

# 湿垃圾沼渣对城市搬迁地土壤水库特征的影响研究

## Influence of Food Waste Biogas Residue on the Characteristics of Soil Reservoir in Urban Relocation Sites

伍海兵 梁 晶\* 陈 平 徐 冰 何小丽 马 想  
WU Haibing LING Jing\* CHEN Ping XU Bing HE Xiaoli MA Xiang

基金项目:  
上海市绿化和市容管理局项目“湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究”(编号: G200202)  
上海市绿化和市容管理局项目“城市污染土壤生态修复关键技术研发与集成应用”(编号: G190202)

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0045-06  
DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0045.007  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2021-08-16  
修回日期: 2021-09-08

**伍海兵**  
1986年生/男/安徽芜湖人/硕士/上海市园林科学规划研究院、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室高级工程师/研究方向为城市土壤及有机废弃物再利用研究(上海 200232)

**梁 晶**  
1981年生/女/山西人/博士/上海市园林科学规划研究院土壤研究所所长, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室教授级高级工程师/研究方向为城市土壤质量评价、修复及有机废弃物再利用(上海 200232)

**陈 平**  
1984年生/男/浙江人/博士/上海市园林科学规划研究院、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室高级工程师/研究方向为固体废弃物资源化利用(上海 200232)

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: liangjing336@163.com

**摘要**  
为了解湿垃圾沼渣对城市搬迁地土壤水库库容特征的影响, 选择上海典型搬迁地土壤为研究对象, 研究添加不同量沼渣对土壤水库总库容、土壤水分现存量、土壤剩余蓄水空间及土壤滞洪库容的影响, 并对土壤水库库容与土壤物理性质进行了相关性分析, 结果表明: 湿垃圾沼渣对搬迁地土壤水库总库容和水分现存量提升显著, 且随着沼渣添加量的增加均有增加趋势, 其中以添加80%沼渣的土壤水库总库容最佳, 添加60%沼渣的土壤水分现存量最佳。湿垃圾沼渣对搬迁地土壤剩余蓄水空间有所降低, 其中以60%沼渣土壤剩余蓄水空间最小。添加不同量沼渣对土壤滞洪库容影响不明显, 但以添加40%沼渣滞洪库容最佳。不同土壤物理性质影响着不同土壤水库类型, 其中土壤水库总库容主要受总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量及容重影响, 土壤水分现存量主要受含水率、容重、最大持水量、毛孔持水量及田间持水量影响, 土壤剩余蓄水空间主要受含水率和入渗率影响, 土壤滞洪库容主要受非毛管孔隙度影响。

**关键词**  
湿垃圾; 沼渣; 土壤水库; 物理性质

**Abstract**  
In order to understand the impact of biogas residue from food waste on the storage characteristics of soil reservoirs in urban relocation sites, the soil of a typical relocation site in Shanghai was selected as the research object. The effects of adding different amounts of biogas residues on total storage capacity of soil reservoir, soil water existing volume, soil remaining water storage space, soil detention capacity were studied, and the correlation between soil reservoir capacity and soil physics was analyzed. The results showed that the total storage capacity and moisture quantity of the soil reservoir in the relocation area was improved significantly. With the increase of biogas residue added, the total storage capacity of the soil reservoir with 80% biogas residue was the best, and the soil moisture content of the added 60% biogas residue was the best. On the other hand, biogas residue reduced the soil remaining water storage space of the soil in the relocation area, of which 60% of biogas residue was the smallest. The effect of adding different amounts of biogas residue on soil detention reservoir capacity was not apparent, but it was best to add 40% biogas residue storage capacity. The physical properties of different soils affected different types of soil reservoirs. The soil total reservoir capacity was mainly affected by total porosity, capillary porosity, maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, and bulk density. The soil water existing volume was mainly affected by water content, bulk density, maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, and field water holding capacity. The soil remaining water storage space was mainly affected by the water content and infiltration rate, and the soil detention storage was affected primarily by the non-capillary porosity.

