

几种常用绿地改良材料对土壤水分特征的影响^①

伍海兵¹, 方海兰^{1*}, 李爱平²

(1 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 分析了几种常用绿地土壤改良材料及其不同配比对土壤水分特征曲线和水分常数的影响, 结果表明: 利用 RETC 软件对各配比土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程的参数拟合效果较好, R^2 均大于 0.99; 随着砂粒含量的增加, 土壤田间持水量降低, 土壤中水分有效性比例增加, 但砂粒粒径对土壤水分常数影响不显著; 绿化植物废弃物能提高土壤田间持水量和有效水含量, 降低土壤凋萎含水量; 绿化植物废弃物还能提高有效水占田间持水量的比例, 以 20% 绿化植物废弃物的用量为最大, 为 49.59%; 聚丙烯酰胺(PAM)虽然能提高土壤田间持水量, 但阻碍土壤水分的释放, 降低土壤水分的有效性; 脱硫酸石膏可以增加土壤田间持水量和水分的有效性。综合而言, 以 70% 土、10% 砂、20% 绿化植物废弃物和 0.5 kg/m³ 脱硫酸石膏的配比相对最佳。

关键词: RETC; 水分特征曲线; 水分常数; 土壤改良材料

中图分类号: S158.2; S151.9

土壤水分是影响植物生长的重要因素之一, 植物利用土壤水分主要受土壤水吸力、土壤储水、有效水以及植物根系吸水能力等因素影响^[1]。而土壤水分特征曲线是研究土壤基质势(水吸力)与含水量的关系曲线, 直接反映土壤储水能力和土壤水分的有效性, 是研究土壤持水和抗旱能力最重要的指标之一^[2]。研究土壤水分特征曲线, 对分析土壤水分蓄存、保持、运动、供应及土壤水分与作物吸水之间的状况都有重要意义^[3]。关于土壤水分特征曲线研究报道基本侧重于农林地^[4-7], 对城市绿地土壤研究鲜有报道, 而且也仅是对水分特征曲线模型和参数的适用性研究^[8-9], 缺少对绿地土壤不同物质组分的水分特征研究。我国城市绿地养护普遍耗水严重, 其中土壤持水性差、有效水含量低是主要限制因子^[10-11]。大量研究证实利用改良材料能改善绿地土壤的持水性能, 如顾兵等^[12]、伍海兵等^[13]利用绿化植物废弃物增加土壤的保水能力; 闫功双等^[14]利用 PAM(聚丙烯酰胺)有助于减少地面径流和深层渗漏提高砂土对水分的存储, 并增加土壤水分的有效性; 李卓等^[15]利用砂粒增加土壤大孔隙含量, 增加土壤水分下渗能力, 降低地表径流, 提高土壤对雨水的存储能力, 但土壤的持水能力随着砂粒的增加而降低。已有研究主要侧重单

一改良材料对土壤水分特征的研究, 实际上, 绿地土壤往往是几种改良材料混合使用的人为合成土壤, 其水分特性至今也未见报道。随着“海绵”城市建设在国内兴起, 城市绿地土壤作用不仅仅是提供植物生长所需要的营养和水分, 对城市雨水蓄积和排放的功能也引起大家关注^[16]。为此, 本研究选用绿地常用的土壤改良材料并进行不同配比混合模拟人工合成的绿地土壤, 研究其土壤水分特征, 以期为我国城市绿地建设和养护过程中的土壤水分管理和“海绵”城市的建设提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验土样制备

试验土壤经风干、研磨, 过 2 mm 筛。用不同直径的不锈钢筛将砂粒分成 3 组: 粗砂(0.5 ~ 1 mm)、中砂(0.25 ~ 0.5 mm)、细砂(<0.25 mm); 绿化植物废弃物主要为行道上树木修剪的枝条和树叶, 经粉碎机粉碎成 1 ~ 3 mm 粒径后堆肥 6 个月, 各项指标显示已经腐熟。将 3 组不同粒径砂粒分别按体积含量为 10%、20%、40%、60% 与原土混合; 绿化植物废弃物按 10%、20%、40% 与原土混合, 各配比见表 1。为了进一步分析不同改良材料混合配比对土壤水分

