

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.012

常用屋顶绿化基质材料的保水性能

张 华, 李 茂, 曹金露, 张 沅

(三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:研究在饱和状态、反复干湿循环和自然蒸发3种情况下常用屋顶绿化基质材料陶粒、草炭和保水剂的保水性能。通过抽真空饱和试验得到基质材料的蓄水性能, 试验发现基质材料混合后实测饱和含水量大于理论推算值, 分析了导致材料混合使得蓄水性能大幅提高的原因。采用反复干燥吸水试验证明陶粒和草炭具有良好的热稳定性, 而保水剂在较高温度烘干时主分子链易断裂, 反复吸水和烘干后其保水性能大幅降低。常温常压蒸发试验表明在含水量较高时, 三者蒸发速率与自由水面蒸发的相当, 随着含水量降低, 保水性能越差的基质材料蒸发速率降低越快, 合理添加保水剂能有效改善基质材料保水性能。

关键词:屋顶绿化; 基质材料; 保水剂; 保水性能

中图分类号: TU111.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)01-0067-06

Water retention capacity of typical roof greening matrices

Zhang Hua, Li Mao, Cao Jinlu, Zhang Feng

(Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: The water retention capacities of commonly used roof greening matrices, concluding ceramsite, peat and super absorbent polymer, under fully saturated, cyclic wetting-drying and natural evaporation conditions were studied. The saturated water retention capacity of matrices were obtained by vacuum saturated test. It showed that the fully measured saturated degree of saturation of mixed matrix was greater than that calculated by the combination of all components. The reason which increases the water contents to porous skeleton was analysed. In cyclic wetting-drying tests, the water retention capacities of ceramsite and peat were almost unchanged. However, due to the main molecular chain broken under drying in relatively high temperature, the water retention capacity decreased rapidly after several wetting-drying cycles. In natural evaporation tests, the evaporation rates of ceramsite, peat, super absorbent polymer and free water were almost identical in the condition of high water content. As the water content decreasing, the evaporation rate of the matrix which had lower water retention capacities decreases faster. The matrix with a reasonable proportion of super absorbent polymer can remarkably improved its water retention capacity.

Key words: roof greening; matrices; super absorbent polymer; water retention capacities

收稿日期: 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51178251)

作者简介: 张 华(1974-), 男, 副教授, 主要从事非饱和土渗流、屋顶绿化材料水分运移研究, (E-mail) cezhua@139.com。

Received: 2014-07-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51178251)

Author brief: Zhang Hua (1974-), PhD, associate professor, main research interests: unsaturated soil seepage and roof greening materials moisture migration, (E-mail) cezhua@139.com.

随着中国城市发展步伐加快,城市建筑面积和密度急剧增长,排水设施却相对不够完善,加上近年来极端天气频发,导致大城市内涝现象频频发生。针对城市内涝,城市建设过程必须对排水系统合理规划、加强管理^[1],同时对已有和在建建筑物的屋顶进行绿化不仅能存蓄雨水、降低径流总量和洪峰峰值,还能增加城市绿地面积、吸附固体颗粒、净化空气、改善环境^[2]。合理利用屋顶载荷,逐渐普及屋顶绿化,每增加一块绿地,将会在人与自然的天平上放置一块调平砝码。陶粒、草炭以及保水剂被广泛应用于不同行业,它们的基本性质学者们已有研究,例如祁景玉等^[3]采用 X 光(XRD)、电镜(SEM)、红外(IR)和差热(DTA)等探测手段对陶粒的微观结构进行了研究,秦玲等^[4]使用草炭对沙质土壤保水性能改良, Vldal-Beuadet 等^[5]、Mooney 等^[6]、Beheim^[7]研究了草炭的孔隙结构以及内部水分运移情况,张建刚^[8]、张运超等^[9]对多种保水剂保水性能进行了研究。但针对陶粒的保水性能以及陶粒、草炭、保水剂三者混合作为屋顶绿化基质材料的保水性能少人研究,笔者以上述 3 种常用屋顶绿化基质材料为主要研究对象,对三者以及三者的混合物的保水性能进行试验研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取常用的屋顶绿化基质材料:陶粒、草炭和保水剂。陶粒过筛选取粒径 5~8 mm 掺煤渣烧制的陶粒,颗粒均匀饱满;草炭为将东北草炭土捣碎过 100 目筛留存;保水剂由东莞市安信保水有限公司生产,成分为聚丙烯酸盐的具有三维网状结构的有机高分子聚合物。