**Key words**  
food waste; biogas residue; soil reservoirs; physical property

城市化是人类发展的必然趋势,也是社会发生显著的变化之一。随着城市化进程加快,城市不透水面积剧增,改变了城市水分自然循环过程,导致城市内涝风险不断增加,近年来南京、合肥、郑州等各大城市在雨季均发生了不同程度的内涝,逢暴雨必涝已成为中国城市的普遍现象<sup>[1-2]</sup>。城市内涝频发,除城市排水管网设计滞后外,各大城市近年来兴建的大量绿地土壤没有真正起到雨洪调节作用也是主要原因之一。土壤是布满大小小孔隙的疏松多孔体,对水分具有良好的蓄、运、保、调功能,称为“土壤水库”<sup>[3]</sup>。土壤作为自然可透水层,吸收雨水以及周围硬质路面的径流来消减地表径流并补充土壤水和地下水,对减缓城市洪涝、提高雨洪利用具有积极意义<sup>[4]</sup>。通常用土壤水库总库容、水分现存量、剩余蓄水空间、滞洪库容等来评价土壤水库特征,土壤水库总库容是反映土壤涵养水源、调节水分循环的一个重要参数<sup>[5]</sup>,是衡量土壤最大蓄水能力指标之一<sup>[6]</sup>,指在一定土层厚度所能蓄积的最大水量;土壤水分现存量是指土壤实时的储水量,随着降雨、灌溉和蒸发的变化而变化,反映土壤的实时水库库容<sup>[7]</sup>;土壤剩余蓄水空间是指土壤水库总库容与土壤水分现存量间的差值,反映土壤当前状态还能容纳的水分库容<sup>[7]</sup>;土壤滞洪库容表征土壤水库在短时间内能够储存水分的能力,是指土壤饱和持水量与田间持水量间的差值对应的水库库容,若土壤水分含量高于田间持水量时,多余的水分则能在短时间内蓄存于土壤中,并最终经过蒸发进入大气或通过下渗等途径进入地下补给地下水,这是降雨或灌溉水进入土壤的主要通道,可以快速将降雨或灌溉水转换为土壤滞洪库容,并在重力作用下变为壤中流,从而再次分配土壤各水库,对减少城市降雨瞬时洪涝、维持地下水平衡等方面具有重要作用<sup>[8]</sup>。

城市绿地是城市发展规划的重要组成部分,是城市土壤水库蓄积的重要场所之一,然而,当前城市绿地土壤水库库容偏低及库容萎缩较为常见<sup>[9-10]</sup>,土壤的水库功能发挥受到了制约。并且随着城市绿地建设需求快速增加与土地资源紧缺的矛盾日益严重,越来越多的困难立地被广泛用于绿地建设<sup>[11]</sup>,搬迁地作为困难立地的主要类型之一<sup>[12]</sup>,在人类社会日常生产和生活中,其土壤质量往往受到不同程度的破坏,致使土壤的生态功能也遭受不同程度的退化,直接影响城市土壤水库功能的发挥。因此,城市土壤水库的提升迫在眉睫。但已有土壤水库的研究主要集中在农林土壤<sup>[13-14]</sup>,对城

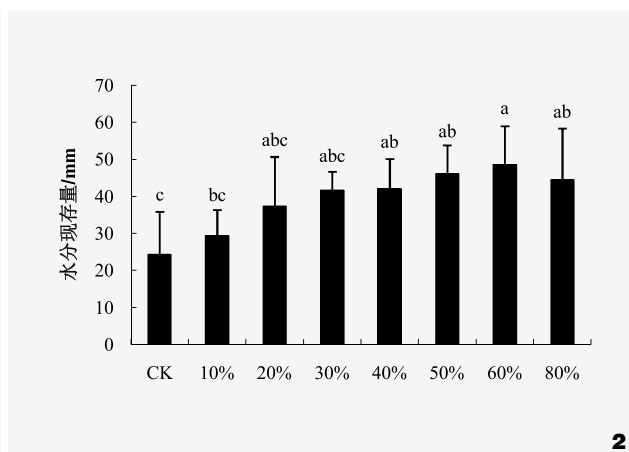
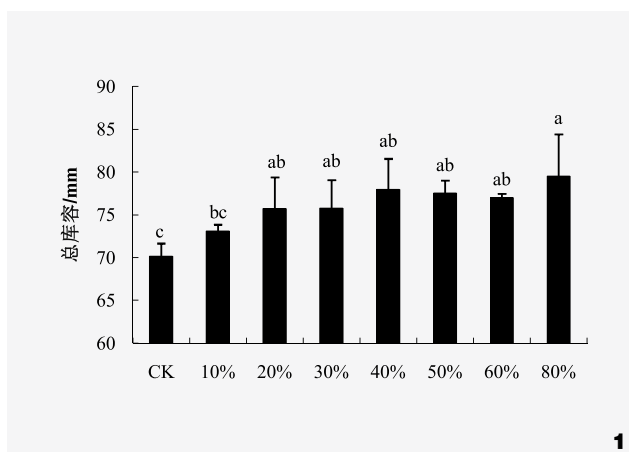
市土壤水库的研究较少,针对城市土壤水库库容改良提升鲜有报道。