基金项目: 上海辰山植物园专项项目(G102402)和上海市科委项目(14DZ0503200)资助。

* 通讯作者(fhl_1969@126.com)

作者简介: 伍海兵(1986—), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 工程师, 主要从事城市土壤物理性质的研究。E-mail: wuhaibing22@163.com

表 1 不同砂粒、绿化植物废弃物配比土壤
Table 1 Soils under different ratios of sand and greenery-waste

材料		处理(体积比)					
粗砂	90% 土 + 10% 粗砂	80% 土 + 20% 粗砂	60% 土 + 40% 粗砂	40% 土 + 60% 粗砂	80% 土 + 20% 中砂	60% 土 + 40% 中砂	40% 土 + 60% 中砂
中砂	90% 土 + 10% 中砂	80% 土 + 20% 中砂	60% 土 + 40% 中砂	40% 土 + 60% 中砂	90% 土 + 10% 细砂	80% 土 + 20% 细砂	60% 土 + 40% 细砂
细砂	90% 土 + 10% 细砂	80% 土 + 20% 细砂	60% 土 + 40% 细砂	40% 土 + 60% 细砂	90% 土 + 10% 绿废	80% 土 + 20% 绿废	60% 土 + 40% 绿废
绿废	90% 土 + 10% 绿废	80% 土 + 20% 绿废	60% 土 + 40% 绿废	-			

注：绿废表示绿化植物废弃物，下同。

表 2 不同改良配比土壤
Table 2 Soils under of different modified ratios

处理	材料(体积比)
CK(对照组)	100% 土(原土)
A	70% 土 + 10% 砂 + 20% 绿废
B	60% 土 + 20% 砂 + 20% 绿废
C	50% 土 + 20% 砂 + 30% 绿废
D	70% 土 + 10% 砂 + 20% 绿废 + 0.5 kg/m ³ 脱硫石膏
E	70% 土 + 10% 砂 + 20% 绿废 + 2 g/m ² 聚丙烯酰胺
F	70% 土 + 10% 砂 + 20% 绿废 + 0.5 kg/m ³ 脱硫石膏 + 2 g/m ² 聚丙烯酰胺
G	80% 土 + 20% 绿废 + 0.5 kg/m ³ 脱硫石膏 + 2 g/m ² 聚丙烯酰胺

特征的影响，各改良配比土壤见表 2，其中 PAM 在其他改良材料混合完全后均匀撒在配比土壤表面。

1.2 分析测定方法

土壤水分特征曲线采用日本 KOKUSAN 公司生产的 H-1400pF 高速离心机进行试验，将饱和后的土样于不同转速下(1 000、2 000、3000、5 000、7 000、9 000、11 000、13 000 r/min)离心 60 min 后，使水分达到平衡后测定不同吸力下土壤体积含水量，每组重复 3 次。利用美国盐改中心开发的 RETC 软件^[17]对 van Genuchten 方程^[18]： $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \cdot h)^n]^m$ 进行拟合，其中 θ 是土壤体积含水量(cm^3/cm^3)； θ_s 是土壤饱和含水量(cm^3/cm^3)； θ_r 是土壤滞留含水量(cm^3/cm^3)； h 是压力水头(cm)， m 、 n 、 α 为参数， $m =$

