

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.021

无土栽培基质水分特性参数研究*

甘露¹ 范海燕² 吴文勇² 刘洪禄² 马福生² 牛勇²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100048)

摘要: 选用设施无土栽培常用8种基质, 试验测定其孔隙度、渗透系数、水分特性曲线、扩散率等水分特性参数, 分析得到: 基质的水分扩散率与基质含水率之间的关系都符合经验公式 $D(\theta) = ae^{b\theta}$, 呈指数函数变化, 且决定系数较高; 基质的导水性用扩散率来表示, 得到珍珠岩和蛭石的供水速度快, 但不利于保水, 降低了灌水效率。综合分析8种基质得到, 除珍珠岩、蛭石外, 其他6种基质总孔隙度均在70%~90%之间, 水气比均在2.0~4.0之间, 均可作为育苗和栽培基质; 采用矩阵法综合评价, 得出以国产草炭与珍珠岩质量比2:1, 国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比3:1:1为基质时最优。

关键词: 无土栽培 基质 孔隙度 渗透系数 水分特性曲线 水平扩散率

中图分类号: S275.5; S317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0113-06

Water Retention Parameters of Soilless-culture Substrates

Gan Lu¹ Fan Haiyan² Wu Wenyong² Liu Honglu² Ma Fusheng² Niu Yong²

(1. College of Resources and Environment, Southwest China University, Chongqing 400715, China

2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Eight kinds of substrates were used in the experiment of the soilless culture. The water retention parameters, such as porosity, coefficient of permeability, water retention curve and diffusivity were measured. It was obtained that water diffusivity and water content of substrates conformed to empirical formula $D(\theta) = ae^{b\theta}$ and showed the variability of exponential function and high correlation coefficient. The perlite and vermiculite had high speed of water supply, but low water retaining capacity and irrigation efficiency. The total porosity of other six substrates except for perlite and vermiculite varied from 70% to 90%, and their water-air ratios were between 2.0~4.0. Therefore, they could be used as seedling and culture substrates. Based on the comprehensive matrix analysis, the result showed that the optimal ratio of peat and perlite was 2:1, and that of peat, vermiculite and perlite was 3:1:1.

Key words: Soilless-culture Substrate Porosity Permeability coefficient Water retention curve Horizontal diffusivity

引言

设施基质栽培已成为都市现代农业的主推生产模式之一^[1~2], 探索适宜本地的经济、高产、高效的栽培基质, 对应用无土栽培技术具有重要的现实意义。目前, 已有国内外学者针对无土栽培基质对果蔬、花卉的生长发育、产量及品质的影响进行了报道^[3~15]。但研究仅集中在利用植物长势、产量及品

质作为指标对基质的原材料比选和适宜性评价方面, 对基质水分物理特性研究仅局限于孔隙结构、容重等简单指标的测试评价方面。本文从基质水动力学特性参数测试和评价出发, 选用设施无土栽培常用的8种基质, 探讨不同基质的持水性、释水性及水分有效性, 以期为基础比选提供更为完善的理论基础。

收稿日期: 2012-11-12 修回日期: 2012-12-17
* 农业部948计划资助项目(2012-G33-03)和北京市重大科技攻关项目(Z111100056811035)
作者简介: 甘露, 博士生, 主要从事农业资源与环境研究, E-mail: forrestgump2000@126.com

1 试验材料

1.1 基质基本性质

国产草炭的容重为 0.2 ~ 0.6 g/cm³,总孔隙度较大,持水能力强,呈弱酸性,缓冲性能好,有机质含量高,一般不单独使用;蛭石容重小,为 0.07 ~ 0.25 g/cm³,总孔隙度较大,大小孔隙比约 1:4,通气持水强,具有较高的缓冲性和离子交换能力,呈中性或微碱性,吸水能力强,绝缘性好,但易破碎,不宜重复使用;珍珠岩容重较小,为 0.03 ~ 0.16 g/cm³,总孔隙度大,通气排水性好,几乎没有缓冲性能,呈中性,稳定性好,不易分解,但受压易破碎;德国进口草炭容重 0.1 ~ 0.53 g/cm³,与国产草炭相近,总孔隙度较大,持水能力强,阳离子代换量低,碳氮比高;复合基质由 2 种或几种基质按照一定比例混合而成,其目标和要求是:容重适宜,增加孔隙度,提高含水率和空气含量,改善理化性状,提高栽培效果;砂土容重大,持水力差,升降温快,无阳离子代换量,灌水时应注意少灌勤灌。

