

NFT 无土栽培营养液溶氧量的研究*

王汝祥

徐志豪

(中国农业工程研究设计院)

(浙江省农业科学院)

季 鹰

张加志

(中国农业工程研究设计院)

提 要 本文阐述了在 NFT 系统上试验探讨营养液溶氧量与环境因子的相关关系, 就如何改善溶氧供给, 提出若干改进 NFT 设施设计的建议, 如: 适当加大贮液池; 在贮液池上附设循环液的喷洒装置; 适当扩大栽培床的槽腔; 夏天采用低温的地下水配制贮液池中营养液, 或降低温室(大棚)的气温。

关键词 NFT 无土栽培 溶氧量

一 前 言

营养液膜技术 (Nutrient Film Technique) 在世界上是已经有相当生产规模的无土栽培技术^[1, 11, 12]。“七五”期间, 我国的农业工程和园艺学专家相结合, 对此进行了跟踪研究。在所研制的设施上进行叶菜类(生菜等)和果菜类(番茄、黄瓜等)蔬菜的试验研究, 特别注意到营养液的溶氧量问题。已有的研究指出: 充足的氧气供给是维持植物根系正常生长和生理功能的重要条件^[3, 10, 11]。NFT 有一部分根系暴露在潮湿空气中, 形成气生根, 直接从空气中吸氧, 比深水培供氧条件有较大改善。但新生根主要分布在根底部, 仍处在供氧困难状态^[4], 长期供氧不足, 导致根系生长不良, 影响作物产量, 长期浸在缺氧营养液中的根也容易腐烂。各种作物对根系缺氧的敏感程度不同, 但要求 NFT 能提供富氧的营养液是一致的。为此对提高营养液中溶氧量的有关诸因素进行试验探索, 以期确定改善 NFT 设施的有效途径。

二 试验设备和方法

试验是在结合生产的条件下进行的。所用的设备有三种, 编号为№1、№2、№3。

№1 设备: 栽培床用聚苯乙烯泡沫板 ($\delta 25$) 粘结成槽形, 槽底铺塑料薄膜和无纺布, 床宽 400mm, 床长 21.5m, 坡降 1/70。栽培床的空腔高 25mm, 宽 350mm。营养液流量为平均每行 4.5L/min, 贮液池容量 1.1t, 塑料大棚 (6m×30m) 内, 共放置 4 个栽培床。栽培番茄, 每个栽培床种一行, 株距 20cm, 双杆整枝。营养液用浙试 1 号配方。EC 值 2.0MS/cm, pH6.5 左右。

* 农业部“七五”重点科研项目 5-02-03 资助

№2 设备：栽培床用木框构成，下铺 $\delta 0.5$ PVC 板，上铺塑料薄膜，定植板仍用聚苯乙烯泡沫板，床宽 960mm，床长 22.5m，每床栽植 2 行黄瓜，坡降 1/100，栽培床空腔高 25mm，宽 417mm（每行），营养液流量每行平均 2.7L/min，贮液池容量 2.5t。营养液用园试配方，EC1.8~2.0MS/cm，pH6.0 左右。

№3 设备：栽培床与№1 的构造相似，床宽 1m，床长 23m。原设计栽培床空腔：腔高 25mm，种叶菜腔宽 200mm，种果菜腔宽 400mm，改进后腔高 40mm。在玻璃温室内，每床种植 5 行生菜，2 床共计 930 株，营养液池 1.5m³ 容量，营养液流量每行平均 2.5L/min，床坡降 1/80。营养液用浙试 1 号配方。EC1.5MS/cm 上下，pH6.5 上下。

测试方法：栽培床内的营养液层约 1cm 上下，测氧仪的测头较大，采用汲取法测定，虹吸到大烧杯中，并溢出 1/3，以防溶氧损失或增加^[8]。迅速把 RSS-5100 型便携式数字测氧仪测头插入烧杯读数，同时读出营养液温度。温室、大棚的气温和光照强度是行间高 1m 处的测定数值。贮液池的溶氧量直接用测头插入测定。营养液饱和溶氧量用标准大气压下纯水的饱和溶氧量表示，溶氧饱和度用测得的溶氧量数值占同水温纯水的饱和溶氧量的百分比表示^[7, 8]。数据进行相关回归分析及显著性检验^[9]。