$1 - 1/n$ 。

数据整理和分析采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件。

2 结果与讨论

2.1 不同配比土壤水分特征曲线

2.1.1 砂粒粒径和含量对土壤水分特征曲线的影响 不同粒径砂粒配比的土壤水分特征曲线如图 1 所示，各配比土壤均随着土壤吸力的增加，土壤含水量逐渐降低，在低吸力下(2×10^3 cm)土壤含水量变化较大，高吸力下(12×10^3 cm)趋于平缓，这主要是由于土壤所能保持或释放出来的水量取决于较粗孔隙分布，施加较小压力，大孔隙中的水即被排出^[19]；随着吸力的增加，土壤颗粒的吸附能力及土壤比表面的影响作用增强，保持在小孔隙中的水分缓慢释出^[20-21]。各配比土壤水分特征曲线均位于对照组曲线的左下方，且随着砂粒含量的增加，水分曲线逐渐下移，表明相同吸力下，土壤含水量随砂粒的增加而降低。这主要是由于土壤中砂粒含量的增多，大孔隙逐渐取代了小孔隙，使得土壤中的毛管孔隙度降低，比表面积越小，吸附能力也越弱，所以在整个吸力段，土壤水分含量随着砂粒含量的增加而下降，持水性能逐渐减弱。而相同吸力下，砂粒粒径对土壤含水量影响不明显，这与周蓓蓓等^[22]研究碎石粒径对土壤水分影响显著不一致，这可能是由于本试验选用的砂粒粒径差别较小有关。

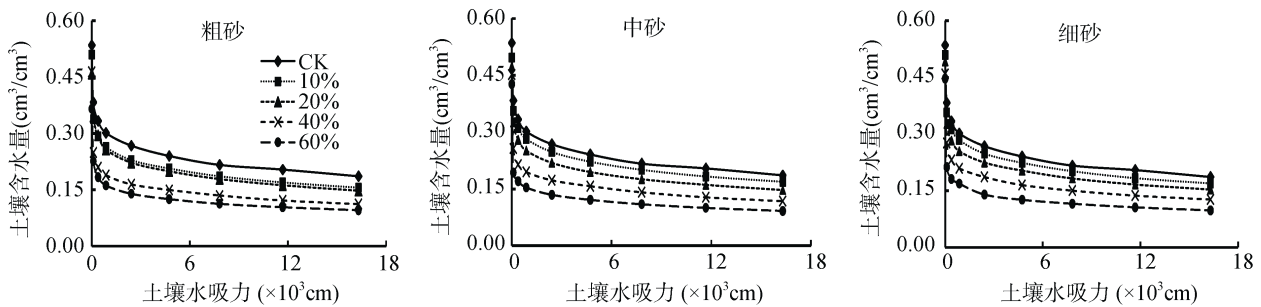


图 1 不同砂粒配比土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curves under different sand ratios

利用 RETC 软件对 van Genuchten 方程的参数进行拟合,拟合参数如表 3 所示。参数 α 一般认为是进气吸力的倒数,即水分特征曲线接近饱和时拐点的吸力值的倒数,一般进气吸力越小, α 值越大,土壤的持水性能越差,排水越容易^[23]。各处理土壤随着砂

粒含量增加, α 呈增大趋势,说明土壤持水能力随砂粒含量增多而减弱,排水越来越容易。而砂粒粒径对 α 影响不是很明显。 θ_s 的模拟值与实测值接近相等,且各处理决定系数 R^2 均大于 0.99,拟合效果较好,这与邓超等^[24]研究农田土水动力参数的结果一致。

表 3 不同砂粒配比土壤 van Genuchten 方程模拟参数
Table 3 Simulation parameters of van Genuchten of soils equation under different sand ratios

不同配比土壤		$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$		α	n	R^2
		实测值	模拟值			
CK		0.535	0.534	0.093	1.136	0.994
粗砂	10%	0.510	0.510	0.143	1.143	0.995
	20%	0.459	0.458	0.045	1.161	0.996
	40%	0.464	0.464	0.658	1.145	0.998
	60%	0.365	0.365	0.183	1.162	0.999
中砂	10%	0.496	0.496	0.083	1.139	0.993
	20%	0.473	0.473	0.103	1.147	0.995
	40%	0.452	0.451	0.521	1.141	0.997
细砂	60%	0.427	0.426	2.772	1.136	0.998
	10%	0.509	0.509	0.099	1.139	0.993
	20%	0.491	0.491	0.156	1.139	0.995
	40%	0.458	0.458	0.315	1.143	0.997
	60%	0.447	0.446	1.454	1.145	0.998

