
D ₁₀ A _N I ₇₀	2.97 ± 0.12 ^{AB}	1.93 ± 0.25 ^{AB}	0.53 ± 0.25 ^D	1.81
D ₁₀ A ₁ I ₈₀	3.05 ± 0.11 ^A	1.70 ± 0.20 ^B	1.58 ± 0.16 ^C	2.11
D ₁₀ A ₂ I ₉₀	2.75 ± 0.07 ^{BC}	2.07 ± 0.31 ^{AB}	2.06 ± 0.16 ^{AB}	2.29
D ₁₀ A ₄ I ₇₀	2.93 ± 0.02 ^{AB}	1.63 ± 0.25 ^B	2.35 ± 0.18 ^A	2.31
D ₂₅ A _N I ₈₀	2.99 ± 0.06 ^{AB}	1.83 ± 0.12 ^B	2.19 ± 0.06 ^{AB}	2.34
D ₂₅ A ₁ I ₉₀	3.15 ± 0.08 ^A	1.58 ± 0.18 ^B	1.88 ± 0.09 ^{BC}	2.20
D ₂₅ A ₂ I ₇₀	2.98 ± 0.05 ^{AB}	1.78 ± 0.16 ^B	2.22 ± 0.09 ^{AB}	2.33
D ₂₅ A ₄ I ₈₀	2.96 ± 0.12 ^{AB}	1.88 ± 0.16 ^B	1.93 ± 0.07 ^B	2.26
D ₄₀ A _N I ₉₀	2.99 ± 0.06 ^{AB}	1.85 ± 0.13 ^B	1.97 ± 0.13 ^B	2.27
D ₄₀ A ₁ I ₇₀	3.01 ± 0.14 ^A	2.40 ± 0.17 ^A	1.97 ± 0.09 ^B	2.46
D ₄₀ A ₂ I ₈₀	2.60 ± 0.08 ^C	1.90 ± 0.20 ^B	2.12 ± 0.12 ^{AB}	2.21
D ₄₀ A ₄ I ₉₀	3.03 ± 0.14 ^A	1.05 ± 0.23 ^C	1.87 ± 0.13 ^{BC}	1.98
均值	2.95	1.80	1.89	2.21
F 值				
灌水上限 I	4.570 *	2.939 ^{ns}	4.989 *	
滴灌带埋深 D	8.838 **	1.088 ^{ns}	1.812 ^{ns}	
加气频率 A	14.905 **	7.616 **	29.862 **	
$I \times D$	14.622 **	5.360 **	1.205 ^{ns}	
$I \times A$	3.891 **	7.473 **	35.953 **	
$D \times A$	3.236 *	9.613 **	29.509 **	

注: 同列数据后不同字母表示差异显著性水平, 大写字母为 $P < 0.01$ 水平显著。* 和 ** 分别代表 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著, ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$), 下同。

熟期酶活性最高处理分别为 $D_{25} A_1 I_{90}$ 、 $D_{40} A_1 I_{70}$ 、 $D_{10} A_4 I_{70}$, 3 个时期的 $D_{40} A_2 I_{80}$ 、 $D_{40} A_4 I_{90}$ 、 $D_{10} A_N I_{70}$ 处理酶活性均显著低于其他处理。全生育期 $D_{40} A_1 I_{70}$ 处理土壤过氧化氢酶活性均值最高, $D_{10} A_N I_{70}$ 处理最低。灌水上限对花期和成熟期过氧化氢酶活性均有显著影响, 滴灌带埋深仅对花期酶活性有极显著影响, 加气频率对 3 个生育期酶活性均有极显著影响, 除灌水上限和滴灌带埋深在成熟期对酶活性无显著交互作用外, 其他两两交互均对 3 个时期酶活性产生显著影响。

极差分析结果(图 1)表明, 3 因素对土壤过氧化氢酶活性的影响由大到小依次为: 滴灌带埋深、加气频率、灌水上限, 提高酶活性的最佳处理为 $D_{25} A_2 I_{80}$ 。滴灌带埋深 25 cm 时, 土壤过氧化氢酶活性最高, 埋深 40 cm 次之, 埋深 10 cm 酶活性最低。土壤过氧化氢酶活性随加气频率的增大呈先增大后减小趋势, 每 2 d 加气一次时, 土壤过氧化氢酶活性最高, 每天加气 1 次时, 土壤过氧化氢酶活性略有下降, 说明提高加气频率可提高土壤过氧化氢酶活性, 但加气过于频繁会降低土壤过氧化氢酶活性。因大棚甜瓜覆膜种植下, 保墒效果好, 全生育期内仅灌水 2 次, 灌水上限对土壤酶活性的影响最小, 随灌水上限提高土壤过氧化氢酶活性降低。

