

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.005



# 不同排水材料对轻型种植屋面土壤 热湿环境的影响

俞伟, 关庆伟

(南京林业大学 生物与环境学院; 南方林业协同创新中心, 南京 210037)

**摘要:**构建了由碎石、陶粒、玻璃轻石、HDPE 和 PVC 排水板 5 种排水材料组成的佛甲草轻型种植屋面模拟试验平台(室内自然状态),测定了各材料处理土壤以及土壤底部空气的温、湿度。结果表明:土壤湿度在少雨季节受到不同排水材料的显著影响,而在雨量充沛的季节差异不显著。在干旱月份,与碎石处理相比,具有蓄水性能的 4 种排水材料(陶粒、玻璃轻石、HDPE 和 PVC 排水板)有明显的抗旱优势,平均土壤湿度提高了约 35%;然而,这 4 种材料的蓄水量大小对处理之间的土壤湿度没有显著影响;另外,材料的排水性能对土壤湿度有显著影响,通水量大的 HDPE 排水板在雨后初期土壤湿度显著小于其他材料。土壤(空气)温度没有受到材料蓄水性能的影响。轻型种植屋面土壤热湿环境的变化不完全由材料蓄水性能所决定;同时,其具有明显的保温(冬季夜间)隔热(全年白天)作用,且热工性能存在季节性和日内差异。

**关键词:**种植屋面;排水材料;温度和湿度;塑料排水板;玻璃轻石;陶粒

**中图分类号:**TU111.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674-4764(2018)04-0027-09

## Effects of different drainage materials on soil hygro-thermal environment of extensive green roof

Yu Wei, Guan Qingwei

(College of Biology and the Environment; Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China)

**Abstract:** Five kinds of drainage materials were chosen such as gravel, ceramsite, glass pumice, HDPE and PVC drainage boards, to establish a simulation test bed of extensive green roof with *Sedum lineare Thunb* (indoor natural state). The temperature and moisture of the soil, as well as the temperature and relative humidity of the air at the bottom of soil layer by different material treatments were measured. The results showed that: The soil moisture was affected significantly by different drainage materials during the less rain season, but the difference was not significant during the rainy season. In drought month, four kinds of

**收稿日期:**2017-09-06

**基金项目:**国家林业公益性行业科研专项(201104075);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

**作者简介:**俞伟(1971-),男,高级工程师,博士生,主要从事城市生态学和绿色建筑研究,E-mail:yuwei\_max@126.com。

关庆伟(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:guanqian999@163.com。

**Received:**2017-09-06

**Foundation item:** Nation Forestry Special Project for Scientific Research of Public Welfare(201104075); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(PAPD)

**Author brief:** Yu Wei (1971-), senior engineer, PhD candidate, main research interests: urban ecology and green building, E-mail: yuwei\_max@126.com.

Guan Qingwei(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: guanqian999@163.com.

drainage materials with water retention performance such as ceramsite, glass pumice, HDPE and PVC drainage boards, had obvious drought resistance advantage compared to gravel treatment, and the average soil moisture was increased by about 35%. However, the size of the water retention of these four materials had no significant effect on the soil moisture among the treatments. Other than that the drainage performance of the materials had a significant effect on the soil moisture. Early after the rain, the soil moisture of the HDPE drainage board with larger water flux was significantly smaller than other material treatments. Soil temperature and soil air temperature were not affected by water retention performance of the materials. It is indicated that the changes of soil hygro-thermal environment on the extensive green roof are not completely determined by the water retention performance of the materials. Meanwhile, the extensive green roof has both heat-insulating(all year daytime) and heat-preservation(winter nighttime) effects, and its thermal performance has seasonal and intraday differences.

**Keywords:** green roof; drainage material; temperature and moisture content; plastic drainage board; glass pumice; ceramsite

随着环境问题的加剧,人们开始寻求利用自然的方式,即通过城市下垫面的绿化回归到其自然属性来改善局域环境和城市微气候<sup>[1-2]</sup>,营建种植屋面是一种有效措施<sup>[3]</sup>。轻型种植屋面的改造对象是既有建筑,由于受屋面承载力限制,其土层不能太厚(通常 $h < 15$  cm),一般以草本植物为主。土层薄意味着储存水量少,只能优先选择耐热抗旱性强的景天科植物<sup>[4-5]</sup>,所以,佛甲草(*Sedum lineare Thunb*)在目前轻型种植屋面工程中得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

由于轻型种植屋面改变了原有建筑屋顶的下垫面性质,从而可以有效减弱城市的热岛效应<sup>[7]</sup>。大量研究表明,即使土层不是很厚,其隔热效果也很显著<sup>[8]</sup>,除了可以有效降低建筑物夏季能耗<sup>[9]</sup>,在雨期还可以减少降雨产流总径流量,延迟产流时间<sup>[10-11]</sup>;其次,草本植物本身也可以通过向地下部分输入凋落物,以增加土壤有机碳含量从而起到固碳作用<sup>[12]</sup>;当然,种有草本植物的轻型种植屋面还能发挥其他作用<sup>[13-15]</sup>。除此之外,还有针对种植屋面不同构造层次展开的研究,如:是否有蓄水层以及不同的种植土(基质)层对种植屋面热工性能的影响<sup>[16]</sup>;蓄水层对屋面植物水分状况和生存的意义<sup>[17]</sup>;并进行了相关模型的研究<sup>[18-20]</sup>。

《种植屋面工程技术规程》(JGJ 155—2013)规定种植平屋面的基本构造层次包括:基层、绝热层、找坡(找平)层、普通防水层、耐根穿刺防水层、保护层、排(蓄)水层、过滤层、种植土层和植被层等。同时,根据各地区气候特点、屋面形式、植物种类等情况,可以增减屋面构造层次,选择不同材料。通常建筑防水要求屋面不能积水,而植物的抗性有限,因此,人们开发出具有蓄水性能的排水材料来应对干旱天气,使排水层兼具蓄水性能,即构成排(蓄)水层