三 试验结果和分析

(一) 气温、液温、光照的日变化

在设备№1 和№2 上测定了气温、液温和光照的各种变化，测定是在整个生长期多次抽样进行，现取两个生长期比较典型的日变化曲线予以说明（见图 1 和图 2）。

气温、液温、光照的最大值均在 14:00 前后。气温和液温的变化呈正相关，相关系数大于 0.90。由于二种设备贮液池均设在地下，因此液温变化稍呈平缓。

6 月 20 日的液温曲线（图 2）在中午 12:00 起开始下降趋势。这是因为入夏（6 月中）起，为降低液温，每日中午向贮液池灌注井水。

(二) 栽培床不同部位和贮液池的营养液溶氧量的变化

在№1 设备上测定的各部位溶氧量日变化见图 3，饱和溶氧量和各部位溶氧量都在 15:00 降到最低点，随后略有回升。溶氧饱和度在早上 6:00 时，贮液池 94.8%，供液口 94.8%，排液口 81.9%，而到下午 15:00 时，贮液池 79.3%，供液口 81.2%，排液口 63.5%。

从 6 月 20 日气温明显升高（见图 4），早上 6:00 贮液池 67%，供液口 86.8%，排液口 50.6%，中午 12:00 贮液池 63%，供液口 69.6%，排液口 38.4%，溶氧明显不足；而 15:

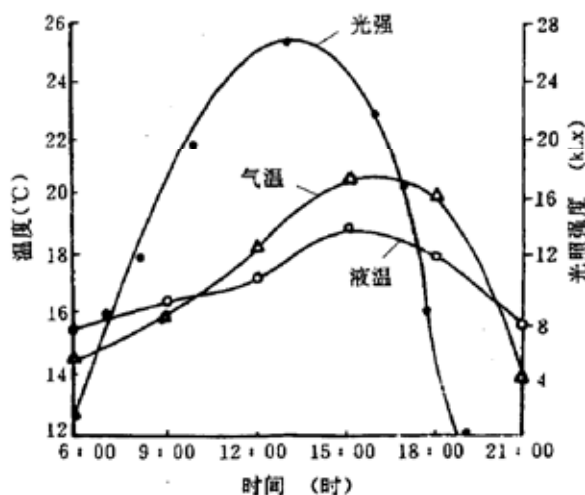


图 1 栽培床上液温、温室气温、光照强度的日变化 (5 月 5 日 №2)

00 前池中加进井水, 液温下降 (见图 2), 溶氧饱和度明显回升, 贮液池 78.7%, 供液口 73.1%, 排液口 83.7%。由此可见液温起显著作用, 降温可改善溶氧情况。

供液口和排液口的溶氧量差值 (Inlet-Outlet) 的日变化曲线见图 5, 加上空栽培床 (不栽培作物) 上营养液自供液口到排液口方向流动的溶氧量的增加值 Δ , 得到实际耗氧量日变化曲线 (虚线表示)。

(三)营养液在栽培床流动时的变化

在 NFT_{No}2 上测定了有作物时的沿长度方向各部位的溶氧量, 以供液口作为零点, 见图 6 (a), 等黄瓜拉秧后栽培床上没有作物时, 测定溶氧量, 见图 6 (b)。

由于两次测定不在同一时间, 第二次测定时液温已经比第一次高出 10℃ 以上, 两者只做定性的比较。

由图 6 (a) 可见营养液出供液口时溶氧量最高, 但遇到作物根系后, 在几米距离内迅速下降, 然后以近似线性递减。由图 6 (b), 栽培床不栽培作物时, 营养液自供液口向排液口流动溶氧量递增。因此在图 6 (a) 上的虚线表示空床时溶氧的增长, 栽培床全部根系吸取的溶氧量应为: $\Delta + (\text{Inlet-outlet})$ 。