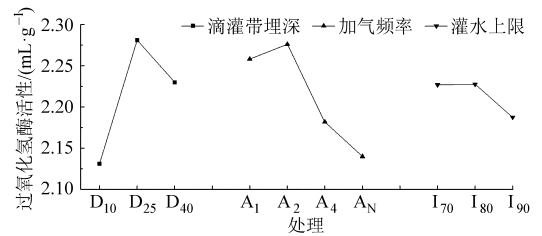


图 1 不同加气灌溉处理对土壤过氧化氢酶活性影响的极差分析结果

Fig. 1 Effects of different factors on soil catalase activity by range analysis

2.1.2 脲酶活性

加气频率、灌水上限、滴灌带埋深对土壤脲酶活性的影响见表 2。各生育阶段土壤脲酶活性变化趋势与过氧化氢酶活性相同, 花期活性最高, 成熟期活性次之, 果实膨大期活性最低。花期滴灌带埋深 40 cm 加气处理土壤脲酶活性均极显著高于埋深 10 cm 和不加气处理, 果实膨大期 $D_{40} A_1 I_{70}$ 处理脲酶活性最高, 成熟期 $D_{25} A_2 I_{70}$ 处理酶活性极显著高于同时期其他处理。全生育期 $D_{40} A_1 I_{70}$ 处理土壤脲酶活性均值最高, $D_{10} A_4 I_{70}$ 处理最低。灌水上限对果实膨大期酶活性有极显著影响, 对成熟期酶活性有显著影响, 滴灌带埋深对酶活性影响随植株生长逐渐减弱, 加气频率对花期酶活性有显著影响, 对成熟期酶活性有极显著影响。除加气频率和灌水上限、加气频

表 2 不同加气灌溉处理对大棚甜瓜各生育阶段土壤脲酶活性的影响
Tab. 2 Effects of aeration at different growth stages on soil urease activity

mg/(g·d)

处理	不同生育期土壤脲酶活性			均值
	花期	果实膨大期	成熟期	
$D_{10} A_N I_{70}$	0.093 ± 0.004 ^E	0.078 ± 0.004 ^E	0.048 ± 0.002 ^F	0.073
$D_{10} A_1 I_{80}$	0.092 ± 0.005 ^E	0.066 ± 0.004 ^E	0.105 ± 0.004 ^B	0.088
$D_{10} A_2 I_{90}$	0.087 ± 0.005 ^E	0.118 ± 0.004 ^{AB}	0.093 ± 0.005 ^{BCD}	0.099
$D_{10} A_4 I_{70}$	0.042 ± 0.009 ^F	0.046 ± 0.003 ^F	0.086 ± 0.003 ^{DE}	0.058
$D_{25} A_N I_{80}$	0.096 ± 0.010 ^E	0.097 ± 0.003 ^{CD}	0.086 ± 0.003 ^{DE}	0.093
$D_{25} A_1 I_{90}$	0.134 ± 0.008 ^{BC}	0.116 ± 0.005 ^{AB}	0.080 ± 0.006 ^{DE}	0.110
$D_{25} A_2 I_{70}$	0.116 ± 0.003 ^{CD}	0.051 ± 0.003 ^F	0.123 ± 0.015 ^A	0.097
$D_{25} A_4 I_{80}$	0.056 ± 0.007 ^F	0.091 ± 0.006 ^D	0.084 ± 0.005 ^{DE}	0.077
$D_{40} A_N I_{90}$	0.105 ± 0.014 ^{DE}	0.073 ± 0.003 ^E	0.076 ± 0.005 ^E	0.085
$D_{40} A_1 I_{70}$	0.154 ± 0.011 ^A	0.127 ± 0.008 ^A	0.088 ± 0.006 ^{DE}	0.123
$D_{40} A_2 I_{80}$	0.142 ± 0.008 ^{AB}	0.066 ± 0.005 ^E	0.104 ± 0.006 ^{BC}	0.104
$D_{40} A_4 I_{90}$	0.160 ± 0.008 ^A	0.107 ± 0.009 ^{BC}	0.094 ± 0.008 ^{CDE}	0.121
均值	0.106	0.086	0.089	0.094
F 值				
灌水上限 I	1.447 ^{ns}	27.383 ^{**}	3.966 [*]	
滴灌带埋深 D	24.885 ^{**}	3.376 [*]	1.613 ^{ns}	
加气频率 A	7.023 [*]	3.241 ^{ns}	5.222 ^{**}	
I × D	5.356 ^{**}	29.529 ^{**}	18.173 ^{**}	
I × A	15.453 ^{**}	5.739 ^{**}	1.655 ^{ns}	
D × A	7.901 ^{**}	6.827 ^{**}	1.340 ^{ns}	