(以下简称排水层);也使得轻型种植屋面的蓄水量大小主要由排水材料的蓄水性能决定。由于排水层位于种植土层以下,又兼具蓄排双重功能,因此,在各构造层次中起到承上起下的重要作用,并逐渐受到关注<sup>[21]</sup>。如果在排水层选择不同蓄水性能的排水材料,那么对于种植屋面的土壤则均可视为一种处理;并且排水材料中储存的水与土壤颗粒没有直接接触,导致种植屋面土壤水的补充过程相对自然界土壤水的保持和运动有很大不同。目前,人们多是根据排水材料蓄水性能来推断其补水效果,而有关材料蓄水量大小对上层土壤墒情的实际影响尚没有看到有关实验报道。笔者选取了 5 种常用排水材料(4 种具有蓄水性能),通过构建试验平台模拟轻型种植屋面,在室内自然状态下对不同材料处理后的土壤温、湿度以及土壤底部空气温、湿度进行了多维定量研究,主要探讨了轻型种植屋面不同排水材料蓄水性能的实效性,以及由此可能导致其土壤湿热环境发生变化的原因,并对种植屋面保温隔热作用的季节性差异进行了讨论。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验的 5 种排水材料分别是碎石、陶粒、HDPE 排水板、玻璃轻石和 PVC 排水板(图 1)。碎石和陶粒是种植屋面传统的排水材料;玻璃轻石是利用废玻璃研磨、高温焙烧、发泡膨胀后冷却而形成的一种多孔轻质无机材料,是近年来开发的循环利用型产品;HDPE 和 PVC 排水板属于塑料类块状有机材料,是目前市场上最有代表性的两种型号。排水层材料总厚度均为 3 cm。

根据前期试验得到的材料蓄水性能指标<sup>[22]</sup>,通

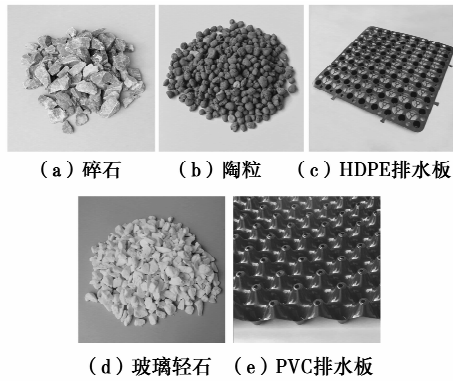


图 1 试验材料  
Fig. 1 Test materials

过材料蓄水体积比(蓄水体积/材料所占空间体积),可计算出 5 种材料在 3 cm 厚时每平方米最大蓄水量,蓄水量从大到小依次为:PVC 排水板>玻璃轻石>HDPE 排水板>陶粒>碎石(表 1)。通常认为碎石没有蓄水能力(吸水率在 1%~2%之间)。

表 1 不同排水材料基本数据

Table 1 Basic data of different drainage materials

材料	蓄水量/(L·m <sup>-2</sup> )	表面孔洞比/%
1-碎石	0.45	
2-陶粒	2.19	
3-HDPE 排水板	3.24	33.3
4-玻璃轻石	3.54	
5-PVC 排水板	4.74	1

### 1.2 试验设计

试验场地为一块约 600 m<sup>2</sup> 的水泥空地,主方向朝南偏西。试验平台由 15 个 1 m×1 m 的种植池组成,下部架空以模拟种植屋面(室内自然状态)。试验采用随机区组设计,每种材料对应一个种植池(图 2(a)),5 个种植池连成一组,共 3 组(即 5 个处理 3 个重复),组间距 0.8 m。种植土取自一苗圃地 0~60 cm 土,去杂后充分混合均匀,设计土层厚度 12 cm,统一植物配置为佛甲草(*Sedum lineare Thunb*);2014-03-23 进行佛甲草根茎撒播(每池 1.5 kg),等量充分浇水培育;至当年 4 月底,佛甲草已完全覆盖种植池,停止人工养护,试验平台构建完毕(图 3(a))。

种植池构造:池壁为 12 cm 厚砖砌体,内外均用水泥砂浆找平,基层采用预制钢筋混凝土板架空;根据试验目的没有设置绝热层、防水层和保护层;过滤层统一采用 200 g/m<sup>2</sup> 白色土工布,每池预埋一直径 2.5 cm 的 PVC 排水管(图 2(b))。

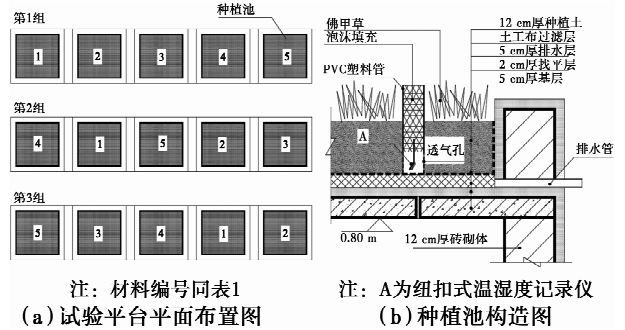


图 2 试验平台设计  
Fig. 2 Test bed design drawing

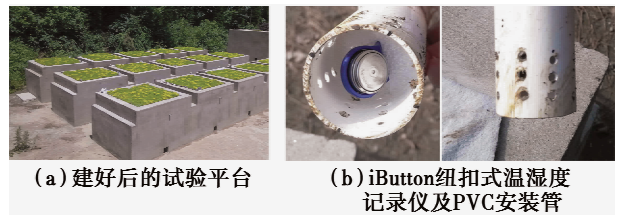


图 3 试验现场  
Fig. 3 Test site

### 1.3 数据采集

土壤温、湿度数据采集周期总计 15 个月,分为前后两个阶段。第 1 阶段时间为 2014 年 10 月—12 月,采样周期 3 个月。第 2 阶段时间为 2015 年 1 月—12 月,采样周期 12 个月。土壤温、湿度的数据采集分为 4 种方法,前 2 种为主要实验方法。