1.2 试验方法

为了研究屋顶绿化基质材料的保水性能,试验从饱和含水率、可重复利用次数以及蒸发速率等 3 个方面进行研究,设计了 3 项试验:抽真空饱和试验、反复干燥吸水试验和室内常温常压蒸发试验。试验将基质材料单独或按一定配比混合共 5 个样本进行试验。5 个样本分别为:陶粒、草炭、保水剂、陶粒与草炭混合、陶粒草炭保水剂混合,样本配比如表 1 所示。

1.2.1 抽真空饱和试验 陶粒和草炭在常温常压下进行浸泡往往需要数天才能完成吸水过程,而且最终也不能达到饱和。因此,使用真空饱和的方法加速这一过程,同时也使基质材料达到饱和状态。试验设备为真空饱和缸和真空泵,试验方法:使用精

度为 0.01 g 的电子天平称取试样材料按比例制样,将试验材料用 200 目筛网布包裹(对含有保水剂的试样包裹时应留有足够空间待保水剂吸水膨胀),用橡皮筋封口捆扎后放入真空饱和缸内,真空缸和盖之间涂一薄层凡士林,盖紧。将真空缸与真空泵接通,启动真空泵,当真空压力表读数接近 -100 kPa,继续抽气 1 h。微开真空缸进水阀门使纯水徐徐注入真空缸,真空泵保持开启状态维持注水过程中饱和缸内的气压值。观测真空缸水位,待水淹没试样后停止注水和抽气,静置 24 h 使试样充分饱和后待开真空饱和缸取出试样。将包裹试样的筛网打开,展开静置待筛网下无滴水后称量试样饱和后质量^[10]。

表 1 试样饱和含水率
Table 1 The saturated water content of samples

试样编号	陶粒 含量/%	草炭 含量/%	保水剂 含量/%	饱和 含水率
1	100	0	0	1.644
2	0	100	0	4.282
3	0	0	100	219.85
4	57.83	42.17	0	2.805
5	56.97	41.54	1.48	6.267

1.2.2 反复干燥吸水试验 基质材料在实际使用中经受不断往复吸湿脱湿的过程,通过反复干燥吸水试验测定随着试验次数增加基质材料吸水能力变化情况。试验方法:使用精度为 0.01 g 的电子天平称取试样材料按比例制样,将试样平铺在直径 15 cm 的 200 目不锈钢筛子(称量并编号)内,筛子口用 200 目筛网包住并用橡皮筋捆扎。然后通过堆压透水石将筛子沉浸在清水中,4 h 后取出揭开筛网静置 10 min 并无水滴下,用干抹布擦净筛子周围的水后称取筛子重量。而后将筛子置烘箱内 90 °C 烘干,烘干后取出冷却再用筛网包裹捆扎后重复上述过程。如上述过程反复烘干 9 次,测量试样在反复吸水干燥的过程中吸水能力的变化。

1.2.3 室内蒸发试验 关闭门窗保持室内无风状态,影响水分蒸发的环境因素主要是温度与相对湿度。在试验样本蒸发试验的同时添加一组水的蒸发试验作为参照,所有试验样本均作两组平行进行。试验中使用开口 16 cm×13 cm 的塑料盒为蒸发器皿,以精度为 0.01 g 的电子天平和电子温湿度表为称量仪器,试验方法如下:称量试验材料按比例混合制样,采用抽真空饱和试验方法对试样进行饱和,将饱和后的试样均匀摊铺在蒸发器皿内,草炭与保水剂的厚度约为 8 mm,陶粒以及含陶粒混合试样以陶