率和滴灌带埋深在成熟期对酶活性无显著交互作用外,其他两两交互均对 3 个时期酶活性产生显著影响。

极差分析结果(图 2)显示, $D_{40}A_1I_{90}$ 处理下土壤

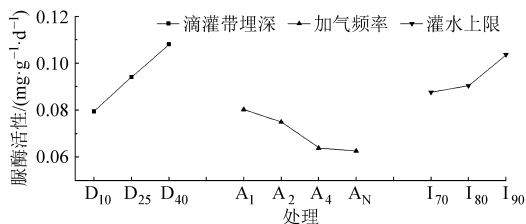


图 2 不同加气灌溉处理对土壤脲酶活性影响的极差分析结果

Fig. 2 Effects of different factors on soil urease activity by range analysis

脲酶活性最高。与过氧化氢酶活性一致,滴灌带埋深对土壤脲酶活性影响最大,加气频率次之,灌水上限最小。0~40 cm 范围内,脲酶活性随地下滴灌带埋藏深度和加气频率的提高而增大,土壤含水率控制在田间持水率的 70%~90% 时,土壤脲酶活性随灌水上限提高而升高。

2.2 不同加气灌溉处理对大棚甜瓜土壤微生物数量的影响

土壤微生物数量与土壤肥力有密切关系,通常土壤微生物活性越高土壤越肥沃,土壤微生物数量能够反映土壤质量及健康状况^[29]。不同加气频率、灌水上限、滴灌带埋深对土壤微生物数量的影响见表 3。

表 3 不同加气灌溉处理下根际土壤微生物数量

Tab. 3 Microbial quantities in rhizosphere of muskmelon under different aeration levels

处理	细菌/(个·g ⁻¹)	真菌/(个·g ⁻¹)	放线菌/(个·g ⁻¹)	Shannon 指数
$D_{10}A_NI_{70}$	$(5.11 \pm 1.34) \times 10^9$ ^{BCD}	$(6.00 \pm 0.38) \times 10^5$ ^C	$(1.69 \pm 0.62) \times 10^7$ ^D	0.034
$D_{10}A_1I_{80}$	$(8.57 \pm 3.55) \times 10^9$ ^{BC}	$(3.43 \pm 1.71) \times 10^6$ ^B	$(4.00 \pm 0.85) \times 10^7$ ^D	0.048
$D_{10}A_2I_{90}$	$(2.10 \pm 2.06) \times 10^9$ ^{CD}	$(2.33 \pm 1.05) \times 10^6$ ^{BC}	$(7.40 \pm 2.97) \times 10^7$ ^D	0.226
$D_{10}A_4I_{70}$	$(5.10 \pm 1.25) \times 10^9$ ^{BCD}	$(1.40 \pm 0.95) \times 10^6$ ^C	$(1.86 \pm 8.96) \times 10^8$ ^{BC}	0.223
$D_{25}A_NI_{80}$	$(2.41 \pm 1.61) \times 10^9$ ^{CD}	$(4.30 \pm 0.35) \times 10^6$ ^B	$(3.70 \pm 8.97) \times 10^8$ ^A	0.582
$D_{25}A_1I_{90}$	$(1.50 \pm 1.98) \times 10^{10}$ ^A	$(9.30 \pm 0.56) \times 10^6$ ^A	$(4.00 \pm 2.02) \times 10^7$ ^D	0.034
$D_{25}A_2I_{70}$	$(6.50 \pm 2.92) \times 10^9$ ^{BCD}	$(8.95 \pm 1.13) \times 10^6$ ^A	$(6.10 \pm 1.61) \times 10^7$ ^D	0.091
$D_{25}A_4I_{80}$	$(5.10 \pm 2.03) \times 10^9$ ^{BCD}	$(2.77 \pm 1.44) \times 10^6$ ^{BC}	$(4.00 \pm 0.29) \times 10^6$ ^D	0.016
$D_{40}A_NI_{90}$	$(9.94 \pm 4.78) \times 10^9$ ^{AB}	$(5.00 \pm 0.39) \times 10^5$ ^C	$(1.19 \pm 0.22) \times 10^7$ ^D	0.014
$D_{40}A_1I_{70}$	$(6.80 \pm 3.24) \times 10^9$ ^{BCD}	$(1.45 \pm 0.95) \times 10^6$ ^C	$(1.08 \pm 1.56) \times 10^8$ ^{CD}	0.119
$D_{40}A_2I_{80}$	$(7.80 \pm 1.76) \times 10^9$ ^{BC}	$(4.90 \pm 1.55) \times 10^6$ ^B	$(7.50 \pm 3.90) \times 10^7$ ^D	0.085
$D_{40}A_4I_{90}$	$(1.07 \pm 0.56) \times 10^9$ ^D	$(4.56 \pm 1.24) \times 10^6$ ^B	$(2.21 \pm 5.43) \times 10^8$ ^B	0.693
F 值				
灌水上限 I	0.763 ^{ns}	1.241 ^{ns}	2.305 ^{ns}	
滴灌带埋深 D	1.961 ^{ns}	37.712 ^{**}	2.555 ^{ns}	
加气频率 A	10.389 ^{**}	21.189 ^{**}	7.602 ^{**}	
I × D	7.631 ^{**}	13.750 ^{**}	29.839 ^{**}	
I × A	7.218 ^{**}	29.294 ^{**}	29.839 ^{**}	
D × A	6.819 ^{**}	11.729 ^{**}	29.756 ^{**}	