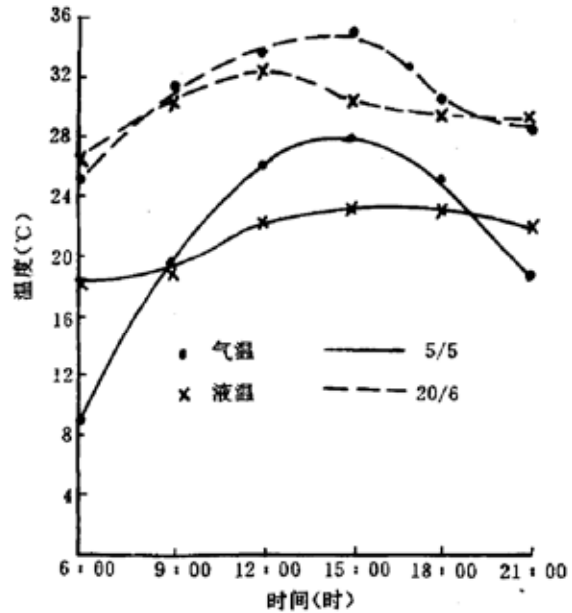


图 2 NFT 液温和大棚气温的日变化_{No}1

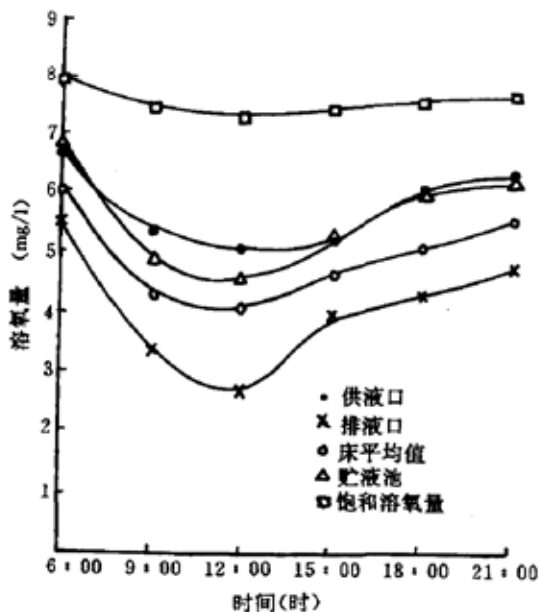


图 3 NFT 营养液溶氧量日变化 (5月5日_{No}1)

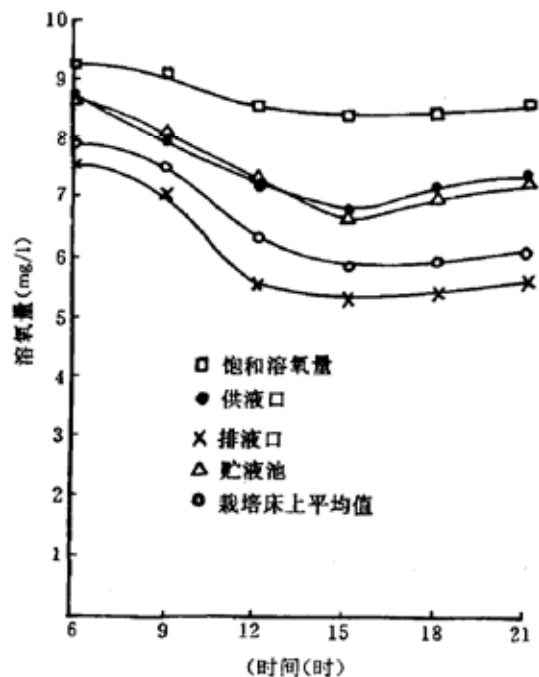


图 4 NFT 营养液溶氧量日变化 (6月20日_{No}1)