粒粒径为摊铺厚度。记录此时时刻、温度和相对湿度以及试样和蒸发器皿的总质量。每 3 h 称量蒸发器皿质量、温度和相对湿度,直至蒸发过程结束。

2 试验结果与分析

2.1 抽真空饱和试验结果与分析

5 组试样经过 24 h 真空饱和后,试样饱和含水率如表 1 所示。饱和含水率 ω 计算方法为

$$\omega = \frac{m_0 - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: m_0 为试样饱和后的总质量; m_d 为试样饱和前的干质量。

由表 1 可知,基质材料的饱和含水率是保水剂 > 陶粒草炭保水剂三者混合 > 陶粒草炭混合 > 草炭 > 陶粒。试验结果表明保水剂有很强的吸水能力,在屋顶绿化基质材料配比中加少量保水剂就能大幅增加整体的蓄水性能。

根据陶粒、草炭和保水剂的饱和含水率推算余下混合试样的饱和含水率的理论值 ω^* 计算方法:

$$\omega^* = \omega_1 \times \theta_1 + \omega_2 \times \theta_2 \quad (2)$$

式中: ω_1 、 ω_2 分别为表 1 中陶粒与草炭即试样 1 与试样 2 的平均饱和含水率; θ_1 、 θ_2 分别为混合试样中陶粒与草炭的含量。

由式(2)算得试样 4 与试样 5 的饱和含水率的理论值分别为 2.756 和 5.977,均小于试验数值 2.805 和 6.267。

草炭是由未被彻底分解的植物残体、腐殖质以及一部分矿物质组成,由未分解的植物残体连接作用以及腐殖质的胶结作用而形成,具有蜂窝状结构、架空状结构和球状结构,内部含有大量孔隙^[11]。陶粒是在 1 100~1 200 °C 左右的高温烧结而成,并急速冷却至 700 °C 以下,其外壳包裹着一层严密的玻璃体,类似陶瓷的釉质,而内部疏松多孔呈蜂窝状^[3]。饱和的陶粒和草炭试样中水主要以毛细水的形式存储在内部孔隙中,而饱和的陶粒试样中陶粒颗粒之间存在大量间隙,则将陶粒与草炭混合使陶粒与陶粒之间间隙由草炭填补,整体毛细孔隙增多,使得混合试样的饱和含水率大于陶粒与草炭各自饱和含水率通过组合计算所得的值。又因为保水剂吸水会膨胀同时具有很强的胶黏性,易与草炭胶粘成团,增多毛细孔隙,使得混合试样的饱和含水率进一步增大。

将草炭与保水剂按不同比例混合,通过抽真空饱和后测量计算不同试样的饱和含水率以及有侧限纵向体积膨胀率。如表 2 所示,将草炭和保水剂按

不同比例混合,饱和后试样的体积都会膨胀,而且膨胀的比率随保水剂的含量增多而增大。由于体积膨胀,保水剂和草炭形成的团聚体有更大的孔隙率,毛管孔隙增多,使得实测的饱和含水率得值大于由草炭和保水剂各自饱和含水率推算得混合试样的饱和含水率的理论值。

表 2 不同配比试样饱和含水率与膨胀率
Table 2 The saturated water content and expansion rate in different ratio

编号	草炭含量/%	保水剂含量/%	膨胀率	饱和含水率	饱和含水率推算值
1	100.0	0.0	1.309	4.282	4.282
2	99.3	0.7	1.771	7.097	6.250
3	98.6	1.4	1.972	8.274	7.301
4	97.9	2.1	2.316	9.815	8.785