2.2.1 对土壤细菌数量的影响

从表 3 可看出,加气频率及 3 因素两两交互均对土壤细菌数量有极显著影响,极差分析(图 3)发现,试验三因素对土壤细菌数量影响由大到小依次为加气频率、滴灌带埋深和灌水上限。随加气频率的提高,土壤细菌数量显著升高,在 25 cm 埋深下土壤细菌活性最高。灌水对土壤细菌数量的影响最小,随灌水上限的提高细菌数量呈增加趋势。极差分析得到 $D_{25}A_1I_{90}$ 处理下土壤细菌数量最高。

2.2.2 对土壤真菌数量的影响

从表 3 可以看出,滴灌带埋深和加气频率均对土壤真菌数量有极显著影响,3 因素两两交互均对土壤真菌有极显著影响,其中 $D_{25}A_1I_{90}$ 、 $D_{25}A_2I_{70}$ 处理

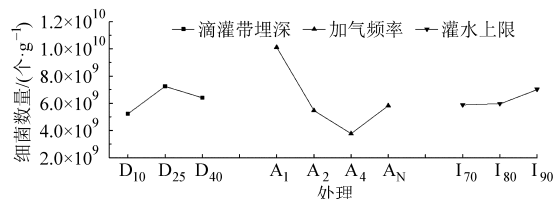


图 3 不同加气灌溉处理对土壤细菌数量影响的极差分析结果

Fig. 3 Effects of different factors on soil bacteria amounts by range analysis

土壤中真菌数量显著高于其他处理。

极差分析(图 4)发现,3 因素对真菌数量影响的顺序依次为滴灌带埋深、加气频率、灌水上限。滴灌带埋深对土壤真菌数量的影响规律与对细菌数量

的影响规律相同。在一定范围内土壤真菌数量随加气频率的提高而增加,但每天加气1次可能因扰动过强而降低了真菌的数量。灌水上限对土壤真菌数量的影响较小,随灌水上限的提高土壤真菌数量增加。极差分析得到 $D_{25}A_2I_{90}$ 处理下土壤真菌数量最多。