试验证明，NFT 方式虽然为植物的气生根吸取空气中氧气创造条件，但长期在水中的水生根仍然是吸收氧的重要部分。

据资料介绍：果菜类的番茄和茄子，根系从空气和水中吸取氧量的比率约为 2: 1^[4]。我们从栽培床密闭的聚苯板和液面上的小空间的不同部位，测定了生菜的根系在空气中吸取氧的情况；从根系群体同周围小环境的氧含量变化，证明即使根系很小的叶菜类作物，从空气中吸取氧的作用（表 1）。

表 1 NFT№3 栽培生菜的栽培床各部位小空间中含氧气百分比(%) 4月20日

生菜状况	小苗, 叶 10 片 叶长 10cm	小苗, 叶 10 片 叶长 10cm	叶 18 片 大苗叶长 20cm	大气
测定部位 (定植板编号)	№.2	№.6	№.12	21.3
含氧百分比 (%)	20.9	20.9	20.5	

注：定植板编号是从供液口起，每个 1.5m 长的定植板（聚苯板）为一试验小区，安排生长期不同的生菜，每一块定植板上作为一个处理。

从表 1 可见，不同生长期的生菜根系从周围空气中吸收氧气的能力的细微差异，并且显示长大到 20cm 叶长的生菜根系群体周围空气含氧比大。

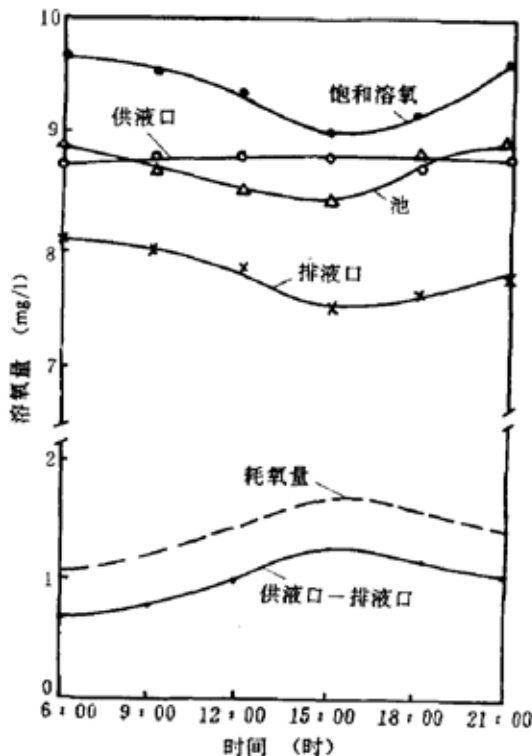


图 5 NFT №2 各部位溶氧量日变化

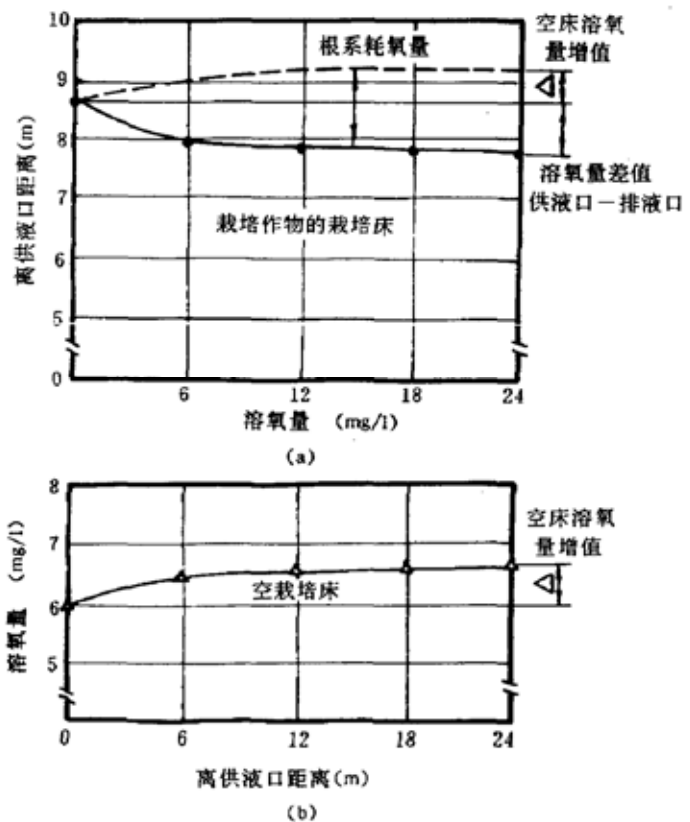


图 6 NFT №2 栽培床上溶氧量分布

由上述的两方面，显示了栽培床的定植板到槽底之间的空间，既要向根系（尤其是果菜类蔬菜如番茄的大根系和茂密的气生根）直接供给氧气，还要向营养液溶解氧，这个空间有

重要的作用。原来在设计上仅考虑如何加强聚苯乙烯泡沫板的定植板和床槽之间接合面的密闭性,以增加隔热性(冬季使加过热的营养液热量不致在缝隙中散失,夏季则防止高温向液面侵袭)。由试验启示,密闭性较好的栽培床,其空腔的尺寸必须放大,以保证比较充分的空气存留量。

(四)营养液溶氧量与环境因子间的关系

把测试数据进行统计整理,探明营养液溶氧量同环境诸因子如:气温、液温、光照和部位之间的关系(表2和表3)。

表2 NFT №.1, 番茄试验营养液的溶氧量与液温气温之间关系

日期	项目(关系)	A	B	相关系数 r
番茄前期 (5月5日)	栽培床溶氧量—气温	8.85	-0.105	-0.792