2.2 反复干燥吸水试验结果与分析

反复干燥吸水试验结果如图 1 所示:随着干燥次数的增多,陶粒的吸水性能基本不变;草炭以及陶粒与草炭的混合试样的吸水量逐次减少,第 9 次干燥后吸水量为分别为初次吸水量的 75% 和 76%;而保水剂以及陶粒草炭保水剂三者混合试样的吸水性能衰减迅速,保水剂会逐渐丧失吸水效力,保水剂第 1 次烘干后吸水量减少 28%,第 4 次烘干后保水剂的吸水能力丧失了 93%。

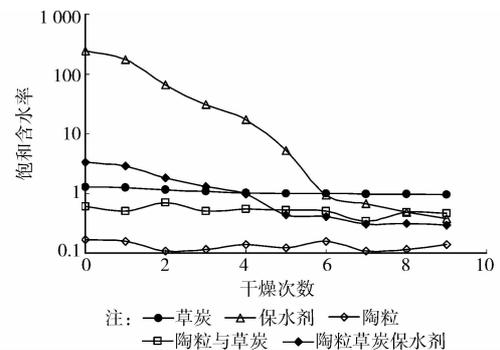


图 1 含水量与试样干燥次数的关系曲线
Fig. 1 The relationship between water content and times of drying

这是由于陶粒经高温烧制,其结构稳定,表层釉质外壳坚固,干湿循环对陶粒的结构不会造成破坏,使得陶粒具有良好的稳定性,经多次干燥其吸水能力基本不受影响。而在试验过程中发现,草炭经过浸泡内部的小颗粒会由筛孔流失,在容器底会形成肉眼可见的沉淀层。这是因为经过反复的吸水干燥,草炭内部有机物破碎,腐殖质的胶结作用减弱,导致草炭的内部结构破坏,形成细小的有机物颗粒,

同时有机物上胶结附着的土颗粒和矿物颗粒也会脱落,导致草炭内部毛细孔隙减少,吸水能力降低。

保水剂是不溶于水而能吸水膨胀的有机高分子聚合物,它的吸水方式既有化学吸附也有物理吸附。保水剂的化学结构中主链由 C—C 键构成,侧链上含有一 COONa、—COOH、—OH 等强亲水性基团,遇水时这些亲水基团会电离并与水分子发生亲合作用产生化学吸附。保水剂对水分子的物理吸附有少量是毛细管吸附,更多的是水分子吸附在分子网状结构内。保水剂是由高分子长链相互靠拢缠绕又彼此交联形成的网状结构,遇水时高分子链网扩张,而网内含有一定数量的亲水离子,网状结构内外产生渗透压,水分子向网状结构内部渗透^[12]。但当保水剂经反复吸水干燥特别是经高温烘烤,其分子链上的亲水基团会逐渐失去同时主链上的 C—C 键发生无规则断裂^[13]。随着干燥烘烤次数增多,保水剂分子链会失去更多亲水基团而且由于主链断裂再无法交联形成网状结构,化学吸附以及物理吸附的能力逐渐丧失,最终变成无吸水效力的晶体颗粒。值得注意的是,当保水剂含量过高时其吸水能力将超过根系的吸水能力,植物的生长与代谢将被抑制,因此在实际使用中保水剂比例应根据植物种类和基质类型适量调整^[14]。

2.3 室内蒸发试验结果与分析

试样水分蒸发是试样内部水分经过试样表面以水蒸气的状态扩散到大气过程。影响试样水分蒸发的因素有很多,但归纳起来可分为两类:内因和外因。内因是指与试样自身相关的各类化学物理性质因素,它主要影响水分在试样内运移特征。外因是指试样蒸发时的外部环境因素,它主要影响液态水汽化所需要的能量供应强度^[15]。笔者研究了不同试样组合的蒸发规律并分析试样组合和环境因素对试样蒸发的影响。