1.2 试验方案

试验在北京市灌溉试验中心站土壤物理试验室内进行,选用无土栽培常用基质,进行单因素试验,并选取砂土、砂壤土作对比试验,共设 10 个处理,分别为国产草炭(T1),蛭石(T2),珍珠岩(T3),德国进口草炭(T4),国产草炭与蛭石质量比 2:1(T5),国产草炭与珍珠岩质量比 2:1(T6),国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比 1:1:1(T7),国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比 3:1:1(T8),砂土(CK1),砂壤土(CK2)。因珍珠岩、德国进口草炭颗粒较大,装填基质时分别按风干容重 0.12 g/cm³、0.15 g/cm³装填,砂土、砂壤土按 1.4 g/cm³装填,其他处理均按 0.25 g/cm³装填。试验测定各处理的孔隙度、渗透系数、水分特性曲线、扩散率等水分特性参数,每个处理重复 3 次。

2 试验方法

2.1 孔隙度

孔隙度的测定采用饱和重力排水法^[16],包括总孔隙度、持水孔隙度、通气孔隙度及水气比的测定。取一已知容积(V)的容器,称其质量(W₁),在此容器中按设计容重装填待测基质,称质量(W₂),将装有基质的容器浸泡 24 h,称质量(W₃),将容器上口用一已知质量(W₄)的湿润纱布包住,以防止细小颗粒渗出,把容器倒置至容器中没有水分渗出,称其质量(W₅)。基质的孔隙度计算公式为

$$\varphi = \frac{W_3 - W_2}{V} \times 100\%$$

(1)

$$\varphi_t = \frac{W_3 + W_4 - W_5}{V} \times 100\%$$

(2)

$$\varphi_c = \frac{W_5 - W_2 - W_4}{V} \times 100\%$$

(3)

$$d = \frac{\varphi_c}{\varphi_t}$$

(4)

式中 φ ——总孔隙度,%
 φ_t ——通气孔隙度,%
 φ_c ——持水孔隙度,%
 d ——水气比
 $W_1 \sim W_5$ 的单位为 g; V 的单位为 cm³。

2.2 渗透系数

采用定水头法测定^[17]。按试验处理要求装填环刀,浸泡 24 h,取出环刀,并在上面接一空环刀,严密封接口至不漏水。将结合的环刀放至瓷漏斗上,瓷漏斗下方接烧杯。为防止渗漏过程中基质随水分沿瓷漏斗流出,在结合的环刀底部加滤纸。空环刀内加水至水面低于环刀口 1 mm 处,自漏斗开始滴水时计时,记录 1、3、5、7、10、15、20 min 等时的渗漏量,同时将空环刀水面加至原来高度,并记录水温,至渗漏量稳定后结束试验。每个处理重复 3 次取平均值。渗透系数计算公式如下:

温度 T 时渗透系数

$$K_T = vL / (h + L)$$

(5)

式中 v ——渗透速度,mm/min
 h ——水层高度,cm
 L ——基质高度,cm
10℃ 时渗透系数

$$K_{10} = K_T / (0.7 + 0.03T)$$

(6)

2.3 水分特性曲线

选用 1500F1 型压力膜仪,分别测定 0、0.01、0.03、0.05、0.1、0.3、0.5、1.0、1.5 MPa 条件下的基质含水率,并绘制水分特性曲线。

2.4 水平扩散率

采用水平土柱渗吸法测定^[18]。按试验处理要求的风干容重将基质(或土壤)均匀装入直径为 5 cm、长为 50 cm 水平有机玻璃筒,忽略重力作用,用马氏瓶供水,试验装置如图 1,记录马氏瓶水位变化及湿润锋每过 1 cm 所用时间,在试验结束时,从湿润锋开始迅速取土(或基质),称质量进行加热干燥,测出土(或基质)柱的含水率分布。有了试验时间 t 和该时刻的土(或基质)柱含水率分布,用