一是连续采集:使用 iButton 纽扣式(美国 MAXIM 型号 DS1923)全自动温湿度记录仪,温度测量范围-20~85 ℃,精度±0.5 ℃,湿度测量范围 0~100% RH,精度±3% RH;安装在自制的 PVC 塑料管底部(图 3(b)),测量深度 12 cm;时间从 2014-10-01 开始,至 2014-12-31 结束;全程 92 d,记录间隔 1 h,共计采集土壤层底部和排水层交界处空气温、湿度数据 2 208 组。此记录仪内部为微电脑存储器,在取回读数时发现只有安装在第 3 组种植池的数据是完整的,所以没有重复值。

二是按月采集:土壤湿度(体积含水量)使用 8100-202 土壤水分传感器,测量范围 0~饱和,精度±3% VWC(Volumetric Water Content);土壤温度使用 8100-203 土壤温度传感器,测量范围-20~60 ℃,精度±0.5 ℃;测量深度 5 cm,测量时间均在中午 11:00 左右;同时将温度传感器探头避光放置于(仪器架空底座通风孔内)土壤表面用于测量近土表大气温度;时间从 2015 年 1 月至 12 月,每月一次(通常在雨后 3~5 d),共计采集土壤和土表温、湿度数据 12 组。

三是实时采集:使用特安斯 TASI-8620 数字 K

型热电偶温度计,测量范围 $-50\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精度为读数的 $\pm 0.3\%+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;用于试验场地大气温度测量,测量位置为树荫下约 $1\text{ m}$ 高。

四是天气数据采集:记录下实验期间当地气象站日最高和最低气温以及降雨情况。

#### 1.4 数据处理

试验数据用 SPSS19 软件进行统计分析, SigmaPlot 12.5 制图;采用一般线性模型单变量分析不同处理之间的差异显著性(显著性水平设为 $0.05$ );表格中数据均为 $3$ 次重复的平均值 $\pm$ 标准差,用不同的字母表示统计学上的显著差异;采用重复度量方差分析将月数据转换成季节数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤空气温、湿度的时变化特征

如图4所示,不同材料处理土壤空气温度(底部)变化趋势和大气温度季节性变化基本一致,从10月初的 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右开始逐渐下降,到12月份最低温度已接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;从图中可以看到,各处理之间的温

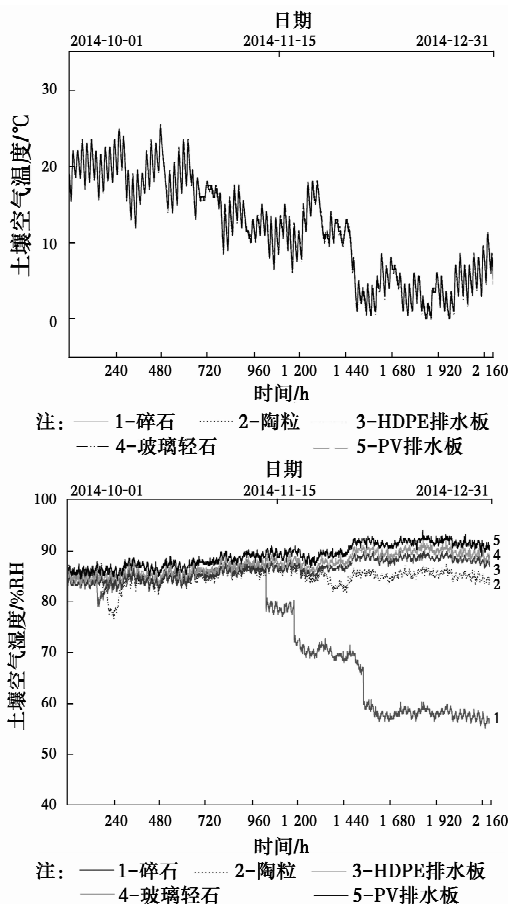


图4 不同排水材料处理土壤空气温、湿度的时动态变化(2014)

Fig. 4 Hourly dynamic changes of soil air temperature and soil air relative humidity(RH) by different material treatments (2014)

度曲线几乎重叠在一起难以区分,说明差异不明显。

各材料处理之间土壤空气湿度(底部)的变化表现出不同的变化特征。在11月中旬以前,各处理之间土壤空气湿度变化形态基本一致,数据采集开始,第1组数据为 $85.5\%RH$ 、 $85.5\%RH$ 、 $83.8\%RH$ 、 $85.2\%RH$ 和 $86.2\%RH$ (按图中材料序号升序排列),最大和最小值相差不到 $3\%$ ,但随后则出现分化;其中,玻璃轻石和两个塑料排水板处理总体上保持相同的变化形态,曲线之间距离相差不大;而陶粒处理在11月底与前述3种材料处理曲线形态发生明显偏离,土壤空气湿度呈现下降趋势,从最高的 $88.6\%RH$ 下降到最低的 $76.6\%RH$ ;碎石处理则早在11月上旬即开始进入显著下降通道,随后在12月初趋于平稳,土壤空气湿度从最高的 $88.5\%RH$ 下降到最低的 $54.9\%RH$ 。

2014年天气记录表明,春夏两季雨水较多,直到9月底雨水天气逐步停止,此后一直到10月20日,无雨天为 $21\text{ d}$ ;10月高温平均值为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低温平均值为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;从10月底到11月底有雨天气为 $11\text{ d}$ ,以小雨为主,雨量不大;11月高温平均值为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低温平均值为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而进入12月份,仅在月初有3次小雨,截至31日则为长达 $21\text{ d}$ 的多云晴朗天气;12月高温平均值为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低温平均值为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2014年秋冬季雨水明显偏少,体现在图4中土壤空气湿度变化曲线却可以看到存在明显的滞后现象。