	栽培床溶氧量—液温	14.78	-0.386	-0.919**
	贮液池溶氧量—气温	9.61	-0.100	-0.905*
	贮液池溶氧量—液温	14.57	-0.335	-0.958**
番茄中后期 (6月20日)	栽培床溶氧量—气温	10.32	-0.173	-0.864*
	栽培床溶氧量—液温	14.98	-0.336	-0.919**
	贮液池溶氧量—气温	14.69	-0.305	-0.917**
	贮液池溶氧量—液温	17.53	-0.399	-0.926**

注:①A、B为回归方程 $y = A + Bx$ 的系数

② *——5%显著水平; **——1%显著水平

表3 NFT №.2, 黄瓜试验(5月5日)
营养液溶氧量与气温、液温、光照在栽培床上的部位之间的关系

关系项目	A	B	相关系数 r
溶氧量——在栽培床上部位	7.89	1.02	0.988**
溶氧量——光照强度	—	—	-0.111 _{ns}
溶氧量——气温	—	—	-0.756 _{ns}
溶氧量——液温	9.694	-0.09	-0.831*

注:①A、B为回归方程 $y = A + Bx$ 的系数

② *——5%显著水平; **——1%显著水平, ns不显著

由表2和表3可见:无论是栽培床或贮液池,栽培番茄、黄瓜,栽培前、后期,床和池的营养液溶氧量同液温呈显著的负相关,即:有反比的线性关系 $y(\text{溶氧量}) = A + Bx$ (x 液温,式中B为负值)。因此,液温愈高、溶氧愈少。把有关曲线集中在图上(见图7),并添上液温——饱和溶氧量曲线^[10]。图7上饱和溶氧量线以下的斜线有效,对15~30℃液温之间的有实用意义。№1设备的4条线大致呈相似的斜率,而№2设备则斜率较小,同5/5的№1设备栽培床的线相交在 $x = 18^\circ\text{C}$,说明液温18℃以下,№2的栽培床溶氧量较№1的小,18℃以上№2的溶氧量反而较大。№2设备的溶氧量曲线斜率较小,液温对溶氧量的影响比较缓慢。考察其原因,主要是其贮液池容量比№1和№3大一倍,栽培床也是用原来深水培(DFT)一类的设备改造成的NFT,供液口的充氧效果并不理想,因此溶氧量起点低,但变化缓慢。前面已提到,№1的贮液池在5/5的15:00时,溶氧量饱和度降到79.3%,供液口81.2%,而同一时刻№2的贮液池溶氧量饱和度仅降到91.4%,供液口