另外,随着城市的快速发展,经济水平的提高和人口密度的增加,产生的城市生活垃圾也逐年增加,预计还将以每年8%~10%的速度递增<sup>[15]</sup>,其中有机湿垃圾占比高达60%以上<sup>[16]</sup>。国内大多城市的湿垃圾处置方式仍然以填埋、焚烧等为主<sup>[17]</sup>,不仅占用大量土地、污染环境,而且是一种资源的浪费。随着循环经济和可持续发展理念的逐步深化,湿垃圾资源化利用越来越受到国家的重视。2018年12月,国务院办公厅关于印发《“无废城市”建设试点工作方案》试点工作方案的通知中提到:“无废城市”是以创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念为引领,持续推进固体废物源头减量和资源化利用,最大限度减少填埋量,将固体废物环境影响降至最低的城市发展模式,旨在最终实现整个城市固体废物产生量最小、资源化利用充分、处置安全的目标。上海市政府对湿垃圾资源化利用高度重视,发布《上海市湿垃圾处理规划(2014—2020)〈关于进一步加强本市垃圾综合治理的实施方案〉》(沪政办〔2016〕69号),“十三五”期间,上海市无害化处理能力保持在2.7万t/d,无害化处理率保持100%,补齐湿垃圾资源化利用能力建设短板,不断提升资源化利用水平。湿垃圾经过生化处理后,形成的沼渣质地疏松、通气性好,有机质、腐殖酸含量丰富<sup>[18-19]</sup>,是良好的土壤改良材料和有机肥料,如Claudia等采用沼渣烘干造粒的方式进行土地利用<sup>[20]</sup>;李占文等研究了施用沼渣后不仅改良了土壤,而且对枣树的生产发育、果实品质和产率均能有效提高<sup>[21]</sup>;高袖等利用沼渣、有机辅料混合配制出高效保肥保水的营养土,用于花卉种植<sup>[22]</sup>。本研究以城市典型搬迁地土壤为研究对象,研究添加不同量湿垃圾沼渣对土壤水库库容的影响,分析土壤水库库容影响因素,以期为城市搬迁地土壤水库库容能力提升提供技术支撑,同时也为沼渣的资源化利用提供新的技术途径,为城市生态环境和生态安全提供技术保障。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

土壤取自上海市浦东新区某典型搬迁地土壤;沼渣由上海老港生物能源再利用中心提供,其主要是上海市城区的湿垃圾厌氧发酵形成的沼渣,并经过烘干脱水,其含水量为6%,容重为0.76 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度为65%。



1. 添加不同量的湿垃圾沼渣土壤水库总库容 (注: 图中不同小写字母表示差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。)  
2. 添加不同量的湿垃圾沼渣土壤水分现存量

## 1.2 试验设计

将湿垃圾沼渣按体积10%、20%、30%、40%、50%、60%和80%与供试土壤混匀, 并设置未添加湿垃圾沼渣的处理作为对照组(CK), 共8个处理, 每个处理5组重复, 装入1 gal花盆中(盆高15 cm), 放入露天大棚中自然培养一年, 用100 cm<sup>3</sup>的环刀取样, 测定土壤含水率、容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和入渗率等9项物理指标。

## 1.3 试验方法

土壤含水率、容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和入渗率的测定参照《森林土壤分析方法》<sup>[23]</sup>; 土壤水库库容根据土壤容重、土壤水分以及土层深度来计算<sup>[24]</sup>, 公式(1)–(6)。

$$W = 0.1 \times \rho \times \theta \times h \quad (1)$$

$$W_t = 0.1 \times \rho \times \theta_s \times h \quad (2)$$

$$W_c = 0.1 \times \rho \times \theta_c \times h \quad (3)$$

$$W_f = 0.1 \times \rho \times \theta_f \times h \quad (4)$$

$$W_r = W_t - W_c \quad (5)$$

$$W_h = W_t - W_f \quad (6)$$

其中,  $W$ 为土壤水库库容(mm),  $\rho$ 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>),  $\theta$ 为土壤各水分(g/kg),  $h$ 为土层厚度(cm),  $W_t$ 为土壤水库总库容(mm),  $\theta_s$ 为土壤饱和持水量(g/kg),  $W_c$ 为土壤水库现存量(mm),