注： θ_s 为土壤饱和含水量； θ_r 为土壤滞留含水量， θ_r 近似为 0，故未列出； α 为进气吸力的倒数； n 为形状系数； R^2 为决定系数。

2.1.2 绿化植物废弃物对水分特征曲线的影响 不同绿化植物废弃物含量对土壤水分特征曲线有一定的影响(图 2),各配比土壤水分特征曲线与对照组土壤水分特征曲线发生交叉,曲线位于对照组曲线的右下方。在低吸力段,各配比土壤含水量大小关系为 40%>20%>10%>原土,说明绿化植物废弃物能够增加孔隙度尤其是非毛管孔隙度^[25],土壤所能吸持的水分增多,持水能力随着废弃物含量增加而增强。但随着吸力的增加,绿化植物废弃物对水分的持留能力越来越弱,故其含水量逐渐降低。

绿化植物废弃物可有效提高土壤的持水能力,但随着含量的增加,其持水能力逐渐减弱。这与董阳等^[26]利用绿化植物废弃物改良盐碱土的效果一致,即以 30% 绿化植物废弃物添加量对土壤的改良效果最好。

各处理土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程的参数拟合如表 4 所示,各配比土壤 θ_s 模拟值均接近实测值,拟合效果较好, R^2 均高于 0.99。各处理土壤参数 α 值均小于对照组,且随着绿化植物废弃物的增加, α 呈先增大后减小的趋势,说明在一定吸力下,

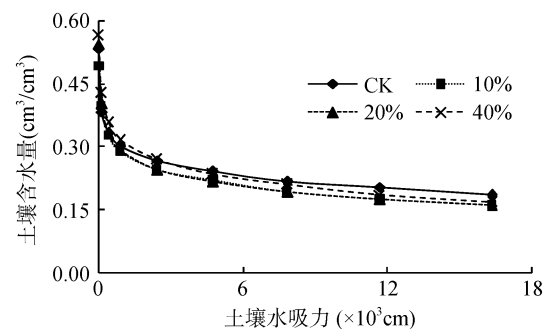


图 2 不同绿化植物废弃物配比土壤水分特征曲线
Fig. 2 Soil water characteristic curves under different greenery waste ratios

表 4 不同绿化植物废弃物配比土壤 van Genuchten 方程模拟参数
Table 4 Simulation parameters of van Genuchten equation of soils under different greenery waste ratios

不同配比土壤	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$		α	n	R^2
	实测值	模拟值			
绿废 10%	0.492	0.491	0.025	1.177	0.997
绿废 20%	0.545	0.544	0.045	1.177	0.998
绿废 40%	0.564	0.563	0.035	1.176	0.995

2.1.3 改良材料不同对比对土壤水分特征曲线的影响 改良材料不同对比土壤水分特征曲线如图 3 所示,在低吸力段各对比土壤含水量大小关系为 G>D>F>E>A>原土>B>C,说明砂粒降低了土壤持水能力,而绿化植物废弃物、脱硫石膏和 PAM 可有效增加土壤持水能力。随着土壤吸力的增加,土壤中的水分不断被释放出来,在中高吸力段各对比土壤含水量大小关系为 G>原土>E>F>D>A>B>C 除了对比 G,其他各对比均低于对照组,说明在中高吸力下,砂粒含量降低土壤持水能力的作用越来越明显。在整个吸力段,对比土壤 D、E、F 的含水量均高于对比土壤 A、B、C,进一步说明绿化植物废弃物、脱硫石膏、PAM 可有效增加土壤的持水能力,这与伍海兵等^[13]利用绿化植物废弃物、脱硫石膏等材料改良土壤持水能力的研究结果一致。

各处理土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程的参数拟合如表 5 所示,拟合效果较好, R² 均高于 0.99。

表 5 不同改良材料对比土壤 van Genuchten 方程模拟参数
Table 5 Simulation parameters of van Genuchten equation of soils under different modified material ratios

不同对比土壤	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$		α	n	R^2
	实测值	模拟值			
A	0.441	0.437	0.009	1.198	0.997
B	0.421	0.419	0.017	1.185	0.997
C	0.509	0.509	0.128	1.167	0.997
D	0.497	0.492	0.014	1.176	0.995
E	0.503	0.501	0.022	1.160	0.993
F	0.505	0.502	0.019	1.167	0.995
G	0.530	0.527	0.019	1.154	0.994