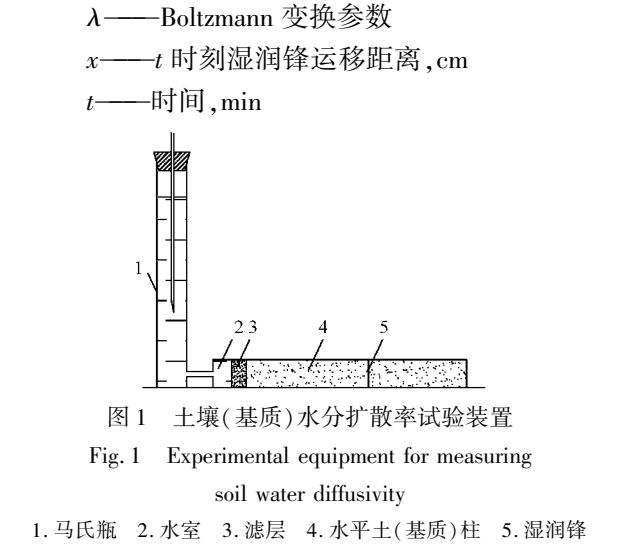
$$\lambda = xt^{-1/2}$$

可算出不同 θ 值对应的 λ 值,则水平扩散率计算公式为

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta \lambda}{\Delta \theta} \sum_{\theta_0}^{\theta} \lambda \Delta \theta$$

(7)

式中 $D(\theta)$ ——水平扩散率,cm²/min
 θ_0 ——初始含水率
 θ ——含水率



2.5 评价方法

将矩阵法应用于基质综合评价。矩阵法是指将各项开发活动和受影响的各项环境因子组成一个矩阵, 并建立直接的因果关系, 用以表示活动项目对

环境因子产生的影响^[19]。本文将总孔隙度、水气比、渗透系数、水分有效性、导水性影响下的 8 种基质的优劣排序值组成一个矩阵, 越优数值越大, 最后根据综合得分对不同基质进行综合评价。

3 结果与分析

3.1 孔隙度

在基质育苗及基质栽培生产实际中, 总孔隙度一般在 70% ~ 90% 之间, 水气比一般在 2.0 ~ 4.0 时, 较为合理, 基本能满足作物对水分和氧气的需 求^[20]。但单一基质很难同时满足这些要求, 如表 1, 蛭石 (T2) 持水孔隙度较大, 即蛭石具有较好的持水性, 但其通气孔隙度较小、水气比不合理, 珍珠岩 (T3) 的通气孔隙度较大, 即珍珠岩具有较好的通气性, 但其持水性较小, 不利于保水, 因此, 在 T5、T6、T7、T8 处理的混合基质中, 是利用蛭石提高了其持水性, 利用珍珠岩提高了其通气性。

表 1 孔隙度比较

Tab. 1 Comparison of different height containers										
参数	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	CK1	CK2
总孔隙度/%	80.11	81.10	82.41	81.82	78.09	82.45	78.42	84.73	50.74	40.55
通气孔隙度/%	18.38	14.91	37.10	18.01	19.51	21.90	20.70	21.90	2.84	1.94
持水孔隙度/%	61.73	66.19	45.31	63.81	58.58	60.55	57.72	62.83	47.90	38.61
水气比	3.35	4.44	1.22	3.54	3.00	2.77	2.79	2.87	16.87	19.90

如表 1, 基质的孔隙度明显高于砂土 (CK1)、砂壤土 (CK2), 这是由于砂土、砂壤土的颗粒较小, 且容重远高于基质的容重, 从而造成砂土、砂壤土的孔隙度较小; 相比砂土、砂壤土, 基质中的水分更容易被植物吸收利用; 比较上述 4 种混合基质, T8 总孔隙度最大, 为 84.7%, 水气比为 2.9, 总孔隙度大, 通气性好, 水气比合理。

3.2 渗透系数

渗透系数是影响植株生长的重要指标, 适宜植物生长良好的土壤渗透系数因土壤的不同而不同, 通常情况下, 砂壤土、壤土和粘土较为适合农作物的生长, 这 3 类土壤的渗透系数可取 6×10^{-2} 、 6×10^{-3} 和 6×10^{-4} mm/min^[21]。目前, 国内外对基质渗透系数的研究较少, 基质的渗透系数过高, 基质不易持水, 水迅速下移, 灌水后易渗漏, 造成水源的浪费; 渗透系数过低, 说明基质的通气性较差, 影响植株根系的呼吸与生长^[22]。

如图 2, 除 T3、CK1 外, 各处理标准差均在 0.2% ~ 10% 之间, 波动不大, 说明该渗透系数的测定方法能够表征基质的渗透系数。砂壤土的渗透系数为 5×10^{-2} mm/min, 满足农作物的生长要求; 比较 CK2 与基质的渗透系数可知, 基质的渗透系数明