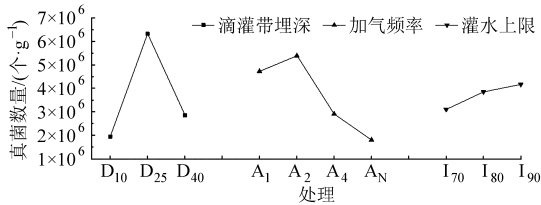


图4 不同加气灌溉处理对土壤真菌数量影响的极差分析结果

Fig. 4 Effects of different factors on soil fungi amounts by range analysis

2.2.3 对土壤放线菌数量的影响

加气频率对土壤放线菌数量有极显著影响,而灌水上限和滴灌带埋深均对土壤放线菌数量无显著影响,三因素两两交互均对土壤放线菌数量有极显著影响。 $D_{25}A_NI_{80}$ 处理下放线菌数量显著高于其他处理, $D_{10}A_NI_{70}$ 、 $D_{25}A_4I_{80}$ 、 $D_{40}A_NI_{90}$ 处理放线菌数量显著低于其他处理。

三因素对放线菌数量影响由大到小依次为加气频率、滴灌带埋深、灌水上限(图5)。每4d加气1次下土壤中放线菌数量最多,提高加气频率,土壤中放线菌数量呈下降趋势。滴灌带埋深对土壤放线菌数量的影响规律与细菌、真菌相同;以80%田间持水率为灌水上限,土壤放线菌数量最高,提高或降低水分土壤放线菌数量均有所降低。极差分析发现 $D_{25}A_4I_{80}$ 处理下土壤放线菌数量最多。

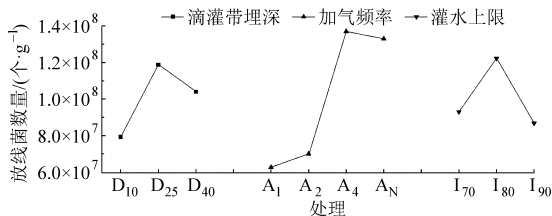


图5 不同加气灌溉处理对土壤放线菌数量影响的极差分析结果

Fig. 5 Effects of different factors on soil actinomycetes amounts by range analysis

3 讨论

3.1 加气灌溉对土壤微生物数量的影响

土壤温度、水分适宜,通气良好的条件下,土壤中好气性微生物活动旺盛,腐殖质分解快,能够释放更多的养分供植物吸收利用。土壤细菌中的固氮菌为植株提供氮源,硝化细菌避免了亚硝酸盐在土壤

中的积累。真菌将纤维素、木质素和果胶等分解并释放养分,菌丝的积累改善了土壤的物理结构,然而,真菌同化土壤碳素,固定无机态营养,该过程又与作物争夺养分^[30]。放线菌是抗生素的主要产生菌,具有良好的生防效果,对调整土壤微生物生态平衡具有重要作用。

本试验中土壤细菌占绝大多数,放线菌次之,真菌最少。加气灌溉对土壤细菌、真菌和放线菌数量均具有显著影响。加气频率和加气位置(滴灌带埋深)是影响土壤微生物数量的重要因素,适当提高加气频率能增加土壤细菌、真菌和放线菌的数量,但当加气频率过高时,真菌和放线菌数量反而减少。加气频率的升高导致真菌及放线菌数量降低是由于加气处理已解除土壤的低氧胁迫,土壤气体已不是限制土壤微生物数量的主要因素,随加气频率的升高加大了气体在土壤中的流动,频繁的气流对微生物扰动作用增强,微生物数量及其代谢产酶能力降低,该结果与谢恒星等^[24]研究得出温室甜瓜每隔2d加气一次可获得更高的产出、投入比相一致。放线菌是好氧菌,而本试验发现随加气频率的提高放线菌数量减少,与葛灿等^[31]研究的放线菌目链霉菌受厌氧胁迫后其活性升高相一致。本试验还发现,加气位置对土壤微生物数量也有显著影响,地下滴灌带埋深25cm时土壤微生物数量最多。试验结束后对根系分析发现甜瓜根系主要分布于地下30cm范围内,滴灌带埋深25cm时为根系供水、供气效率最高,埋深40cm时因过深而降低了气体对根区土壤微生物数量的影响,埋深10cm时存在烟卤效应气体外溢严重,加气效率降低,对根际土壤微生物数量的影响也随之降低。但也有研究表明,地下滴灌带埋深为40cm时小麦水分利用效率及产量最高^[32],原因是本试验地下滴灌带为土壤供水同时还担负改善土壤气体作用,其次土壤质地、种植作物不同也是得到不同结果的主要原因。由于本试验甜瓜全生育期灌水仅2次,导致灌水上限对土壤微生物数量的影响不显著。