2.2 不同对比土壤水分特征常数

土壤水分状况是影响植物体内水分的重要因素,土壤养分通过它进行输送转移,对植物的生长有重要意义^[27]。田间持水量和凋萎含水量是评价土壤水分有效性的主要水分常数,土壤有效水的范围在“田间持水量”与“凋萎含水量”之间,一般将土壤吸力为 0.1×10^5 Pa 时对应的含水量作为有效水上限(即田间持水量),土壤吸力为 15×10^5 Pa 时对应的含水量作为有效水下限(即凋萎含水量)^[28]。

2.2.1 砂粒粒径和含量对土壤水分特征常数的影响 根据土壤水分特征曲线计算各对比土壤水分特征参数如表 6 所示,各对比土壤田间持水量、凋萎含水量以及有效水含量较对照组均有所下降,且随着砂粒含量的增加,各水分常数降低的幅度越大。但各处理土壤的有效水占田间持水量的比例均高于对照组,土壤中

参数 α 值除了对比 C 大于对照组,其他各对比土壤均小于对照组,说明砂粒含量和绿化植物废弃物含量过高均不利于土壤对水分的持留。对比 A 的 α 值小于对比 B、对比 G 的 α 值小于对比 F,进一步说明砂粒能够降低土壤的持水能力。比较对比 D、E、F 可知,说明脱硫石膏、PAM 均能增强土壤持水能力。

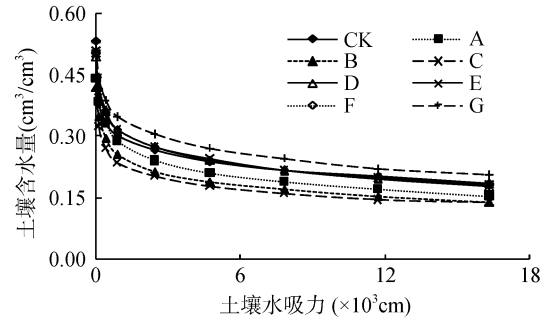


图 3 不同改良材料对比土壤水分特征曲线
Fig. 3 Soils water characteristic curves under different modified material ratios

水分的有效性要高于对照组土壤,说明砂粒可以提高土壤中水分的有效性。而相同比例的砂,其粒径大小对水分常数影响不明显。通过各对比土壤差异性分析可以得出:砂粒含量为 10% 的土壤田间持水量和凋萎含水量与砂粒含量为 20% 差异不显著($P>0.05$),而砂粒含量为 20% 土壤田间持水量和凋萎含水量与砂粒为 40%、60% 的土壤差异显著或极显著,由此可见,当砂粒含量高于 20% 时,其对土壤水分常数影响显著。

2.2.2 绿化植物废弃物对水分常数的影响 不同绿化植物废弃物含量土壤水分特征常数如表 7 所示,各对比土壤田间持水量较对照组均有所增加,凋萎含水量均显著降低,有效水含量均显著增加。随着绿化植物废弃物含量的增加,田间持水量逐渐增加,凋萎含水量变化规律不明显,有效水含量逐渐增加,各配

表 6 不同砂粒配比土壤水分常数
Table 6 Soil water constants under different sand ratios

不同配比土壤	田间持水量(cm^3/cm^3)	凋萎含水量(cm^3/cm^3)	有效水含量(cm^3/cm^3)	有效水占田间持水量比例(%)	
CK	0.338 aA	0.199 aA	0.139 aA	41.05	
粗砂	10%	0.296 bAB	0.169 bABC	0.126 abAB	42.76
	20%	0.298 abAB	0.160 bcBCD	0.138 adAC	46.38
	40%	0.214 cdD	0.122 dE	0.093 bcdeAD	43.30
	60%	0.190 dD	0.101 dEF	0.089 efCD	46.89
中砂	10%	0.314 abAB	0.183 abAB	0.132 abAB	41.84
	20%	0.283 bBC	0.160 bcBCD	0.124 acAC	43.68
	40%	0.221 cdD	0.127 dDE	0.093 abAB	42.32
	60%	0.170 eE	0.100 eF	0.070 fD	41.20
细砂	10%	0.316 abAB	0.184 abAB	0.132 abAB	41.71
	20%	0.286 bAC	0.166 bABC	0.120 aA	41.89
	40%	0.238 cCD	0.136 cCDE	0.102 cdFBCD	42.83
	60%	0.184 dD	0.105 dE	0.080 dfBCD	43.22