### 2.2 土壤空气温度和气温的日变化特征

如图5所示,为了解佛甲草轻型种植屋面的保温隔热性能,把各处理日平均土壤空气温度(底部)和当地同日大气温度的日最大值和最小值放在同一张图中,可以看到,土壤空气日最高温度绝大部分时间小于日最高气温,占比为 $92.4\%$ ;土壤空气日最低温度绝大部分时间要大于日最低气温,占比也为

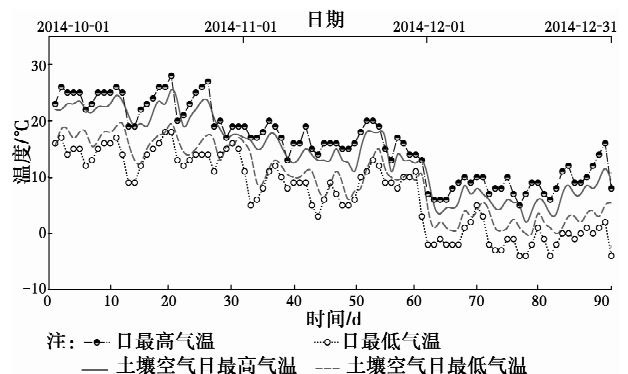


图5 不同排水材料处理平均土壤空气温度和气温的日动态变化(2014)

Fig. 5 Daily dynamic changes of average soil air temperature and air temperature by different material treatments (2014)



92.4%,其中小于日最低气温的7d均在最低气温 $\geq 5^\circ\text{C}$ 时。尤其在冬季(12月)最低气温低至 $-4^\circ\text{C}$ 的4d里,土壤空气最低温度也在 $0^\circ\text{C}$ 及以上,平均温差 $5.8^\circ\text{C}$ ;整个12月份,土壤空气最高温度比最高气温平均降低了 $2.6^\circ\text{C}$ ,而土壤空气最低温度比最低气温平均提高了 $3.4^\circ\text{C}$ 。

### 2.3 土壤温、湿度的月变化特征

如图6所示,不同排水材料处理的土壤温度月变化明显,总体变化曲线呈单峰形态,与当地全年季

节性气温变化趋势基本一致;最低值出现在12月,各处理平均土壤温度 $2.8^\circ\text{C}$ ,最低土壤温度 $1.1^\circ\text{C}$ ;最高值出现在8月,各处理平均土壤温度 $34.7^\circ\text{C}$ ,最高土壤温度 $40.1^\circ\text{C}$ 。土壤湿度总体除8月、9月外变化幅度不大;其中,8月湿度偏低可能和高温有关,而9月份则是出现旱情;图6中,9月土壤湿度显示有深浅两个部分,深色部分是9月21日测量值,此时已有近一个月没有有效降雨,加上土壤温度在 $25^\circ\text{C}$ 以上,导致土壤湿度出现急剧下降,平均土壤湿度仅为 $0.18\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ ;浅色部分是9月28日雨后第3天测量值,土壤平均湿度为 $0.32\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 。

为了更好地了解高温和干旱对不同排水材料处理下土壤温、湿度的具体影响,进一步分析8月和9月的土壤温、湿度数据。从表2可以看出,8月(高温)情况:土壤温度在各处理间差异不显著( $P>0.05$ );同时,其他数据显示,实验当日天气预报最高气温是 $37^\circ\text{C}$ ,而场地树荫下中午气温超过 $42^\circ\text{C}$ ;此时,土壤湿度在各处理之间的差异也不显著( $P>0.05$ )。9月(干旱)情况:土壤温度在各处理间差异不显著( $P>0.05$ ),比高温时平均低了约 $10^\circ\text{C}$ ;此时,土壤湿度在陶粒、玻璃轻石、HDPE排水板和PVC排水板处理之间差异不显著( $P>0.05$ ),但均显著大于碎石处理( $P<0.05$ ),土壤湿度平均提高了约35%。9月(雨后)情况:测量时间在雨后第3天(偏早),土壤温度和干旱时没有太大变化;而此时各处理中土壤湿度最小的是HDPE排水板且差异显著( $P<0.05$ );另外,从图6可以看出,大概有一半的月份属于这种情况。

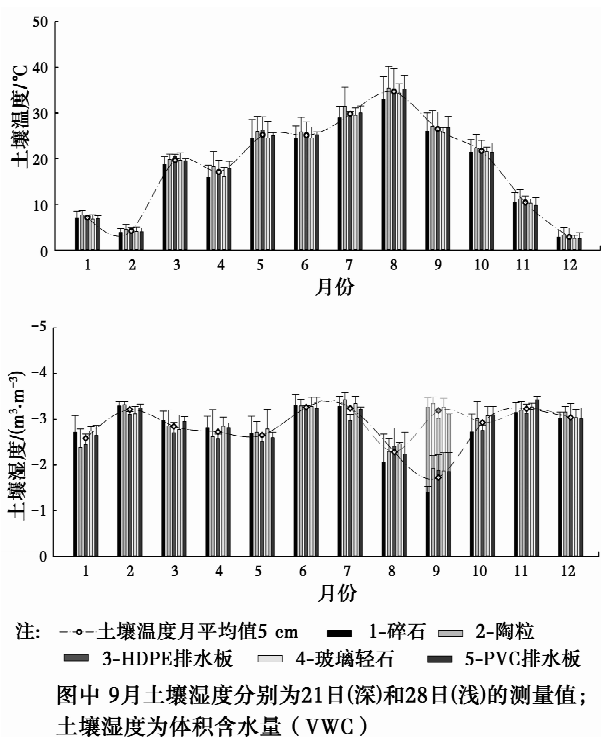


图6 不同排水材料处理土壤温、湿度月动态变化(2015)