3.2 加气灌溉对土壤酶活性的影响

过氧化氢酶活性与土壤呼吸强度、土壤微生物活性相关,是表征土壤生物特性的重要酶^[33]。过氧化氢酶广泛存在于土壤及生物体内,能促进过氧化氢分解,降低过氧化氢对植株的伤害。过量灌水或土壤紧实条件下土壤气体含量降低,植株遭遇低氧逆境胁迫,会导致细胞内过氧化氢含量升高,进而影响蛋白质、脂类、核酸等的正常生理功能及代谢,促进细胞非程序性死亡^[34],提高过氧化氢酶活性,可降低过氧化氢对植株的毒害。脲酶也广泛存在于土

壤中,能促进尿素水解为氨和二氧化碳,是反映土壤供氮能力与水平的重要指标。提高土壤脲酶活性,可为植物提供更多的有效氮,对促进土壤氮循环、提高土壤肥力、保障植株正常生长具有重要意义^[1,35]。

本研究发现加气灌溉下大棚甜瓜花期土壤脲酶、过氧化氢活性最高,全生育期呈先降低后升高的趋势,可能是由于果实膨大期植株对养分需求增多,养分大量流向果实,造成根际养分相对亏缺,微生物活动受限,分泌酶相对较少,该结果与冯伟等^[36]的研究结果一致。但也有研究表明,在番茄生育期内酶活性呈先升后降趋势^[37],是因为生育前期营养充足,根际土壤酶活性不断提高,后期土壤中的养分逐渐被消耗,土壤酶活性降低。可见,全生育期内土壤微生物数量变化规律的相关研究结论不一致,可能还受土壤养分、季节、管理措施、水热等条件的影响^[38]。

试验发现加气灌溉对2种土壤酶活性均有显著影响,加气频率和加气位置是影响土壤酶活性的主要因素,而灌水控制上限对土壤酶活性的影响较小。加气频率、滴灌带埋深和灌水上限相互作用可以形成良好的土壤水气环境,显著提高土壤酶活性。埋深25 cm、每2 d加气1次过氧化氢酶活性最高;埋深40 cm、每天加气1次脲酶活性最高。这是由于

25~40 cm 土层深度水分充足、温度相对稳定,土壤空气成为限制土壤酶活性的主要因素。埋深对2种酶活性的影响均为花期极显著,随植株的生长显著性逐渐降低。是由于不同滴灌带埋深导致各层面水、气分布不均,土壤微环境差异显著,而花期根系相对短少,水、气分布不均直接对土壤根系及根际微生物活动造成影响,间接影响到根际土壤酶活性。然而随植株生长,根系已逐渐扩张至不同滴灌带埋深处(0~40 cm),不同埋深处理对根系土壤微环境影响减弱,因此滴灌带埋深对土壤酶活性的影响也逐渐降低。本研究还发现,当提高加气频率时,可显著提高微生物的繁殖速度,提高其代谢产酶能力,但过高的加气频率,会降低土壤真菌及放线菌数量,间接影响到土壤过氧化氢酶活性。适当提高土壤水分能够增加土壤酶活性,但水分过多土壤过氧化氢酶活性反而降低,该结果与朱同彬等^[39]的研究结果相一致。但也有研究表明过度灌溉降低了土壤透气性,土壤过氧化氢酶活性随土壤水分增加而增加,脲酶活性随水分增加而降低^[40-41],原因是本试验采取加气灌溉,有效改善了土壤氧环境,因而土壤过氧化氢酶活性并没有升高。其次,土壤类型、植被覆盖、试验设置水分梯度等因素不一致也是得到不同结论的原因。

表4 土壤酶活性与微生物数量的相关关系

Tab. 4 Relationship between soil enzyme activities and soil microbes

测定指标	过氧化氢酶	脲酶	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	Shannon 指数
过氧化氢酶	1					
脲酶	0.089	1				
细菌数量	0.097	-0.188	1			
真菌数量	0.102	0.283	0.362	1		
放线菌数量	0.193	0.582	-0.545	0.046	1	
Shannon 指数	-0.064	0.575	-0.681	0.059	0.882	1