2.3.1 试样组合对水分蒸发的影响 不同试样组合水分日蒸发量如图 2 所示,试验开始时 5 组饱和和试样水分蒸发速率都接近于自由水面蒸发速率,随着试样含水率降低,试样蒸发速率随之降低,而整个蒸发过程蒸发速率呈现为陶粒<陶粒与草炭混合<草炭<陶粒草炭保水剂混合<保水剂<水(对照)。

陶粒、草炭、陶粒与草炭混合蒸发在第 17 d 左右结束,陶粒和陶粒与草炭混合的蒸发衰减过程(第 10~17 d)平缓,而草炭的蒸发衰减过程(第 13~16 d)较剧烈。这是由于陶粒的表面是一层烧制形成的陶质或釉质,对陶粒内外有一定隔离作用,能减缓水分蒸发。陶粒内部呈细密蜂窝状微孔,这些微孔是封闭

且相互不联通,这抑制了水的渗透,减缓水分在陶粒内运移的速度,使得陶粒蒸发相对平缓。而草炭内部结构呈不规则的蜂窝状结构、架空状结构和球状结构,孔隙大小不规则且多为相互联通的,水分易于在其内部运动。如表 2 所示,草炭饱和后体积膨胀,而随着水分蒸发,其膨胀的结构逐渐松散,使水分更易于蒸发,在蒸发末尾其蒸发量衰减剧烈。

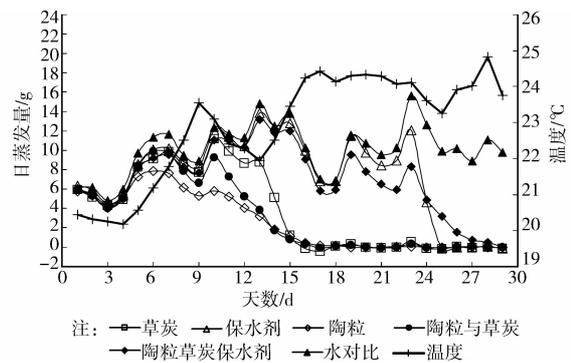


图 2 日蒸发量与温度的关系曲线

Fig. 2 The relationship between daily evaporation and temperature

由图 2 可见,保水剂的日蒸发量略小于水,蒸发至第 25 d 结束,蒸发衰减过程(第 23~25 d)剧烈。主要原因是:当水分子的热运动超过保水剂对其的束缚力时,水分子脱离高分子网络蒸发溢出。虽然保水剂有很高的吸水倍数,但与水形成的聚合物交联度低,其对水束缚力也低,水分子易蒸发,因此保水剂蒸发量一直维持很高水平直至蒸发结束。将保水剂与陶粒、草炭三者混合,蒸发结束时间延长至第 29 d,而且蒸发衰减过程(第 23~29 d)相对平缓。这是由于保水剂具有很强的胶黏性使得草炭胶粘成团且具有很高稳定性^[16]。团聚体结构稳定,保水剂被草炭和陶粒包裹,蒸发过程中水分运移得到抑制,且陶粒本身蒸发过程平缓,则三者混合试样蒸发时间长、蒸发衰减过程平缓。

2.3.2 环境因素对水分蒸发的影响 试验处在密闭实验室内,无自然光照射,室内风速可视为零。由图 2 和图 3 可发现蒸发的大致规律:随温度升高试样蒸发随之加剧,随大气相对湿度升高试样蒸发随之减缓。

如图 2、图 3 所示,试验第 11 d 与第 12 d 相对湿度基本相同,环境温度分别为 22.4 °C 和 22.1 °C,第 12 d 环境温度比前一日降低了 0.3 °C,保水剂和 3 种材料混合试样的日蒸发量分别减少的 8.6% 和 6.1%。这主要是因为温度升高加剧了水分子的热运动,水分子动能增加;同时,温度升高,试样内部毛