显高于 CK2, 这是由于基质的通气孔隙较大, 灌水后基质中水分的下渗速度较砂壤土快, 达到作物所需水量的时间短, 适宜少灌频灌; 比较基质的渗透系数可知, T2 渗透系数最大为 2.20 mm/min, T6 最小, 为 0.28 mm/min, 且单一基质的渗透系数明显高于复合基质, 这是由于复合基质中较多的小颗粒成分阻塞了基质孔隙, 造成渗透较慢, 因此, 若选用单一基质作为栽培及育苗基质时, 应注意合理调整灌水频率。

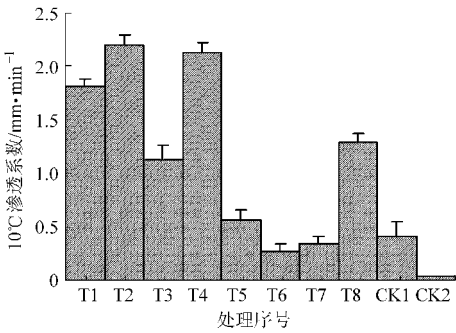


图 2 渗透系数比较

Fig. 2 Comparison of permeability coefficient

滴灌工程设计中, 滴头间距是影响灌水均匀度的重要指标, 而渗透系数是影响滴头间距的重要指标^[23]。应进一步结合滴头流量, 确定适宜基质的滴

头间距,提高滴灌系统的水分有效利用率。

3.3 水分特性曲线

如图 3,在水吸力小于 0.1 MPa 的低吸力阶段,10 个处理的体积含水率都随吸力的升高急剧减小,持水性以 T8、T2 最大,CK1 最小;在水吸力大于 0.1 MPa 阶段,体积含水率随吸力升高而略微减小。有效水范围内即基质水吸力在 0.01~0.1 MPa 范围内基质的含水率分布见图 4,各处理标准差均在 0.8%~3%之间,波动较小,说明该水分特性曲线能够表征基质水分特性曲线。

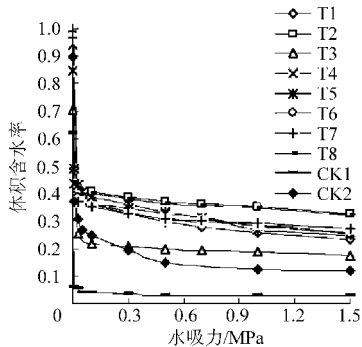


图3 水分特性曲线比较

Fig.3 Comparison of moisture retention curves

近年来,康跃虎等通过控制土壤基质势来控制滴灌情况下适宜白菜、豇豆、番茄等蔬菜生长及水分高效利用的灌溉水量,指出蔬菜的土壤基质势下限在-0.05~-0.02 MPa 范围内来指导灌溉^[24~30]。将基质水吸力在 0.01~0.1 MPa、0.01~0.05 MPa、0.05~0.1 MPa 范围内的体积含水率作为划分基质利用水、易利用水、缓冲水的依据。

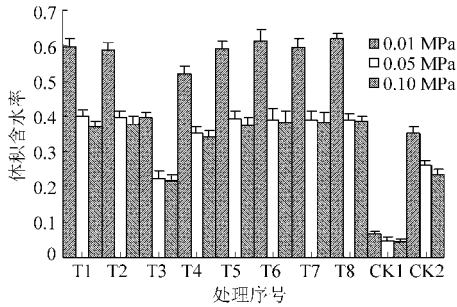


图4 有效水范围内基质含水率比较

Fig.4 Comparison of water content between 0.01~0.10 MPa

利用水、易利用水、缓冲水含水率是判断植物可以吸收水分的多少,是指导灌溉频率的重要指标^[22]。由已知的水分特性曲线,可以得到 8 种基质的利用水、易利用水、缓冲水含水率,见表 2。

表2 利用水、易利用水、缓冲水含水率

Tab.2 Available water, easy available water and buffer capacity

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	CK1	CK2
利用水	0.227	0.208	0.179	0.181	0.217	0.233	0.213	0.235	0.020	0.117
易利用水	0.196	0.193	0.171	0.171	0.198	0.226	0.206	0.229	0.017	0.093
缓冲水	0.031	0.015	0.008	0.010	0.019	0.007	0.007	0.006	0.003	0.024