98.2%。探寻原因：两种池子均无自动供水保持恒定液面位置的装置，也无附加充氧装置（如：液泵分一部分液流到池中，进行飞溅充氧等），这时池的容量有重要作用，较大的容量，除了有保持稳定的营养液浓度（EC 值）和酸碱度（pH 值）之外，也有使得溶氧量较易保持稳定的作用。这是由于：在工作时，除了相当一部分营养液在栽培床上流动，还有较多的营养液存留在池中，液温受的影响小（热总容量大），同时溶氧量变化较小（O₂ 总量大，并且液温较稳定，双重作用）。测量№1 的贮液池液面变化，启动工作后，液面迅速下降，连续工作一段时间，池中留下的营养液据测算只有 0.65 吨，占总容量 59%。而№2 贮液池在工作时，存留在池中的容量占总容量的 89%，即 2.2 吨营养液。

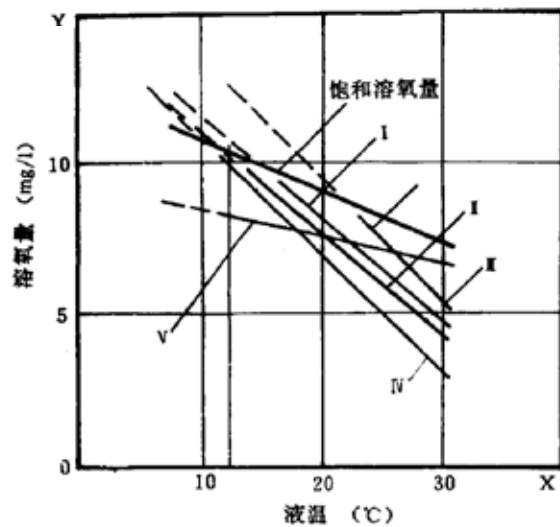
当然，池容量过大，建筑投资大；营养液量大，每次换液耗资也较大。从设计上考虑增加浮球阀自动加水，以及从液泵的液流中分一股流量，在长方池的两长边装设多孔约 24 孔的塑料管共长 2.6m，大量的细流喷射到液面上，扩大充氧效果，并且在栽培床的回水管接到贮液池的回水口上，也接上钻许多细孔的粗塑料管（长 1.3m 20 孔），使回来的营养液也变成多股细流，造成一般回液充氧难以比拟的增氧效果。这些改进集中在№3 设备的贮液池建设上。据测定，整个 1.5 吨容量液池中营养液池的溶氧量饱和度（上下三层共 18 个测点）平均 97% 以上（此时营养液采用电加热，达 21℃ 上下）。未改进的设备№1，相同液温贮液池溶氧量饱和度为 88%。设计时贮液池工作留存营养液容量占总容量 75%，稳定性显著改善，据测定供液口溶氧饱和度增加到 98% 左右，上下幅度不大。

另一个环境因子是光照，虽然有些文献上分析到光强增加光合作用，但未确定光强是否直接影响到营养液中耗氧量之变化。试验（表 3）表明：溶氧量消耗同光强无显著的相关。

四 小 结

1. 营养液温度同溶氧量呈显著的负相关。进入夏季，营养液温度不断上升，溶氧量却不断减少。而作物生长逐渐进入中后期，根系需要更多的溶氧供给。这是 NFT 设施的设计和生产管理要密切注意的问题。

2. 增加贮液池的容积有利于溶氧量的稳定，但受经济条件限制。贮液池容积决定于作物种类（叶菜或果菜类、根系大小等）、栽培床数量和长度、栽培作物株数等，液泵启动向栽培床供液后，贮液池液面下降，减少的营养液容积同总容积之比，达到 40% 以上，溶氧量