$\theta_c$ 为土壤含水率(g/kg),  $W_t$ 为田间持水量对应的库容(mm),  $\theta_f$ 为田间持水量(g/kg),  $W_f$ 为土壤剩余蓄水空间(mm),  $W_h$ 为滞洪库容(mm)。本研究采用的花盆深15 cm, 故取15 cm土层作为计算土壤水库库容的土壤厚度。

## 1.4 数据处理

采用Excel 2007和SPSS17.0软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和LSD法进行方差分析和多重比较( $\alpha=0.05$ ), 利用Excel 2007软件作图, 图中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿垃圾对土壤水库库容影响分析

#### 2.1.1 土壤水库总库容

由图1可知, 湿垃圾沼渣能有效提高土壤水库总库容, 添加80%湿垃圾沼渣的土壤水库总库容最高, 为79.48 mm, 较CK提高了13.3%; 其次是添加40%湿垃圾沼渣的处理, 土壤总库容为77.92 mm, 较CK提高了11.1%; 而较其他添加湿垃圾沼渣的处理, 添加10%湿垃圾沼渣后土壤总库容提升幅度较小, 但较CK提高了4.2%。随着湿垃圾沼渣添加量的增加, 土壤水库总库容基本呈逐渐增加的趋势。添加不同量的湿垃圾沼渣土壤水库总库容存在一定差异性, 主要体现在湿垃圾沼渣添加量在20%~60%时, 其土壤水库总库容均显著高于

CK ( $P < 0.05$ )。

2.1.2 土壤水分现存量

从图2可以发现，添加不同量的湿垃圾沼渣均能有效提高土壤水分现存量，湿垃圾沼渣添加量60%时，土壤水分现存量最高，达48.51 mm，较CK处理提升了100.2%；其次是50%湿垃圾沼渣，水分现存量为46.03 mm，较CK提升了90.0%；而10%湿垃圾沼渣相对较小，为29.28 mm，较CK提升了20.8%。随着湿垃圾沼渣添加量的增加，土壤水分现存量先增加后减小，当沼渣添加量达60%时，土壤水分现存量达到最大值，之后当沼渣添加量达到80%时，其水分现存量有所降低。添加不同量的湿垃圾沼渣土壤水分现存量存在一定差异性，主要体现在湿垃圾沼渣添加量在40% ~ 80%时，均显著高于CK ( $P < 0.05$ )。

2.1.3 土壤剩余蓄水空间

由图3可知，湿垃圾沼渣降低了土壤剩余蓄水空间，湿垃圾沼渣添加量60%时，土壤剩余蓄水空间最低，为28.45 mm，较CK降低了38.0%，其次是添加50%湿垃圾沼渣，为31.48 mm，较CK降低了31.4%，而10%沼渣土壤剩余蓄水空间降低最小，较CK降低了4.6%。不同添加量沼渣土壤剩余蓄水空间差异不明显 ( $P > 0.05$ )，但随着沼渣添加量的增加，土壤剩余蓄水空间先降低后增加，当沼渣添加量达60%时，土壤剩余蓄水空间最

低，当湿垃圾沼渣添加量达到80%时，其土壤剩余蓄水空间有所增加。

2.1.4 土壤滞洪库容

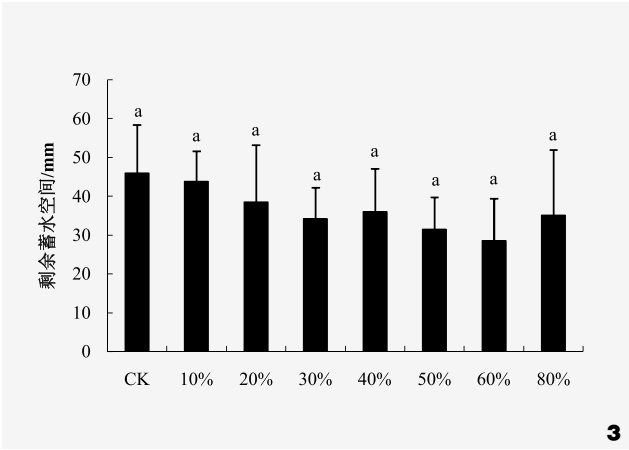
从图4中可以看出，湿垃圾沼渣添加量40%时，土壤滞洪库容最高，为5.80 mm，较CK提升了19.1%；其次是10%湿垃圾沼渣，为5.73 mm，较CK提升了17.7%；而添加30%湿垃圾沼渣，土壤滞洪库容有所降低，较CK降低了11.7%。不同添加量沼渣土壤滞洪库容差异不明显 ( $P > 0.05$ )。