如表 2,基质的利用水含水率要明显高于 CK1、CK2 的利用水,说明基质的有效水高,作物在基质中可吸收利用的水分高于砂土、砂壤土;比较 8 种基质,利用水、易利用水均以 T8 最高,其次为 T6,说明 T8、T6 处理的有效水含水率高,且作物可吸收利用水分高,与其他几种基质相比,灌水时可适当减小其灌溉频率。

3.4 水平扩散率

如图 5,当 $\theta < 0.3$ 时,扩散率随含水率的增加而变化缓慢,基质中水分以水气运动为主^[31],当 $\theta > 0.3$ 时,扩散率随含水率的增加而迅速增加,较高基质含水率利于基质扩散运动的进行,当 $\theta = 0.3$ 时,各处理的扩散率值见表 3。

由图 5 可知,当 $\theta = 0.3$ 时,砂土的扩散率最大,为 $654.75 \text{ cm}^2/\text{min}$,说明砂土的水平吸渗速度较快,水分在水平方向上的传播速度快;珍珠岩其次,为 $249.15 \text{ cm}^2/\text{min}$,主要是由于珍珠岩的质量较轻、容重较小、颗粒粒径较大,水分在珍珠岩中的扩散速度快所致;与砂壤土比较,基质的扩散率较高,说明基

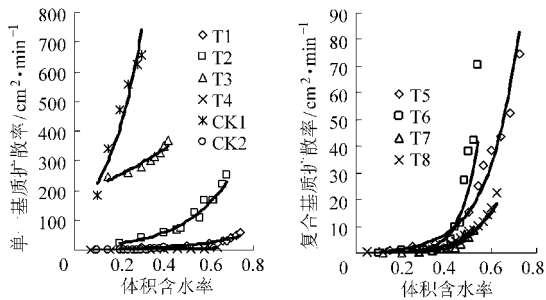


图5 扩散率与含水率关系曲线

Fig.5 Correlation curve between diffusivity and water content 质的水平扩散速度快,因此,选用基质作为育苗及栽培基质时,采用滴灌进行灌水时能有效增加其灌水均匀度,利于作物水分的吸收。

拟合扩散率 D 与含水率 θ 的关系曲线,得到各处理的扩散率 $D(\theta)$ 与含水率 θ 的关系式见表 3。

如表 3,基质的水平扩散率与基质含水率之间的关系都符合经验公式 $D(\theta) = ae^{b\theta}$,呈指数函数变化,且两者之间具有极显著的正相关关系。

3.5 综合性分析

应用矩阵法对 8 种供试基质进行综合评价,总

表 3 扩散率拟合关系式比较

Tab.3 Comparison of diffusivity fitted formulas

序号	拟合关系式	决定系数 R^2
T1	$D(\theta) = 1.6013e^{4.5724\theta}$	0.977 1
T2	$D(\theta) = 8.5301e^{4.8491\theta}$	0.973 2
T3	$D(\theta) = 188.64e^{1.4685\theta}$	0.905 1
T4	$D(\theta) = 0.6172e^{3.8262\theta}$	0.980 4
T5	$D(\theta) = 0.3662e^{7.5308\theta}$	0.984 4
T6	$D(\theta) = 0.0256e^{13.694\theta}$	0.905 0
T7	$D(\theta) = 0.013e^{12.3835\theta}$	0.982 3
T8	$D(\theta) = 0.1142e^{8.186\theta}$	0.951 1
CK1	$D(\theta) = 122.04e^{6.0059\theta}$	0.915 5
CK2	$D(\theta) = 0.0034e^{18.611\theta}$	0.957 2

孔隙度以 70% ~ 90% 之间,越大得分越高为标准;水气比以接近 3.0 为优;因基质不易持水,灌水后易渗漏,因此渗透系数越低得分越高;水分有效性以基质的利用水含水率越大得分越高;扩散率的大小影响基质中作物对水分的吸收利用,扩散率越大得分越高。最后根据综合得分对不同基质进行综合评价,见表 4。

表 4 矩阵表

Tab.4 Matrix table

影响因子	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
总孔隙度	3	4	7	5	1	6	2	8
水气比	4	2	1	3	8	5	6	7
渗透系数	3	1	5	2	6	8	7	4
水分有效性	6	3	1	2	5	7	4	8
扩散率	6	7	8	4	5	2	1	3
综合得分	22	17	22	16	25	28	20	30