- I—栽培床(番茄 6 / 20), №1 $Y = 14.98 - 0.34x$
- II—贮液池(番茄 5 / 5), №1 $y = 14.6 - 0.36x$
- III—贮液池(番茄 6 / 20), №1 $Y = 17.53 - 0.399x$
- IV—栽培床(番茄 5 / 5), №1 $Y = 14.8 - 0.39x$
- V—栽培床(黄瓜 5 / 5), №1 $Y = 9.694 - 0.09x$

图 7 溶氧量同液温的关系

饱和度的稳定性显著变坏。初步认为:此比值不宜大于25%。

3.从液泵分流(例如1/10流量),并连接多孔管向液池表面喷射多股细流,同时在回液口连接多孔管,使回液形成淋落的细流,对贮液池提高溶氧饱和度有明显效果。

4.增加栽培床内腔空间,以充分保证气生根直接吸氧需要,以及向流动着的营养液面补充溶解氧的需要。

5.夏季营养液降温,在有条件的地方,可考虑用较深的井水,直接注入贮液池配制营养液,有显著效果。如华北地区原来就普遍采用井灌,不难实现。

无条件直接使营养液降温,应重视温室、大棚夏季降温措施的研究。

6.栽培床供液口到排液口的各部位的作物根系,处在不同溶氧供给水平。当NFT总的溶氧量下降时,出现栽培床前后部作物长势明显差别,排液口附近出现低产趋势。

进一步定量的研究和优化设计,有待今后开展更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 李式军等编译:《现代无土栽培技术》,北京农大出版社,1988, p13.
- [2] 向井隆司等:“营养液膜栽培夜间冷液处理装置促进草莓成花的技术”,《农业新技术新方法译丛》,1989.
- [3] M C Drew, Plant injury and adaption to oxygen deficiency in the root environment; A review, Plant and Soil 75, 179-199, 1983
- [4] 李式军等编译:《现代无土栽培技术》,北京农大出版社,1988, p54~57.
- [5] Gislerod and Kempton, The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato cultures, Scientia Horticulturae, 20, 23~33, 1983.
- [6] Jackson, M B, et al, Poor aeration in NFT and a means for its improvement, J.Hort. Sci. 59, 439 ~ 448, 1984.
- [7] A.H. Alwan and P. Newton, Dissolved oxygen, root growth, nutrient uptake and yields of tomatoes, sixth international ongress on soilless culture, Lunteren 1984, 81~111.
- [8] 科研协作组编著:《环境污染分析方法》,第一卷“无机物分析”,第二版,科学出版社, p381~386, 1987.
- [9] F.S.梅里特:《工程技术常用数学》,科学出版社,1978.
- [10] 山崎肯哉著,刘步洲等译:《营养液栽培大全》,北京农大出版社,1989.
- [11] 马太和:《无土栽培》,北京出版社,1985.
- [12] RESH, Howard M., Hydroponic Food Production, Woodbridge Press Publishing Company, 1987.

Study on Oxygen Content of Nutrient Solution in NFT System of Hydroponic Culture

Wang Ruxiang

(Chinese Academy of Agricultural Engineering Research and Planning)

Xu Zhihao

(Zhejiang Academy of Agriculture)

Ji Ying Zhang Jiazhi

(Chinese Academy of Agricultural Engineering Research and Planning)

Abstract

By exploring the significant relationship between the environment factors and the oxygen content of nutrient solution in NFT system, some suggestion about engineering design of the NFT system are offered to improve oxygen supply to roots. For instances:

- Enlarging the volume of solution tank properly;
- Attaching the sprinkling device of circulating solution;
- Enlarging the tunnel of bed properly.

Using the cold underground water to make up the nutrient solution in the tank, or reducing the greenhouse temperature in summer.

Key words NFT Hydroponic culture Oxygen content solving in solution