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。下同。

表 7 不同绿化植物废弃物配比土壤水分常数
Table 7 Soil water constants under different greenery waste ratios

不同配比土壤	田间持水量(cm^3/cm^3)	凋萎含水量(cm^3/cm^3)	有效水含量(cm^3/cm^3)	有效水占田间持水量比例(%)
CK	0.338 bA	0.199 aA	0.139 cB	41.05
绿废 10%	0.338 bA	0.172 bcB	0.167 bA	49.32
绿废 20%	0.340 abA	0.171 cB	0.168 abA	49.59
绿废 40%	0.366 aA	0.185 bAB	0.181 aA	49.36

比土壤有效水含量较对照组分别提高了 20.33%、21.43% 和 30.14%。通过差异性分析得出：40% 的绿化植物废弃物土壤田间持水量与对照组差异显著($P<0.05$)，10% 和 20% 绿化植物废弃物与对照组差异不明显($P>0.05$)；10% 和 20% 绿化植物废弃物土壤凋萎含水量与对照组差异极显著($P<0.01$)，但 40% 绿化植物废弃物与对照组差异不明显($P>0.05$)；10%、20% 和 40% 绿化植物废弃物土壤有效水含量与对照组均差异极显著($P<0.01$)。绿化植物废弃物不仅提高了土壤田间持水量和有效水含量，降低了土壤凋萎含水量，同时增加了土壤有效水占田间持水量的比例，提高了土壤中水分的有效性，其中绿化植物废弃物含量为 20% 时，其有效水占田间持水量的比例最高，为 49.59%，较对照组提高了 20.80%。

2.2.3 改良材料不同配比对土壤水分特征常数的影响 各配比土壤水分特征常数如表 8 所示，各配比土壤田间持水量大小关系为 $G>D>F>E>A>CK>B>C$ ，配比 A 显著高于配比 B($P<0.05$)，说明砂粒含量高显著降低了土壤的田间持水能力；配比 D 显著高于配比 A($P<0.05$)，说明脱硫石膏可有效提高土壤田间持水量。各配比土壤凋萎含水量大小关系为

$G>CK>E>F>D>A>B>C$ ，除了配比 G 提高了土壤凋萎含水量，其他各配比土壤均降低了土壤凋萎含水量，配比 E 显著高于配比 A，说明 PAM 显著提高土壤凋萎含水量。各配比土壤有效水含量大小关系为 $D>A>G>F>E>B>CK>C$ ，各配比土壤有效水含量除了配比 C 低于对照组，其他各配比土壤均高于对照组，且配比 D、E、F、G 土壤有效水含量极显著高于对照组($P<0.01$)，以 70% 原土、20% 绿化植物废弃物、10% 砂粒、0.5 kg/m^3 脱硫石膏配比的土壤有效水含量最高。各配比土壤有效水占田间持水量的比例较对照组均有所增加，说明各改良材料共同作用均提高了土壤中水分的有效性。但值得注意的是配比 E，就 PAM 而言虽然提高了土壤田间持水量，但同时也显著增加了土壤凋萎含水量，且增加的幅度高于田间持水量，故其有效水相较配比 A 反而降低了，且降低了土壤中有效水占田间持水量的比例，这可能是由于 PAM 是一种线性水溶性高分子聚合物，本身具有的强大吸水能力，与绿化植物废弃物混合后会吸持更多水分，对水分子有强大的束缚作用，不能更好地释放土壤水分以被植物吸收利用。另外，我国已有研究报道均证实城市绿地由于压实严重而导致土壤有效水