显见,T6、T8 综合得分最高,且明显高于其他基质,说明 T6、T8 优于其他基质,即 T6、T8 处理总孔隙度较大、通气性较好、水气比合理,且有效水含水率较高,有利于作物水分的吸收。虽 T8 渗透系数、扩散率相对较小,但灌水时可通过调节灌水频率及灌水量来控制其灌水均匀度。

4 结论

(1) 比较 8 种基质的孔隙度可知,以国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比 3:1:1 为基质时总孔隙度最大,为 84.7%,水气比为 2.9,通气性好,水气比合理。

(2) 比较基质的渗透系数可知,单一基质的渗透系数明显高于复合基质,选用单一基质作为栽培及育苗基质时,应注意合理调整灌水频率。

(3) 比较 8 种基质,以国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比 3:1:1、国产草炭与珍珠岩质量比 2:1 的利用水、易利用水含水率最高,即作物可吸收利用水分含水率高。

(4) 基质的水平扩散率与基质含水率之间的关系都符合经验公式 $D(\theta) = ae^{b\theta}$,呈指数函数变化,且两者之间具有极显著的正相关关系。

(5) 采用矩阵法综合评价,得出以国产草炭与珍珠岩质量比 2:1、国产草炭、蛭石、珍珠岩质量比 3:1:1 为基质时最优,这 2 种基质总孔隙度较大、通气性较好、水气比合理,且有效水含水率较高,有利于作物水分的吸收,可在生产中推广应用。

参 考 文 献

1 田吉林,汪寅虎. 设施无土栽培基质的研究现状、存在问题与展望(综述) [J]. 上海农业学报,2000,16(4):87~92.
Tian Jilin, Wang Yinhu. Current situations and prospects of researches on soilless-culture substrates [J]. Acta Agriculturae Shanghai,2000,16 (4):87~92. (in Chinese)

2 李式军,高丽红,庄仲连. 我国无土栽培研究新技术新成果及发展动向[J]. 长江蔬菜,1997(5):1~4.
Li Shijun, Gao Lihong, Zhuang Zhonglian. Achievement new technology of the recent past in soilless culture in China and its trend [J]. Journal of Changjiang Vegetables,1997(5):1~4. (in Chinese)

3 De Boodt M, Verdonck O. The physical properties of the substrates in hort[J]. Acta Horticulturae, 1983, 26: 37~44.

4 周艳丽,程智慧,孟焕文,等. 有机基质对比对番茄生长发育及产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(1):79~82.
Zhou Yanli, Cheng Zhihui, Meng Huanwen, et al. Effects of organic substrate compositions on growth yield and quality of tomato [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2005,33(1):79~82. (in Chinese)

5 李敬蕊,章铁军,高洪波,等. 不同基质对比对茄子幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(6):139~143.
Li Jingrui, Zhang Tiejun, Gao Hongbo, et al. Effects of different substrates on growth and chlorophyll fluorescence characters of eggplant seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010,19(6):139~143. (in Chinese)

6 王亚军,魏兴琥,谢忠奎,等. 不同基质对切花百合生长及种球的影响[J]. 西北农业学报,2003,12(4):109~112.
Wang Yajun, Wei Xinghu, Xie Zhongkui, et al. Effects of different culture medium on growth and bulb of cutting flower lily[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2003,12(4):109~112. (in Chinese)

7 张建华,邓扑. 不同栽培基质对红掌组培苗移栽成活及生长发育的影响[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2009, 28(6):624~626.