2.2 土壤水库库容影响因子分析

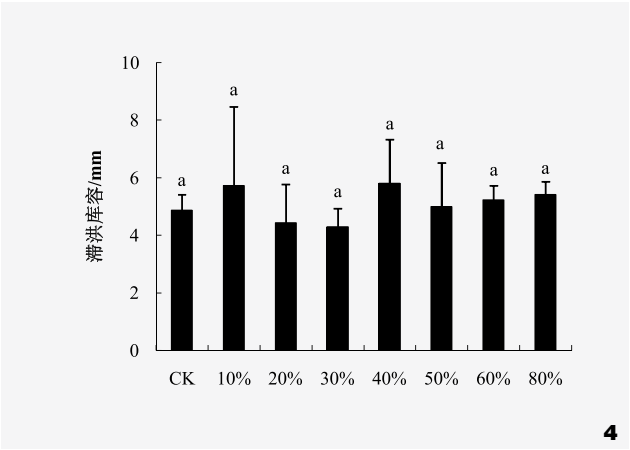
将不同添加量沼渣土壤各水库库容与其土壤基本物理指标进行相关性分析 (表1)，结果表明：土壤水库总库容与土壤最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度及总孔隙度达到了极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与含水率达到了显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与容重达到了极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，尤其是与总孔隙度，其相关系数高达1.0，然后是毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量及田间持水量，相关系数均达到了0.95及以上，而与入渗率及非毛管孔隙度相关性不明显。由此可知，土壤总孔隙度对土壤水库总库容影响最大，其次是毛管孔隙度，然后是最大持水量、毛管持水量及添加持水量，而入渗率及非毛管孔隙度对土壤水库总库容影响较小。

土壤水分现存量与含水率达到了极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，

3. 添加不同量的湿垃圾沼渣土壤剩余蓄水空间  
4. 添加不同量的湿垃圾沼渣土壤滞洪库容



3



4

表1 土壤水库库容与土壤基本物理指标相关性分析

| 土壤物理指标                   | 总库容/mm               | 水分现存量/mm             | 剩余蓄水空间/mm            | 滞洪库容/mm             |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 入渗率/ (mm/h)              | 0.131                | 0.510 <sup>*</sup>   | -0.487 <sup>*</sup>  | 0.143               |
| 容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) | -0.887 <sup>**</sup> | -0.598 <sup>**</sup> | 0.327                | -0.071              |
| 含水率/%                    | 0.432 <sup>*</sup>   | 0.981 <sup>**</sup>  | -0.877 <sup>**</sup> | 0.001               |
| 最大持水量/ (g/kg)            | 0.959 <sup>**</sup>  | 0.458 <sup>*</sup>   | -0.158               | 0.076               |
| 毛管持水量/ (g/kg)            | 0.955 <sup>**</sup>  | 0.463 <sup>*</sup>   | -0.165               | 0.027               |
| 田间持水量/ (g/kg)            | 0.950 <sup>**</sup>  | 0.455 <sup>*</sup>   | -0.158               | -0.054              |
| 非毛管孔隙度/%                 | 0.148                | -0.082               | 0.134                | 0.689 <sup>**</sup> |
| 毛管孔隙度/%                  | 0.983 <sup>**</sup>  | 0.294                | 0.020                | -0.037              |
| 总孔隙度/%                   | 1.000 <sup>**</sup>  | 0.276                | 0.044                | 0.090               |

注：“”表示极显著相关 ( $P<0.01$ )；“\*”表示显著相关 ( $P<0.05$ )。

相关系数高达0.981，与入渗率、最大持水量、毛管持水量及田间持水量达到了显著正相关 ( $P<0.05$ )，而与容重达到了极显著负相关 ( $P<0.01$ )，但与土壤各孔隙度相关性不明显。由此可见，土壤含水率对土壤水分现存量影响最大，其次是容重，然后是入渗率、毛管持水量、最大持水量、田间持水量，而非毛管孔隙度、毛管孔隙度及总孔隙度对土壤水分现存量影响不明显。