Fig. 6 Monthly dynamic changes of soil temperature and soil moisture by different material treatments (2015)

表2 不同排水材料处理下土壤温、湿度在8月、9月的变化(2015)

Table 2 Changes of soil temperature and soil moisture in August and September by different material treatments (2015)

材料	8月(高温)		9月(干旱)		9月(雨后)	
	土壤温度/ $^\circ\text{C}$	土壤湿度/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	土壤温度/ $^\circ\text{C}$	土壤湿度/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	土壤温度/ $^\circ\text{C}$	土壤湿度/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$
1-碎石	$33.0\pm 5.0\text{a}$	$0.21\pm 0.06\text{a}$	$25.4\pm 3.4\text{a}$	$0.14\pm 0.01\text{b}$	$26.0\pm 4.0\text{a}$	$0.32\pm 0.02\text{a}$
2-陶粒	$35.5\pm 4.7\text{a}$	$0.23\pm 0.03\text{a}$	$26.0\pm 2.6\text{a}$	$0.19\pm 0.03\text{a}$	$27.1\pm 3.4\text{a}$	$0.33\pm 0.02\text{a}$
3-HDPE排水板	$35.3\pm 4.4\text{a}$	$0.24\pm 0.04\text{a}$	$25.9\pm 1.9\text{a}$	$0.19\pm 0.04\text{a}$	$26.9\pm 3.4\text{a}$	$0.30\pm 0.02\text{b}$
4-玻璃轻石	$34.4\pm 2.1\text{a}$	$0.25\pm 0.00\text{a}$	$25.6\pm 0.9\text{a}$	$0.19\pm 0.04\text{a}$	$25.7\pm 1.1\text{a}$	$0.32\pm 0.02\text{a}$
5-PVC排水板	$35.2\pm 3.1\text{a}$	$0.22\pm 0.05\text{a}$	$25.9\pm 1.7\text{a}$	$0.19\pm 0.04\text{a}$	$26.7\pm 2.5\text{a}$	$0.31\pm 0.00\text{a}$

注:差异显著性比较为不同材料处理间的分析结果;数据后字母不同代表差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.4 土壤温、湿度的季节变化特征

为了统计和分析方便,采用重复度量方差分析,把12个月的土壤温、湿度数据按四季降维处理,划

分原则:春季为3月—5月,夏季为6月—8月,秋季为9月—11月,冬季为12月—2月。

根据表3可以看到,不同排水材料处理的土壤

温度季节变化明显,最高值出现在夏季,各处理平均值为  $29.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低值出现在冬季,各处理平均值为  $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;4 个季节土壤温度在各处理间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。土壤湿度季节变化不明显,各处理间土壤湿度除秋季外,其他季节均无显著差异 ( $P>$

$0.05$ )。秋季:碎石处理的土壤湿度最小且显著小于其它材料 ( $P<0.05$ );其中,PVC 排水板、陶粒和玻璃轻石处理之间的土壤湿度均无显著差异 ( $P>0.05$ );而 HDPE 排水板虽然蓄水量大于陶粒,但该处理下的土壤湿度却比陶粒小。

表 3 不同排水材料处理土壤温、湿度季节变化(2015)

Table 3 Seasonal changes of soil temperature and soil moisture by different material treatments (2015)

季节	土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$					土壤湿度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$				
	1-碎石	2-陶粒	3-HDPE 排水板	4-玻璃 轻石	5-PVC 排水板	1-碎石	2-陶粒	3-HDPE 排水板	4-玻璃 轻石	5-PVC 排水板
春	$19.7 \pm 2.9a$	$21.3 \pm 2.6a$	$21.4 \pm 1.9a$	$20.1 \pm 2.5a$	$20.8 \pm 0.9a$	$0.28 \pm 0.03a$	$0.27 \pm 0.04a$	$0.26 \pm 0.02a$	$0.28 \pm 0.03a$	$0.28 \pm 0.01a$
夏	$28.8 \pm 3.4a$	$30.9 \pm 4.0a$	$30.0 \pm 2.7a$	$29.5 \pm 2.0a$	$30.2 \pm 1.8a$	$0.29 \pm 0.04a$	$0.30 \pm 0.02a$	$0.29 \pm 0.02a$	$0.30 \pm 0.01a$	$0.29 \pm 0.03a$
秋	$19.1 \pm 2.8a$	$19.8 \pm 2.6a$	$19.3 \pm 1.9a$	$19.1 \pm 1.0a$	$19.0 \pm 1.8a$	$0.23 \pm 0.03b$	$0.26 \pm 0.03a$	$0.25 \pm 0.02ab$	$0.26 \pm 0.02a$	$0.26 \pm 0.02a$
冬	$4.5 \pm 1.3a$	$5.1 \pm 1.2a$	$4.8 \pm 0.9a$	$4.4 \pm 0.9a$	$4.4 \pm 0.9a$	$0.30 \pm 0.02a$	$0.29 \pm 0.02a$	$0.28 \pm 0.02a$	$0.30 \pm 0.02a$	$0.30 \pm 0.02a$

注:表中秋季采用 9 月 21 日测量值;差异显著性比较为不同材料处理间的分析结果;数据后字母不同代表差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.5 土壤温度和土表温度的月变化特征

如图 7 所示,为了解佛甲草轻型种植屋面在白天的实际隔热效果,把各处理土壤温度(5 cm 深)和土表温度的平均值做进一步比较。可以看到全年土壤温度 8 月份最大,平均值为  $34.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而土表温度平均值为  $40.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;12 月份最小,土壤温度平均值为  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而土表温度平均值为  $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。无论四季变化,土表温度均明显大于土壤 5 cm 深处温度,且温差值在春夏季大于秋冬季,全年温差平均值为  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