- Zhang Jianhua, Deng Pu. Effects of different culture medium on survival rate and growing situation of anthurium and rae anum tissue culture seedling after transplanting[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2009, 28(6): 624 ~ 626. (in Chinese)
- 8 张宁,冯美,平吉成. 不同栽培基质对草莓植株营养生长的影响[J]. 北方园艺, 2011(16): 51 ~ 53.
Zhang Ning, Feng Mei, Ping Jicheng. Effect of different substrates on growth of strawberry[J]. Northern Horticulture, 2011(16): 51 ~ 53. (in Chinese)
- 9 Dumroese R Kasten, Juha Heiskanen, Karl Englund, et al. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5): 2 018 ~ 2 027.
- 10 David W R. Water, media and nutrition for greenhouse crops[M]. Batavia, Illinois USA: Ball Publishing, 1996.
- 11 唐菁,康红梅. 几种栽培花卉基质的理化特性研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 291 ~ 293.
Tang Jing, Kang Hongmei. Physical and chemical properties of several important media[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(2): 291 ~ 293. (in Chinese)
- 12 赵九洲,陈洁敏,王义庆,等. 六种无土栽培代用基质理化特性的比较[J]. 青岛农业大学学报:自然科学版, 2001, 18(3): 161 ~ 164, 173.
Zhao Jiuzhou, Chen Jiemin, Wang Yiqing, et al. Studies on the physical and chemical characters of six-soilless-media[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 2001, 18(3): 161 ~ 164, 173. (in Chinese)
- 13 李静,赵秀兰,魏世强,等. 无公害蔬菜无土栽培基质理化特性研究[J]. 西南农业大学学报, 2000, 22(2): 112 ~ 115.
Li Jing, Zhao Xiulan, Wei Shiqiang, et al. Study on the physico-chemical properties of soilless cultural substrates of pollution-free vegetable[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000, 22(2): 112 ~ 115. (in Chinese)
- 14 陈振德,何金明,黄俊杰,等. 蔬菜穴盘育苗基质的选配及其理化特性研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 192 ~ 197.
Chen Zhende, He Jinming, Huang Junjie, et al. Composition and physical and chemical characteristics of plug seedling media of vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 192 ~ 197. (in Chinese)
- 15 田吉林,奚振邦,陈春宏. 无土栽培基质的质量参数(孔隙性)研究[J]. 上海农业学报, 2003, 19(1): 46 ~ 49.
Tian Jilin, Xi Zhenbang, Chen Chunhong. Study on the feasible parameter of substrate quality for soilless culture[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2003, 19(1): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 16 江胜德. 现代园艺栽培介质(选购与应用指南)[M]. 北京:中国林业出版社, 2006: 26 ~ 29.
- 17 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2005: 59 ~ 63.
- 18 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- 19 段兆麟. 环境因子权重值取值准则在“矩阵法”环境影响综合评价中的实践应用[J]. 云南环境科学, 2003, 22(4): 59 ~ 62.
Duan Zhaolin. Application on the matrix of environmental impact comprehensive assessment based on the principle of getting value from environmental elements proportion value[J]. Yunnan Environment Science, 2003, 22(4): 59 ~ 62. (in Chinese)
- 20 李斗争. 组成成分及其颗粒粒径对基质空隙特性的影响研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2006.
Li Douzheng. Study on effects of components and particle sizes on pore properties of media[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 21 杜延龄,许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
- 22 时连辉,张志国,刘登民,等. 菇渣和泥炭基质理化特性比较及其调节[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 199 ~ 203.
Shi Lianhui, Zhang Zhiguo, Liu Dengmin, et al. Comparison of physiochemical properties between spent mushroom compost and peat substrate and adjustment[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 199 ~ 203. (in Chinese)
- 23 姚振宪,张大鹏,姚淼森. 布瑞斯勒(Bresler)从土壤水力参数确定滴头间距的数学模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 65 ~ 68.
Yao Zhenxian, Zhang Dapeng, Yao Miaosen. Bresler's mathematical model for determination distance between emitters by soil hydraulic parameter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 65 ~ 68. (in Chinese)
- 24 蒋树芳,万书勤,康跃虎. 滴灌不同土壤基质势对白菜产量与水分利用的影响[J]. 节水灌溉, 2009(10): 20 ~ 22.
Jiang Shufang, Wan Shuqin, Kang Yuehu. Effects of soil matric potential on Chinese cabbage yield and water use efficiency under drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2009(10): 20 ~ 22. (in Chinese)
- 25 张超,康跃虎,万书勤,等. 滴灌条件下土壤基质势对豇豆产量和灌溉水利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 30 ~ 33.
Zhang Chao, Kang Yuehu, Wang Shuqin, et al. Effects of soil matric potential on cowpea yield and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 30 ~ 33. (in Chinese)
- 26 万书勤,康跃虎,刘士平. 滴灌条件下土壤基质势与打顶措施对番茄生长和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 1 ~ 4.
Wang Shuqin, Kang Yuehu, Liu Shiping. Effects of soil matric potential and topping on tomato growth and water use efficiency under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 1 ~ 4. (in Chinese)