表 8 不同改良配比水分常数
Table 8 Water constants under different modified ratios

不同配比土壤	田间持水量(cm^3/cm^3)	凋萎含水量(cm^3/cm^3)	有效水(cm^3/cm^3)	有效水占田间持水量比例(%)
CK	0.338 dB	0.199 bB	0.139 bdB	41.05
A	0.343 cdB	0.165 cC	0.178 aA	51.96
B	0.303 eC	0.150 dD	0.153 cdBC	50.53
C	0.275 fC	0.144 dD	0.131 bB	47.76
D	0.371 bAB	0.191 bB	0.180 aA	48.47
E	0.363 bcB	0.197 bB	0.166 acAC	45.82
F	0.367 bAB	0.194 bB	0.173 aAC	47.15
G	0.396 aA	0.220 aA	0.176 aA	44.43

含量降低、萎蔫含水量增加^[11,29-30]；而本实验不同配比改良材料的水分特征也表明，在中高吸力下，砂粒对降低土壤的持水能力作用越来越明显，这也说明在高压下，以砂粒对土壤排水作用影响最大。因此，针对我国普遍存在的绿地土壤压实严重现象，砂粒是一种优先选择的土壤水分改良材料。

3 结论

利用 RETC 软件对各配比土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程的参数拟合效果较好，与实测值误差较小， R^2 均大于 0.99，表明 RETC 软件进行土壤水分特征曲线 van Genuchten 方程的参数求解是可行的。

砂粒能够减弱土壤的持水性能，降低土壤田间持水量和有效水含量，并随着砂粒含量的增加而下降，同时也降低了土壤凋萎含水量，但砂粒可增加土壤有效水占田间持水量的比例，提高土壤中水分的有效性，这主要是由于砂粒降低凋萎含水量的幅度明显高于田间持水量，所以间接提高了土壤中水分的有效性，在土壤改良中可适当添加一定量的砂粒来提高土壤中水分的有效性。本研究中砂粒粒径对土壤各水分特征常数影响不明显，这可能是由于所选砂粒粒径相差不大有关。

绿化植物废弃物不仅能显著提高土壤田间持水量和有效水含量，降低土壤凋萎含水量，而且能显著提高有效水占田间持水量的比例，其中田间持水量和有效水含量随着绿化植物废弃物的增加而增加，但凋萎含水量先降低后增加，故绿化植物废弃物过高反而会降低土壤中水分的有效性，其中绿化植物废弃物含量为 20% 时，其土壤有效水占田间持水量比例最大，为 49.59%，土壤中水分有效性最佳。

本研究进一步验证了脱硫石膏和 PAM 能有效提高土壤田间持水量，但由于 PAM 本身具有强吸水能力，其吸持的水分得不到有效释放，属于无效水分，它显著提高了土壤凋萎含水量，故其反而降低了土壤中有效水的含量，在土壤需要保水的情况下可以适当应用，但在土壤有效水含量低的情况下应慎用；而脱硫石膏不仅能提高土壤的总体持水能力，而且还能显著提高土壤有效水含量，是很好的土壤水分改良材料。

本研究涉及的几种常用的土壤水分改良材料中，其土壤水分特征各不相同，单独作为土壤改良材料时存在一定的缺陷，如土壤持水能力提高了，其释水能力降低了，降低了土壤中水分的有效性；或者土壤中有效水含量增加了，但土壤总的持水能力下降了，不利于土壤对水分的存储。为此，将几种改良材料混合使用可以发挥各改良材料的优点，不仅可以提高土壤的持水能力，还可以增加土壤中有效水含量，提高植物利用水分的有效性。

对比各改良配比土壤，以 70% 土、10% 砂、20% 绿化植物废弃物和 0.5 kg/m^3 脱硫石膏的配比 D 土壤田间持水量和有效水最大，且有效水占田间持水量的比例相对较大，虽然配比 A 和配比 B 土壤有效水占田间持水量的比例高于配比 D，但配比 A 和配比 B 土壤田间持水量和有效水较低，故综合而言，配比 D 土壤的持水和释水能力达到相对较好的平衡，相对其他配比土壤为最佳改良配比土壤。