土壤剩余蓄水空间与含水率达到了极显著负相关 ( $P<0.01$ )，与入渗率达到了显著负相关 ( $P<0.05$ )，而与土壤其他物理指标相关性不明显。由此可见，土壤含水率对剩余蓄水空间影响最大，其次是入渗率，而容重、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度及总孔隙度对剩余蓄水空间影响不明显。

土壤滞洪库容与非毛管孔隙度达到了极显著正相关 ( $P<0.01$ )，这与伍海兵等研究上海辰山植物园土壤滞洪库容结果类似<sup>[9]</sup>，而其他物理指标相关性不明显。由此可见，土壤滞洪库容主要受土壤非毛管孔隙度影响，其他物理指标对滞洪库容影响不明显。

3 结论与讨论

利用湿垃圾沼渣提升土壤水库库容效果明显，添加湿垃圾沼渣能有效提高土壤水库总库容，尤其是土壤中添加不少于20%的湿垃圾沼渣时，对土壤水库总库容的提升效果显著，并且随着湿垃圾沼渣添加量的增加，土壤水库总库容有增加的趋势，以添加80%的湿垃圾沼渣土壤水库总库容最高，这可能是由于湿垃圾沼渣较土壤疏松，对土壤孔隙度增加效果明显，

提升了土壤的蓄水和储水能力<sup>[25]</sup>，从而增加了土壤水库总库容。湿垃圾沼渣对土壤水分现存量提升效果明显，尤其是添加量为60%时，效果最佳，较对照组提升了1倍多，由此可见，湿垃圾沼渣对土壤的保水能力效果明显，从而防止植物因干旱而导致死亡；但湿垃圾沼渣添加量达到80%时，土壤水分现存量较60%处理组有所降低，这可能是由于湿垃圾沼渣含量过高，其土壤的大孔隙含量过多，而导致其土壤对灌溉水或雨水的截留能力弱于60%湿垃圾沼渣，从而使其土壤含水率相对较低。湿垃圾沼渣对土壤剩余蓄水空间有所降低，其中沼渣添加量60%，土壤剩余蓄水空间最低，当湿垃圾沼渣添加量达到80%时，其土壤剩余蓄水空间有所增加，这可能是由于80%湿垃圾沼渣土壤水分现存量相比60%湿垃圾沼渣低，且80%湿垃圾沼渣土壤水库总库容高于60%湿垃圾沼渣，从而导致80%湿垃圾沼渣土壤剩余蓄水空间高于60%湿垃圾沼渣土壤。不同添加量的湿垃圾沼渣均与CK差异不明显，由此可见湿垃圾沼渣对土壤剩余蓄水空间改善作用不显著，可能是由于湿垃圾沼渣对土壤水分现存量提升效果较明显，土壤可再容纳的水库低，从而降低了其土壤剩余蓄水空间。湿垃圾沼渣对土壤滞洪库容提升效果不明显，添加不同量的湿垃圾沼渣均与CK差异不明显，这可能是由于添加的湿垃圾沼渣增加了土壤饱和持水量和田间持水量，但增加的比例不尽相同，从而直接影响土壤滞洪库容的增加或减少。

土壤水库库容受众多土壤性质影响<sup>[26-27]</sup>，本研究从土壤物理性质对土壤库容进行分析，结果表明：不同的水库库容类型受土壤物理性质影响不同，其中土壤水库总库容主要受总孔隙

度、毛孔孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量及容重影响,其相关性达到极显著水平,这与伍海兵、黄晖等研究城市绿地土壤水库结果一致<sup>[9-10]</sup>,尤其是与总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量,其相关系数均到达了0.95以上。土壤水分现存量主要受含水率、容重、最大持水量、毛管持水量及田间持水量影响,尤其是含水率和容重影响最大,含水率越大,其水分现存量越高,容重越大,水分现存量越低。土壤剩余蓄水空间主要受含水率和入渗率影响,含水率和入渗率越低,则土壤剩余蓄水空间越高。土壤滞洪库容主要受非毛管孔隙度影响,非毛管孔隙度越大,可促进土壤水分下渗,则土壤滞洪库容越高,这与伍海兵等研究城市绿地土壤滞洪库容一致<sup>[28]</sup>。