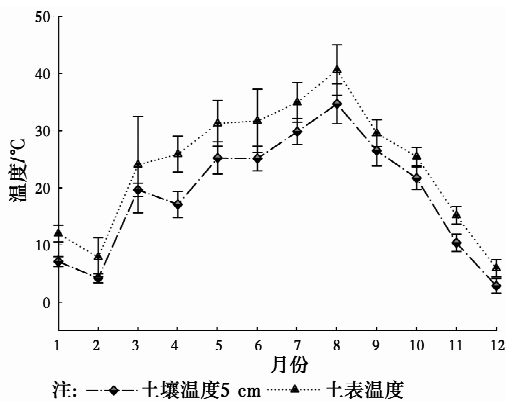


图 7 不同排水材料处理平均土壤温度和土表温度月动态变化(2015)

Fig. 7 Monthly dynamic changes of average soil temperature and soil surface temperature by different material treatments(2015)

## 3 讨论

### 3.1 不同排水材料对轻型种植屋面土壤湿环境的影响

天气记录表明,本地 2014 年春季雨水多,秋冬季雨水少,并分别在 10 月份和 12 月份出现长时

间无雨天气;特别以 12 月份最为严重,因为前两个月雨水也不多,对土壤含水量造成负累积效应。图 4 展示了 2014 年 10 月—12 月期间 5 种不同排水材料的种植屋面土壤在自然状态下土壤空气湿度(底部)的变化情况,这和表 1 中排水材料蓄水性能的比较结果基本一致。碎石作为排水材料几乎没有蓄水能力,由于排水层没有雨水存储,从降雨天气停止不久,其土壤空气湿度便开始进入下降趋势;而陶粒在和其它具有蓄水能力的材料比较中蓄水量最小,这在随后的旱情发展中也得到体现;蓄水量较大的玻璃轻石和 PVC、HDPE 排水板在此次旱情过程中由于有充足的雨水存储,土壤空气湿度变化相对一直比较平稳。由于试验检测的是土壤底部空气相对湿度,与能够及时反映降雨情况的土壤表层湿度相比,其变化具有滞后现象,而且 iButton 纽扣式温湿度记录仪安装在塑料管底部,雨量不大的降雨对其几乎没有影响,所以,碎石处理的土壤空气湿度一直在下降;而陶粒、玻璃轻石和 PVC、HDPE 排水板处理的土壤空气湿度在 11 月过后偶有起伏,直到 12 月中旬才开始出现下降趋势,土壤空气湿度变化滞后明显。同时,雨天记录尚无法对整个实验期间的有效降雨和无记录的短时降雨进行判断统计,所以,只能进行整体趋势性的比较。总体上,由当地秋冬季节雨水偏少所导致的不同排水材料处理土壤空气湿度变化,可以较好地反映出排水材料蓄水性能对种植屋面土壤湿环境的影响,但根据图 4 尚无法判断陶粒、玻璃轻石和 PVC、HDPE 排水板处理之间是否存在显著差异。

从 2015 年土壤湿度的季节变化特征看,排水材

料对种植屋面土壤湿度的影响,在一年中除了秋季之外的其他3个季节均没有显著差异(表3),这可能和南京地区雨水充沛以及测量时间的安排有关。秋季的统计分析结果与9月的干旱有很大关系,排水材料的蓄水性能优势才得以体现,使得4种具有蓄水能力的排水材料处理土壤湿度均显著大于碎石处理的土壤( $P < 0.05$ ),表现出较好的抗旱潜力;所不同的是,HDPE排水板处理的土壤湿度要小于PVC排水板、玻璃轻石和陶粒处理。另外,对9月干旱期间土壤湿度的统计分析表明,虽然玻璃轻石、陶粒和PVC、HDPE排水板之间蓄水量大小不一,但处理之间的土壤湿度均无显著差异( $P > 0.05$ ),显著差异仅仅表现在他们与没有蓄水能力的碎石之间。同时,通过表1和表2的数据对比可以看到,不同排水材料的蓄水性能和土壤湿度并不是一一对应,其中PVC排水板的蓄水量是陶粒的2倍左右,但统计分析结果表明它们之间的土壤湿度没有显著差异( $P > 0.05$ )。这说明不同排水材料对上层土壤湿度的影响机制相对(自然土壤)比较复杂,其补水过程需要进一步研究。

4种具有蓄水能力的排水材料,在9月干旱时土壤湿度没有显著差异,但一年中有一半的月份(包括9月28日雨后第3天)HDPE排水板处理的土壤湿度均明显小于其他材料(表2、图6),表3的统计也有类似的结果。通过对两种塑料排水板板面孔洞面积的计算,发现这可能与材料的排水性能指标(通水量)有关。从图1可以看出,HDPE排水板的孔洞面积要明显大于PVC排水板,其通水面积约占板总面积的33%,而PVC排水板只占1%左右(表1),所以,前者竖向通水量要远远大于后者以及其他材料;也有实验表明<sup>[23]</sup>,此类塑料排水板的通水量比颗粒状的碎石要高出很多。在雨后初期,HDPE排水板的土壤湿度由于排水迅速,上层土壤湿度就要小于其他材料(表2),这也导致9月—11月的秋季土壤湿度在统计分析中其要略小于其他3种具有蓄水能力的排水材料。HDPE排水板处理的土壤湿度在其它季节没有类似表现,可能与测量时间有关(有些月份在雨后第5天),使得各材料处理在不同月份有不同的表现,导致在重复度量方差分析时差异不显著。同时,HDPE排水板处理的以上性能也没有在图4土壤空气湿度的动态变化中予以体现,这可能与雨后初期各处理土壤湿度均较大有关。