参考文献：

- [1] Meinzer F C, Andrade J L, Goldstein G, et al. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest[J]. *Oecologia*, 1999, 121(3): 293-301
- [2] 聂立水, 李吉跃, 戴伟. 北京西山油松栓皮栎混交林的土壤水分特征[J]. *林业科学*, 2007, 43(z1): 43-47

- [3] 王孟本, 柴宝峰, 李洪建, 等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J]. 林业科学, 1999, 35(2): 7-14
- [4] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 355-364
- [5] 吴文强, 李吉跃, 张志明, 等. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 51-55
- [6] 孙迪, 夏静芳, 关德新, 等. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1405-1409
- [7] 张自军, 冯绍元, 唐泽军, 等. 北京顺义地区典型农田土壤水分特征曲线测定与分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 1-4, 26
- [8] 杨栩, 尤学一, 季民. 天津城市绿地土壤水分特征曲线模型及参数确定[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 115-119
- [9] 蔡飞, 邵孝侯, 王振宇, 等. 天津滨海绿地土壤水分特征曲线的拟合与比较分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 336-341
- [10] 陈立新. 城市土壤质量演变与有机改土培肥作用研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 36-39
- [11] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 等. 典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 85-90
- [12] 顾兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果[J]. 土壤, 2009, 41(6): 940-946
- [13] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 等. 不同配比改良材料对典型城市绿地土壤物理性质的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 703-709
- [14] 闫功双, 夏海江, 杜尧东, 等. 聚丙烯酰胺对砂土保水性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 47-49
- [15] 李卓, 冯浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 204-208
- [16] 伍海兵, 方海兰. 绿地土壤入渗及其对城市生态安全的重要性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 894-900
- [17] van Genuchten M T, Leij F J, Yates S R, et al. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils[M]. California: US Salinity Laboratory, 1991: 4-41
- [18] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898
- [19] 李成有. 不同耕作措施下土壤持水性能及其影响因素[D]. 甘肃: 甘肃农业大学, 2009
- [20] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质[J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 277-281
- [21] 柳云龙, 吕军, 王人潮. 低丘红壤作物易旱与土壤持水供水特性的关系[J]. 浙江大学学报(农业与科学版), 2002, 28(1): 42-46
- [22] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801-807
- [23] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂影响下的土壤水分有效性研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 63-67
- [24] 邓超, 毕利东, 秦江涛, 等. 长期施肥下土壤性质变化及其对微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5): 888-893
- [25] 顾兵, 吕子文, 梁晶, 等. 绿化植物废弃物覆盖对上海城市林地土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 9-15
- [26] 董阳, 方海兰, 郝瑞军, 等. 矿化垃圾和绿化植物废弃物在盐碱土上利用的效果[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 67-73
- [27] 高志红, 张万里, 张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(6): 79-80, 83
- [28] 宋桂龙, 韩烈保, 李德颖. 不同沙土配比根系层土壤的持水特性研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 233-237
- [29] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 33-38
- [30] 杨金玲, 汪景宽, 张甘霖. 城市土壤的压实退化及其环境效应[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 688-694

Effects of Modified Materials Commonly Used on Green Belt on Soil Water Characteristic

WU Haibing¹, FANG Hailan^{1*}, LI Aiping²

(1 *Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China;*

2 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: The analyses on water characteristic curves and water constants of soils made from several common modified materials with different ratios showed that RETC software well simulated the parameters of van Genuchten equation for water characteristic curves (all $R^2 > 0.99$). Soil field water capacity reduced but soil water availability increased with the increase of sand content. Sand grain size influenced soil moisture constant insignificantly. The greenery waste increased soil field water capacity and available water content, but decreased wilting water content. The greenery waste increased the proportion of available water in field water capacity, which reached to highest (49.59%) in soils with 20% proportion of greenery waste. Although PAM increased soil field water capacity, it inhibited the release of soil water, thus reduced the effectiveness of soil water. In addition, desulfurization gypsum increased soil field water capacity and soil water effectiveness. In general, the best soil was composed with 70% soil, 10% sand, 20% greenery waste and 0.5 kg/m³ desulfurization gypsum in volume.

Key words: RETC; Water characteristic curve; Water constant; Soil modified materials