细水弯液面上表面张力降低而且水的黏滞性也会降低^[17]。这些因素都有利于增加试样内部水分运移速率和可供蒸发的水量,促进水分的蒸发。

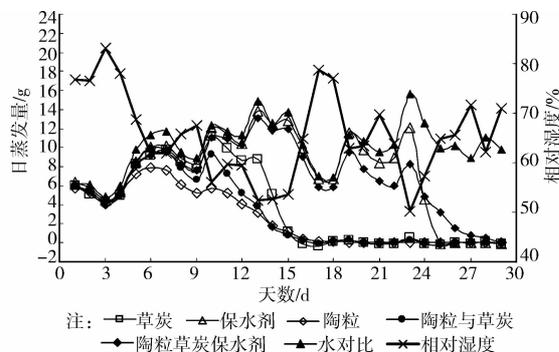


图 3 日蒸发量与相对湿度的关系曲线

Fig. 3 The relationship between daily evaporation and relative humidity

如图 2、图 3 所示,试验第 18 d 与第 19 d 的环境温度基本相同,空气相对湿度分别为 77.1% 和 62.9%,第 19 d 的空气相对湿度比前一日降低了 14.2 个百分点,而保水剂和 3 种材料混合试样的日蒸发量分别增加了 69.6% 和 61.8%。这是由于:相对湿度是指空气中水汽压与饱和水汽压的百分比,表达了大气蒸汽压的相对值。试样表面附近的蒸汽压与大气蒸汽压差值体现水分子的运动方向,差值越大运动速率越大。当差值大于零,试样表面附近的蒸汽压大于大气蒸汽压,水分子从试样逃逸到大气之中;当差值小于零时,试样表面附近的蒸汽压小于大气蒸汽压,水分子被吸入试样之中。因此相对湿度对试样蒸发有很大的影响,相对湿度越低,试样水分蒸发越快;反之,则试样水分蒸发越慢。

综上所述,试验中试样的水分蒸发速率和时间与试样的组成、环境温度以及空气相对湿度密不可分。试样的组成决定了不同试样的结构和饱和含水率,草炭和陶粒饱和含水率与含保水剂的试样相比较,它们的蒸发时间相对较短,虽然陶粒含水量低于草炭,但陶粒的结构更紧密,水分在其内部运移受到抑制,蒸发速率较缓,而草炭结构松散,其蒸发速率较快,因此陶粒的蒸发结束时间与草炭基本相同;含保水剂的试样具有很高的饱和含水率,它们具有很快的蒸发速率和较长的蒸发时间,且通过材料组合不仅能提高饱和含水率还能降低蒸发速率。温度升高能加快蒸发速率,而相对湿度的升高则将减缓蒸发速率,且相对湿度对蒸发速率的影响比温度更大。

3 结论

1) 常用屋顶绿化基质材料陶粒、草炭和保水剂

都具有高蓄水性,将 3 种基质材料按一定比例混合使得混合基质材料的结构得到优化,从而获得的实际蓄水性能大于理论计算值,大幅提高整体的蓄水性能。同时保水剂比例应适量,过高则其高吸水能力会抑制植物根系对水分的吸收;过低则影响基质整体的蓄水性能。

2) 常用屋顶绿化基质材料陶粒和草炭有较好的稳定性,而保水剂受高温易破坏。在实际应用过程中,应避免保水剂直接暴露在阳光照射下,将其他基质材料覆于保水剂之上能有效的延长保水剂的使用寿命。

3) 常用屋顶绿化基质材料保水剂蒸发剧烈接近于自由水面蒸发,陶粒与草炭蒸发较为平缓,若将陶粒和草炭与保水剂按一定比例混合,能有效的减缓蒸发速率并能延长蒸发时间。

参考文献:

- [1] 王星. 现代城市排水系统研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [2] 张璐,张尚武. 浅谈城市屋顶绿化的功能和意义[J]. 城市与减灾, 2006(1): 32-35.
Zhang L, Zhang S W. The functions and meanings of roof greening [J]. City and Disaster Reduction, 2006 (1): 32-35. (in Chinese)
- [3] 祁景玉,肖淑敏,高燕萍,等. 混合型粗集料轻混凝土的微观结构(I)[J]. 同济大学报:自然科学版, 2001, 29(8): 946-953.
Qi J Y, Xiao S M, Gao Y P, et al. Microstructure of mixed type aggregate lightweight concrete (I) [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29 (8): 946-953. (in Chinese)
- [4] 秦玲,魏钦平,李嘉瑞,等. 草炭对砂质土壤保水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 51-54.
Qin L, Wei Q P, Li J R, et al. Effects of peat on water conserving properties of sandy soil [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 51-54. (in Chinese)
- [5] Vidal-Beaudet L, Charpentier S. Percolation theory and hydrodynamics of soil-peat mixtures [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 64(3): 827-835.
- [6] Mooney S J, Holdenn M, Ward S M, et al. A comparison of morphological data an physical measurements of pore structures in milled peat stockpiles [J]. Geoderma, 2001, 104(1/2): 61-73.
- [7] Beheim E. The effect of peat land drainage and afforestation on runoff dynamics [J]. Environmental Role of Wetlands in Headwaters, 2006: 59-75.
- [8] 张建刚. 十一种农林保水剂的基本特性对比研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2009.

- [9] 张运超,蒋进,宋春武,等. 4 种剂型保水剂吸水 and 保水特性研究[J]. 水土保持通报,2011,31(6):99-103.
Zhang Y C, Jiang J, Song C W, et al. Water absorbency and retention of 4 kinds of absorbent polymer [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 99-103. (in Chinese)
- [10] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [11] 吕岩. 吉林省东部地区沼泽草炭土的结构特征及模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [12] 陈雪萍, 翁志学, 黄志明. 高吸水性树脂的结构与吸水机理[J]. 化工新型材料, 2002, 30(3): 19-21.
Chen X P, Weng Z X, Huang Z M. Structure and water absorbing mechanisms of superabsorbent resin [J]. New Chemical Materials, 2002, 30(3): 19-21. (in Chinese)
- [13] 席国喜, 梁蕊, 许会道. 聚丙烯酸钠的热分解动力学[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 102-104.
Xi G X, Liang R, Xu H D. Thermal decomposition kinetics of sodium polyacrylate [J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 2009, 37(2): 102-104. (in Chinese)
- [14] 冯吉, 邹志超, 邢伟民, 等. 都市屋顶绿化草坪草保水剂施用技术及经济效益分析[J]. 节水灌溉, 2011, 11: 76-79.
Feng J, Zou Z C, Xing W M, et al. Application technology of superabsorbent used in grass of roof greening in urban and its economic benefit analysis [J]. Water Saving Irrigation, 2011, 11: 76-79. (in Chinese)
- [15] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 875-881.
Tang C S, Shi B, Gu K. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 875-881. (in Chinese)
- [16] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 415-421. (in Chinese)
- [17] 顾惕人, 马季铭. 表面化学[M]. 北京: 科技出版社, 1994.

(编辑 胡英奎)

(上接第 66 页)

- [13] 周舟, 冯士维, 郭春生, 等. 功率型白光 LED 光学特性退化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2611-2614
Zhou Z, Feng S W, Guo C S, et al. Analysis on the degradation of optical properties of high power white LED [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2611-2614. (in Chinese)
- [14] 马剑, 党睿. 清代皇家古建筑彩画天然光照衰变研究[J]. 照明工程学报, 2009, 20(2): 20-23.
Ma J, Dang R. Study on decay of natural lighting on colored drawing about royal historic building of qing dynasty [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2009, 20(2): 20-23. (in Chinese)
- [15] 荆其诚. 色度学[M]. 科学出版社, 1979
- [16] 王春川. 人工加速光老化试验方法综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(1): 65-69
Wang C C. Overview of artificial accelerated light aging test methods [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(1): 65-69. (in Chinese)
- [17] McLaren K. The spectral regions of daylight which cause fading [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 1956: 86-89

(编辑 胡玲)