综上,不同的土壤物理性质影响着不同土壤水库类型,通过湿垃圾沼渣良好的物理特性,来改善土壤物理性质,增加土壤总孔隙度、含水率、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、持水量及入渗率,降低土壤容重,对改善土壤各水库库容具有积极作用,这与杨永辉、孙艳红等提升林地土壤水库技术措施相一致<sup>[29-30]</sup>。总之,改善土壤质量,提高土壤水库库容是有效利用降雨、减缓城市排水管压力、增加雨水下渗、减小暴雨径流和改善城市水生态环境的重要措施,也是当前快速城市化发展中充分利用雨水资源和减轻城市内涝的有效措施之一。▲

## 参考文献

- [1] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5): 553-562.
- [2] ROY POIRIER A, CHAMPAGNE P, FILION Y. Review of Bioretention System Research and Design: Past, Present, and Future[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, 136(9): 878-889.
- [3] 黄荣珍,杨玉盛,张金池,等.不同林地类型土壤水库蓄水特性研究[J].水土保持通报,2005,25(3): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,18(6): 1-5.
- [6] 张冬青,何腾兵,林吕虎.贵州乌江流域喀斯特土壤物理性质的研究[J].贵州科学,2006,24(2): 39-43.
- [7] 苏晓琳.按树造林对林地土壤水文功能和养分淋失的影响[D].南宁:广西大学,2014.
- [8] 杨金玲,张甘霖.城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应[J].土壤,2008,40(6): 992-996.

- [9] 伍海兵,方海兰,彭红玲.典型新建绿地上海辰山植物园土壤水库特征及其影响因子[J].应用生态学报,2016,27(5): 1437-1444.
- [10] 黄晖,毕舒怡,字肖萌,等.深圳城市绿地土壤水库特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(01): 146-150,160.
- [11] 张浪,曹福亮,张冬梅.城市棕地绿化植物物种优选方法研究——以上海市为例[J].现代城市研究,2017(9): 119-123.
- [12] 张浪.城市困难立地概念及其分类辨析[J].上海建设科技,2020(3): 107-109.
- [13] 姜义宝.侵蚀条件下紫色土坡耕地耕层质量变化特征及适宜性研究[D].重庆:西南大学,2019.
- [14] 侯宁宇,苏晓琳,杨钙仁,等.按树造林的土壤物理性质及其水文效应[J].水土保持学报,2019,33(03): 101-107,114.
- [15] 王树文,文学娜,秦龙.中国城市生活垃圾公众参与管理与政府管制互动模型构建[J].中国人口·资源与环境,2014,24(04): 142-148.
- [16] 张越.城市生活垃圾减量化管理经济学[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [17] 马芮.我国城市生活垃圾处理现状及调整策略刍议[J].环境保护与循环经济,2021,41(02): 15-17.
- [18] POGGI V H M, TREJO EJ, FERNÁNDEZ V G, et al. Quality of Anaerobic Compost from Paper Mill and Municipal Solid Wastes for Soil Amendment[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(11-12): 179-186.
- [19] 廖燕.市政污泥与餐厨垃圾混合共厌氧消化性能研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [20] CLAUDIA M, JOACHIM M. Drying Characteristics and Nitrogen Loss of Biogas Digestate During Drying Process[G]//Quebec City: Canadian Society for Bioengineering, 2010.
- [21] 李占文,刘银安,李攀,等.沼渣有机肥在灵武长枣生产中的应用研究[J].宁夏农林科技,2012,53(11): 74-75.
- [22] 高袖.沼气发酵残余物制备高效复合营养土研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
- [23] 中华人民共和国林业行业标准.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [24] 焦峰,温仲明,王勇,等.基于GIS的黄土丘陵区土壤水库蓄水时空变异特征[J].水土保持学报,2007,21(3): 128-132.
- [25] 王爱英,赵啸林,孙玲丽,等.沼渣土壤调理剂对胶东地区酸性土壤改良效果研究[J].中国沼气,2019,37(04): 98-102.
- [26] 姜义宝,史东梅,江娜,等.土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J].土壤学报,2020,57(06): 1399-1410.
- [27] 欧阳祥,计勇,刘荃,等.土壤水库及其影响因素研究综述[J].水土保持应用技术,2019(01): 42-44.
- [28] 伍海兵,周建强,方海兰.上海中心城区绿地土壤水库特征[J].应用生态学报,2017,28(03): 966-974.
- [29] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J].应用生态学报,2008,19(5): 1040-1045.
- [30] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2): 106-109.