以上结果表明,在两场降雨之间,不同排水材料对土壤湿度的影响体现在其自身同时具有的排水和蓄水性能谁在发挥主导作用;并会随着降雨间隔时

间长短发生变化,间隔时间短则排水性能占主导;间隔时间长则蓄水性能占主导;期间排、蓄水性能所起作用会在某一时间点发生转换,而在两次转换之间的大部分时间,土壤湿度则会趋同。由于土壤湿度测量时间并不固定在雨后的某一天,而且不同季节的土壤蒸发量也不一致,除了9月干旱,其他月份的测量可能大多处在两次转换之间或之前的雨后初期,所以,一年中除秋季(含9月)外,其他季节的土壤湿度所有材料处理之间均没有显著差异。

不同排水材料对上部土壤湿度的影响具有时间选择性,除干旱月份外,与材料蓄水性能的相关性不大。对于雨量充沛的季节,不能忽视材料排水性能的影响;对于夏末秋初温度较高时期出现的干旱,可能是由于材料总蓄水量有限,具有蓄水能力的4种排水材料之间对土壤湿度的影响没有显著差异( $P > 0.05$ )。所以,对于轻型种植屋面不能单纯以排水材料的蓄水量大小来评价其抵御干旱的能力,特别在干旱又高温的月份,有限的雨水存储可能使得他们之间没有本质区别。

### 3.2 不同排水材料对轻型种植屋面土壤热环境的影响

土壤表面在吸收太阳辐射能后,借分子传导的形式把热量传入深层,使下层增温;反过来,当土壤表面冷却后,温度下降到比深层温度低时,热量由深层输出<sup>[24]</sup>。从图4可以看出,从2014年10月初到12月底,各材料处理间种植屋面土壤空气温度变化趋势相同且差异不大,而表3针对4个季节土壤湿度的统计分析也表明,各处理之间没有显著差异( $P > 0.05$ )。这表明,土壤温度没有受到不同排水材料处理的影响。根据之前的讨论结果,种植屋面土壤湿度在干旱、雨后和秋季均受到不同排水材料的显著影响( $P < 0.05$ );由于水的比热容较大,在接受相同太阳辐射情况下,通常土壤湿度越大温度就会越低,但这并没有体现在实验中。不同材料处理下的土壤温度没有呈现和土壤湿度对应的有规律变化。究其原因,可能是影响土壤温度的还有其他因素,比如,陶粒和玻璃轻石曾广泛用作建筑的保温材料<sup>[25-26]</sup>,这样就在统计学分析时对土壤温度变化规律造成了干扰。

另外,从图5可以看出,在2014年10月—12月,从秋季到冬季的转换过程中,把不同材料处理的平均土壤空气温度日最高值(日最低值)与当地大气温度进行对应比较可以发现,它们之间变化差异明显。土壤空气日最高温度绝大部分时间小于日最高气温,土壤空气日最低温度绝大部分时间要高于日

最低气温,表明佛甲草轻型种植屋面在秋冬季节白天某个时间段具有隔热作用,而在夜间某个时间段具有保温作用,特别体现在日最低气温小于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,变化趋势为气温越低保温效果越明显。这可能是由于种植屋面在白天吸收太阳辐射能、晚上释放热量所导致;实际上,由于种植屋面整体上是具有生物学特征的复合体,其热过程伴随着植物的光合、蒸腾作用,土壤微生物的分解转化作用以及土壤水分的积蓄和蒸发等,所以,在秋冬季节与建筑屋面绝热材料的热工性能表现有着很大不同,也与种植屋面在夏季夜间的热工性能表现有所不同<sup>[27]</sup>。虽然种植屋面(室内自然状态)相对降低了冬季白天室内最高温度,但由于其可以使冬季夜间室内的最低温度相对得以提高而起到削峰填谷的效果,总体来看,在冬季夜间发挥保温的积极作用大于白天隔热的消极作用。

为了进一步定量分析佛甲草轻型种植屋面隔热性能,在测量土壤温度(5 cm)的同时,测量了土表温度(图 7),可以看到,一年中温差值是变化的,说明其隔热性能不是一个固定值,这可能与土壤中水分含量和植物生长状态有关,也就可以解释为什么春夏季的温差值大于秋冬季;而从 2015 全年的平均温差看,在中午 11:00 左右土表温度比土壤温度高了约  $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再次表明佛甲草种植屋面在白天的隔热效果非常显著,有利于夏季制冷能耗的降低。

## 4 结论

1)轻型种植屋面(室内自然状态)土壤及土壤底部空气温度没有受到不同排水材料蓄水性能的影响。对土壤温度和土表温度的温差分析表明,轻型种植屋面在全年白天具有隔热作用,且大小随季节而变化;另外,对土壤底部空气温度和气温的对比分析表明,轻型种植屋面在冬季白天具有隔热作用,夜间则具有保温作用;综合分析显示,种植屋面的热工性能存在季节性和日内差异。

2)轻型种植屋面土壤湿度在少雨季节受到不同排水材料的显著影响,而在雨量充沛的季节差异不显著;同时,土壤底部空气湿度也表现出相类似的变化趋势。在干旱月份,与碎石处理相比,具有蓄水能力的 4 种排水材料(陶粒、玻璃轻石、HDPE 和 PVC 排水板)有明显的抗旱优势,平均土壤湿度约提高了 35%,但这 4 种材料的蓄水量大小对处理之间的土壤湿度没有显著影响。另外,材料的排水性能对土壤湿度有显著影响,通水量大的材料在雨后初期土壤湿度显著小于其他材料。

3)轻型种植屋面排水材料的蓄水性能实效性得到初步验证。由于排水材料不同的物理特性以及给上层土壤的补水机制不同于自然土壤,加上有限的总蓄水量和排水性能的影响,轻型种植屋面土壤热湿环境的变化不完全由排水材料蓄水量大小决定。