前人研究表明土壤酶活性与微生物有密切的关系^[15,26],土壤通气状况的改变会影响微生物数量、根系活力,间接影响到土壤酶活性。本试验(表4)发现,放线菌数量与细菌数量呈负相关与 Shannon 指数呈高度正相关,是由于放线菌分泌抗生素抑制了细菌的生长,而本试验中细菌在微生物中占绝大多数,放线菌的增加降低了细菌的数量而平衡了真菌、放线菌的数量,因此 Shannon 指数提高。放线菌是产脲酶的主要菌种,本研究发现放线菌数量与脲酶活性呈显著正相关,该结果与彭仁等的研究结果一致^[42];细菌数量与 Shannon 指数呈显著负相关,降低细菌数量,使得多样性指数得到提高。而细菌数量与真菌数量呈正相关,说明试验中细菌、真菌对处理的响应具有一定的一致性。

总之,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,进而提高了土壤酶活性。但影响土壤微生物的因素很多,如土壤养分、土壤质地、pH 值、温度、渗透压等^[43],同时,土壤酶活性也受植物根系分泌物的影响,因此,加气灌溉影响土壤酶活性的机理还需进一步试验研究。

4 结论

(1)加气灌溉对土壤微生物数量、土壤酶活性有显著影响。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,对过氧化氢酶活性、脲酶、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。

(2)适宜的加气频率、灌水上限和滴灌带埋深

可以营造适宜的土壤水、气环境,促进土壤微生物繁殖,提高土壤酶活性。最适宜的滴灌带埋深为25 cm;每天加气1次土壤脲酶活性最高、细菌数量最多,每2 d加气1次土壤过氧化氢酶活性最高、真菌数量最多,每4 d加气1次土壤放线菌数量最多;灌水至田间持水率的80%过氧化氢酶活性最高、放

线菌数量最多,灌水至田间持水率的90%脲酶活性最高、细菌及真菌数量最多。

(3)加气灌溉条件下土壤微生物与土壤酶活性存在相关性,放线菌与细菌数量呈显著负相关,放线菌数量与脲酶活性呈显著正相关。

参 考 文 献

- 姚槐应,黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京:科学出版社,2006.
- van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2008,11(3):296-310.
- 周礼恺,张志明,曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. *土壤学报*,1983(4):413-418.
Zhou Likai,Zhang Zhiming,Cao Chengmian. On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*,1983(4):413-418. (in Chinese)
- 刘善江,夏雪,陈桂梅,等. 土壤酶的研究进展[J]. *中国农学通报*,2011,27(21):1-7.
Liu Shanjiang,Xia Xue,Chen Guimei, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2011,27(21):1-7. (in Chinese)
- Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 637-644.
- 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.
- Bai Tuanhui,Li Cuiying,Li Chao, et al. Contrasting hypoxia tolerance and adaptation in *Malus* species is linked to differences in stomatal behavior and photosynthesis[J]. *Physiologia Plantarum*,2013,147(4):514-523.
- Drew M C. Soil aeration and plant root metabolism[J]. *Soil Science*, 1992, 154(4): 259-267.
- 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.
Qiu Liping,Liu Jun,Wang Yiquan, et al. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 277-280. (in Chinese)
- 刘晚苟,山仑,邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. *植物生理学通讯*,2001,27(3):254-260.
Liu Wan'gou,Shan Lun,Deng Xiping. Responses of plant to soil compaction[J]. *Plant Physiology Journal*,2001, 27(3): 254-260. (in Chinese)
- Munns R, Sharp R E. Involvement of abscisic acid in controlling plant growth in soils of low water potential[J]. *Australia of Plant Physiology*, 1993, 20(5): 425-437.
- Buttery B R, Tan C S, Drury C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, 78(4): 571-576.
- Niu Wenquan, Guo Qing, Zhou Xiaobo, 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.
- Chen Xinming, Jay Dhungel, 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.
- Niu Wenquan,Zhang Xuan,Jia Zongxia, et al. Effects of rhizosphere ventilation on soil enzyme activities of potted tomato under different soil water stress[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40(3): 225-232.
- 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.
- 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.
- Niu Wenquan,Fan Wentao,Persaud N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 790-798.
- Chavez-Vergara B, Merino A, Vázquez-Marrufo G, et al. Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico[J]. *Geoderma*, 2014, 235-236: 133-145.
- Lü Yanna, Wang Congyan, Jia Yanyan, et al. Effects of sulfuric, nitric, and mixed acid rain on litter decomposition, soil microbial biomass, and enzyme activities in subtropical forests of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 79: 1-9.
- Sami Aikio, Henry Vare, Rauni Strommer. Soil microbial activity and biomass in the primary succession of a dry heath forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(8): 1091-1100.
- 李毅杰,原保忠,别之龙,等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2012,28(6): 132-138.