- Agro-Environment & Development,2010(5):57~60. (in Chinese)
- 32 Kuchenrich R D, Martin W J, Smith D G, et al. Design and operation of an aerated windrow composting facility [J]. Journal of the Water Pollution Control Federation, 1985, 57(3): 213~219.
- 33 Steininger K W, Voraberger H. Exploiting the medium term biomass energy potentials in Austria [J]. Environmental and Resource Economics, 2003, 24 (4): 359~377.
- 34 Cook J, Beyea J. Bioenergy in the United States: progress and possibilities [J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 18(6): 441~455.
- 35 Aarts H F M, Habekotte B, van Keulen H. Nitrogen (N) management in the 'De Marke' dairy farming system [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 56(3): 231~240.
- 36 罗立娜,李文哲,徐名汉,等. 预处理方式对水稻秸秆厌氧发酵产气特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 152~156.
- Luo Lina, Li Wenzhe, Xu Minghan, et al. Effect of pretreatment methods on anaerobic fermentation characteristics from rice straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 152~156. (in Chinese)
- 37 Sheldrick William, Syers J K, Lingard John. Contribution of livestock excreta to nutrient balances [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 119~131.
- 38 国家环境保护总局. 畜禽养殖污染防治管理办法 [Z]. 国家环境保护总局令 9 号, 2001.
- 39 黄鸿翔,李书田,李向林,等. 我国有机肥的现状与发展前景分析 [J]. 土壤肥料, 2006 (1): 3~8.
- Huang Hongxiang, Li Shutian, Li Xianglin, et al. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China [J]. Soils and Fertilizers, 2006 (1): 3~8. (in Chinese)
- 40 张方方,吴亚琪. 浙江省农村废弃物现状调查及资源化利用 [J]. 现代农业科学, 2009, 16(4): 160~161.
- Zhang Fangfang, Wu Yaqi. Status quo investigation and recycling utilization of rural residues in Zhejiang province [J]. Modern Agricultural Sciences, 2009, 16(4): 160~161. (in Chinese)
- 41 严立冬. 农业废弃物的资源化利用 [J]. 环境与开发, 1998, 13(2): 21~23.
- Yan Lidong. Talk about the recyclical use of agricultural refuse [J]. Environment and Exploitation, 1998, 13(2): 21~23. (in Chinese)
- 42 景全荣,黄希国,吴丽丽,等. 连续干式厌氧发酵中试系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 186~189.
- Jing Quanrong, Huang Xiguo, Wu Lili, et al. Design and experiment of dry anaerobic digestion pilot plant for biogas producing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 186~189. (in Chinese)
- 43 杨帆,李荣,崔勇,等. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议 [J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 77~81.
- Yang Fan, Li Rong, Cui Yong, et al. Utilization and develop strategy of organic fertilizer resources in China [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 77~81. (in Chinese)
- 44 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169~173.
- Sun Yongming, Li Guoxue, Zhang Fudao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 169~173. (in Chinese)
- 45 夏吉庆,马添翼,毕经毅,等. 牛粪厌氧发酵污泥回流试验 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 105~109.
- Xia Jiqing, Ma Tianyi, Bi Jingyi, et al. Sludge recycle trial of cattle manure anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 105~109. (in Chinese)
- 46 王亮,刘克锋,孙向阳,等. 牛粪好氧发酵规模化生产参数优化 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 115~121.
- Wang Liang, Liu Kefeng, Sun Xiangyang, et al. Parameter optimization for large-scale production of cattle manure aerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 115~121. (in Chinese)

(上接第 118 页)

- 27 蒋树芳,万书勤,康跃虎,等. 华北地区滴灌控制基质势对生菜产量和水分利用的影响 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 72~76.
- Jiang Shufang, Wang Shuqin, Kang Yuehu, et al. Effects of soil potential on lettuce growth and water use efficiency under drip irrigation in semi-humid regions of north China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(6): 72~76. (in Chinese)
- 28 Theodore W Sammis. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops [J]. Agronomy Journal, 1980, 72(5): 701~704.
- 29 贾俊姝,康跃虎,万书勤,等. 不同土壤基质势对滴灌枸杞生长的影响研究 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 81~84.
- Jia Junshu, Kang Yuehu, Wang Shuqin, et al. Effect of soil matric potential on *Lycium barbarum* L. growth under drip-irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 81~84. (in Chinese)
- 30 Rivière L M, Caron J. Research on substrates: state of the art and need for the coming 10 years [J]. Acta Horticultural, 2001, 548: 29~42.
- 31 范严伟. 膜孔灌溉入渗特性的数值模拟研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Fan Yanwei. Study on numerical simulation of interference infiltration characteristic in film hole irrigation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)