### 参考文献:

- [1] OWEN T W, CARLSON T N, GILLIE R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(9): 1663-1681.
- [2] 曹丽琴, 张良培, 李平湘, 等. 城市下垫面覆盖类型变化对热岛效应影响的模拟研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008, 33(12): 1229-1232.  
CAO L Q, ZHANG L P, LI P X, et al. Simulation study of influence of change of land surface types on urban heat island [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1229-1232. (in Chinese)
- [3] BLANK L, VASL A, LEVY S, et al. Directions in green roof research: a bibliometric study [J]. *Building and Environment*, 2013, 66(8): 23-28.
- [4] NEKTARIOS P A, NTOULAS N, NYDRIOTI E, et al. Drought stress response of Sedum sediforme grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 181: 52-61.
- [5] KIM I H, HUH K Y, HUH M R. Cold tolerance assessment of Sedum species for shallow-extensive green roof system [J]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2010, 28(1): 22-30.
- [6] MONTERUSSO M A, ROWE D B, RUGH C L. Establishment and persistence of Sedum spp. and native taxa for green roof applications [J]. *Hortscience*, 2005, 40(2): 391-396.
- [7] SUSCA T, GAFFIN S R, DELL'OSSO G R. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8): 2119-2126.
- [8] BUTLER C, ORIANI C M. Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1796-1803.
- [9] 杨真静, 唐鸣放, 郑澍奎. 粗放型屋顶绿化隔热效果分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(3): 124-128.  
YANG Z J, TANG M F, ZHENG S K. Analysis on thermal insulation characteristics of extensive green roofs [J]. *Journal of Civil, Architectural &*

- Environmental Engineering, 2012, 34(3): 124-128. (in Chinese)
- [10] 张华, 李茂, 张沅, 等. 简单屋顶绿化的滞蓄特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 135-141. ZHANG H, LI M, ZHANG F, et al. Rainwater retention features of extensive green roof [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(4): 135-141. (in Chinese)
- [11] VILLARREAL E L. Runoff detention effect of a Sedum green-roof [J]. Nordic Hydrology, 2007, 38(1): 99-105.
- [12] 高伟平, 熊雪, 周禾. 草坪生态系统中碳汇与碳源的研究进展[J]. 草业科学, 2012, 29(5): 717-723. GAO W P, XIONG X, ZHOU H. Research progress on carbon sinks and carbon sources in the turfgrass ecosystem [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(5): 717-723. (in Chinese)
- [13] MACIVOR J S, RUTTAN A, SALEHI B. Exotics on exotics: Pollen analysis of urban bees visiting Sedum on a green roof [J]. Urban Ecosystems, 2015, 18(2): 419-430.
- [14] RUMBLE H, GANGE A C. Soil microarthropod community dynamics in extensive green roofs [J]. Ecological Engineering, 2013, 57: 197-204.
- [15] SEMPEL F, GORBACHEVSKAYA O, MEWIS I, et al. Fine dust binding potential of extensive roof top greening systems compared to roof gravel cover [J]. Gesunde Pflanzen, 2013, 65(3): 113-118.
- [16] TAN C L, TAN P Y, WONG N H, et al. Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance [J]. Energy and Buildings, 2017, 152: 830-842.
- [17] SAVI T, ANDRI S, NARDINI A. Impact of different green roof layering on plant water status and drought survival [J]. Ecological Engineering, 2013, 57: 188-196.
- [18] QIN H, PENG Y, TANG Q, et al. A Hydrus model for irrigation management of green roofs with a water storage layer [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 399-408.
- [19] VESUVIANO G, STOVIN V. A generic hydrological model for a green roof drainage layer [J]. Water Science and Technology, 2013, 68(4): 769-775.
- [20] JIM C Y, TSANG S W. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(6): 1341-1350.
- [21] 王沛永, 张媛. 人工架空基盘绿化中蓄排水层的设计研究[J]. 中国园林, 2015, 31(11): 13-17. WANG P Y, ZHANG Y. Discussion on the design of water storage and drainage sheaf on the green roof platet [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(11): 13-17. (in Chinese)
- [22] 俞伟, 关庆伟. 种植屋面5种不同排蓄水材料性能分析[J]. 中国城市林业, 2014, 12(4): 18-22. YU W, GUAN Q W. Performance analysis of five different water drainage and retaining materials for green roof [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2014, 12(4): 18-22. (in Chinese)
- [23] 张鹏程. 塑料防护排水板纵向通水能力测试技术研究[J]. 水利建设与管理, 2014, 34(5): 33-36. ZHANG P C. Study of vertical water flux capacity testing technology in plastic protective drainage board [J]. Water Resources Development & Management, 2014, 34(5): 33-36. (in Chinese)
- [24] 周邦社, 杨新兵. 植被和坡向对土壤温度与土壤热通量变化的影响[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(2): 80-85. ZHOU B S, YANG X B. Effect of vegetation and slope on soil temperature and soil heat flux [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2011, 34(2): 80-85. (in Chinese)
- [25] 卢光全. 轻质陶粒混凝土在屋面保温隔热中的应用[J]. 新型建筑材料, 2008, 35(11): 52-53. LU G Q. Application of light weight ceramsite concrete to roof thermal insulation [J]. New Building Materials, 2008, 35(11): 52-53. (in Chinese)
- [26] 谷倩, 舒松, 柯杨, 等. 玻璃轻石混凝土力学性能及保温性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(2): 92-95. GU Q, SHU S, KE Y, et al. Experimental study on mechanical performance and insulation property of glass pumice concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(2): 92-95. (in Chinese)
- [27] 唐鸣放, 郑澍奎, 杨真静. 屋顶绿化节能热工评价[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 87-90. TANG M F, ZHENG S K, YANG Z J. Thermal performance and energy analysis of green roof [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(2): 87-90. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)