- Li Yijie, Yuan Baozhong, Bie Zhilong, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 132-138. (in Chinese)
- 23 刘君璞, 许勇, 孙小武, 等. 我国西瓜甜瓜产业“十一五”的展望及建议[J]. 中国瓜菜, 2006(1): 1-3.
- 24 谢恒星, 蔡焕杰, 张振华. 温室甜瓜加氧灌溉综合效益评价[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 79-83.
Xie Hengxing, Cai Huanjie, Zhang Zhenhua. Evaluation of comprehensive benefit in greenhouse muskmelon under aeration irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 79-83. (in Chinese)
- 25 裴芸, 别之龙. 塑料大棚中不同灌水量下限对生菜生长和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 207-211.
Pei Yun, Bie Zhilong. Effects of different irrigation minima on the growth and physiological characteristics of lettuce under plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 207-211. (in Chinese)
- 26 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- 27 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- 28 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- 29 Olaf Butenschoen, Stefan Scheu, Nico Eisenhauer. Interactive effects of warming, soil humidity and plant diversity on litter decomposition and microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1902-1907.
- 30 张晶, 张惠文, 李新宇, 等. 土壤真菌多样性及分子生态学研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1958-1962.
Zhang Jing, Zhang Huiwen, Li Xinyu, et al. Research advances in soil fungal diversity and molecular ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1958-1962. (in Chinese)
- 31 葛灿, 石竹南, 颜志民, 等. 土壤中放线菌参与反硝化可能性研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 108-112.
Ge Can, Shi Zhu'nan, Yan Zhimin, et al. Participant possibility of actinomycetes in soil denitrification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 108-112. (in Chinese)
- 32 何华, 康绍忠, 曹红霞. 地下滴灌埋管深度对冬小麦根冠生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 31-33.
He Hua, Kang Shaozhong, Cao Hongxia. Effect of lateral depth on root and seedling growth and water use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 31-33. (in Chinese)
- 33 Trasar-Cepeda C, Camina F, Leiros M C, et al. An improved method to measure catalase activity in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(3): 483-485.
- 34 Boz'ena Szal, Maigorzata Drozd, Rychter A M. Factors affecting determination of superoxide anion generated by mitochondria from barley roots after anaerobiosis[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(12): 1339-1346.
- 35 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5789-5796.
Liu Shujuan, Zhang Wei, Wang Kelin, et al. Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5789-5796. (in Chinese)
- 36 冯伟, 管涛, 王晓宇, 等. 沼液与化肥施肥对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1007-1012.
Feng Wei, Guan Tao, Wang Xiaoyu, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on winter wheat rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1007-1012. (in Chinese)
- 37 张璇, 牛文全, 甲宗霞. 灌溉后通气对盆栽番茄土壤酶活性的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 22(8): 1296-1303.
Zhang Xuan, Niu Wenquan, Jia Zongxia. Influences of rhizosphere aeration supplies on soil enzyme activities for potted tomato after irrigation[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 22(8): 1296-1303. (in Chinese)
- 38 鲁萍, 郭继勋, 朱丽. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 675-679.
Lu Ping, Guo Jixun, Zhu Li. Soil catalase activity of main plant communities in *Leymus chinensis* grassland in northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 675-679. (in Chinese)
- 39 朱同彬, 诸葛玉平, 刘少军, 等. 不同水肥条件对土壤酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2008(3): 74-78.
Zhu Tongbin, Zhuge Yuping, Liu Shaojun, et al. Effects of different fertilizer treatments and water regimes on soil enzyme activities [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(3): 74-78. (in Chinese)
- 40 Wan Zhongmei, Song Changchun, Guo Yuedong, et al. Effects of water gradients on soil enzyme activity and active organic carbon composition under *Carex lasiocarpa* marsh[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5980-5986.
- 41 Zhang Yulong, Wang Yaosheng. Soil enzyme activities with greenhouse subsurface irrigation[J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 512-518.
- 42 彭仁, 邱业先, 汪金莲. 脲酶高产菌的筛选和产酶条件的研究[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2003, 27(3): 273-275.
Peng Ren, Qiu Yexian, Wang Jinlian. Screening of strains producing urease with high activity and study on condition of producing urease[J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition, 2003, 27(3): 273-275. (in Chinese)
- 43 徐琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统[M]. 北京: 农业出版社, 1998.