

# 不同铺装材料地面停车场的热效应

孙永康, 刘寒晓, 张艳, 史常青, 赵廷宁

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 地面停车场作为城市重要的下垫面, 其铺装选材影响着城市生态环境。通过对沥青、水泥、混凝土地砖、植草格 4 种地面停车场常用铺装材料的地表温度、气温、太阳直接辐射进行了连续 12 个月的观测, 系统研究了 4 种铺装材料地表温度和气温的变化特征及影响因素, 并进行了 4 种铺装材料地表温度与气象因子的相关性分析, 旨在为地面停车场铺装选材提供热效应方面的参考依据。结果表明: (1) 4 种铺装材料对地面停车场地表温度的影响由大到小的次序为: 沥青 > 混凝土地砖 > 水泥 > 植草格; (2) 气温和太阳直接辐射与地面停车场地表温度呈显著正相关, 其中气温起主导作用; (3) 建立了各因子线性回归模型, 可利用该模型计算地表实时温度, 为气象服务提供更好的数据理论支持。

**关键词:** 环境监测; 热效应; 地表温度; 地面停车场; 铺装材料

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0144-05

中图分类号: P423.3

## Thermal Effects of Ground Parking Lot Covered with Different Surface Materials

SUN Yong-kang, LIU Han-xiao, ZHANG Yan, SHI Chang-qing, ZHAO Ting-ning

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Selection of covering materials on ground parking lot, as an important urban underlying surface, affects urban ecological environment. The study aimed at providing reference on the heat respect for the selection of ground parking lot's surface material. Based on the observed 12-month data of surface temperature, air temperature and direct solar radiation for four frequently-used surface materials, i. e., asphalt, cement, concrete ground brick and grass brick, the variation characteristics of surface and air temperature and their influencing factors were analyzed, and the analysis of the correlation between surface temperature and meteorological factors was made. Results show that: (1) The covering materials, in order of decreasing temperature, were asphalt, concrete ground brick, cement and grass brick. (2) The surface temperature had positive correlations with air temperature and direct solar radiation, of which air temperature makes more contribution. (3) Linear regression model about meteorological factors was established to provide a better theoretical support for the service of meteorology. The model can be used to calculate real time surface temperature.

**Keywords:** environmental monitor; heat effect; land surface temperature; ground parking lot; covering material

热效应即热岛效应, 是一种城市内部气温比周边郊区气温相对较高的现象。城市热岛效应可以导致城区气压较低, 出现气流的辐合, 导致污染物滞留, 北京等地区出现的重度 PM<sub>2.5</sub> 污染就和城市热岛效应有很大的关系。根据 Bass 等<sup>[1]</sup> 研究, 热效应的发生是由于屋顶和人行道这样的黑暗面吸收了更多的太阳辐射, 并以长波或热的形式辐射出去引起的。城市土地利用或覆盖类型的变化会改变地表温度的空间

分布<sup>[2]</sup>。不同的城市下垫面地物类型其地表温度差异明显, 下垫面性质的不同, 对热效应有重要的影响<sup>[3]</sup>。Oke<sup>[4]</sup> 曾通过调查半径为 2 km 的各街道下垫面所占面积的百分比来研究温哥华城市的显热通量, 发现导致热效应的重要因素之一是城区内各种不透水面积所占比例。有学者利用遥感技术反演区域状况发现区域范围内下垫面不同, 热效应程度不同<sup>[5-7]</sup>。还有学者利用下垫面温度的测量结合气象因子(气

收稿日期: 2013-06-29

修回日期: 2013-09-29

资助项目: 林业公益性行业科研专项“建设工程损毁林地植被修复关键技术研究及示范”(200904030); 北京林业大学 2012—2013 年度北京市级大学生创新训练计划项目“铺装材料对地面停车场热效应的影响”(121002253)

作者简介: 孙永康(1992—), 男(汉族), 河北省廊坊市人, 学士, 研究方向为工程绿化方向。E-mail: 302648963@qq.com。

通信作者: 史常青(1969—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 讲师, 主要从事林业生态工程方向研究。E-mail: scqbj@126.com。

温、湿度、反照率)的观测,发现了不同下垫面类型对热效应的贡献率不同<sup>[8-11]</sup>。

随着城镇化速度加快,城市交通工具数量迅速增加,与此同时地面停车场数量也不断增加<sup>[12]</sup>,已经成为城市主要下垫面之一。地面停车场作为城市重要的下垫面,其铺装材料的不同可能对地表温度变化、地面辐射产生诸多影响,从而影响环境变化,所以地面停车场铺装材料对热效应的影响不容忽视。目前对地面停车场生态改善的研究主要集中在绿化模式和布局规划方面<sup>[13]</sup>,对铺装材料的研究甚少。地面停车场的铺装材料有很多种,大致分为沥青、透水性沥青、水泥、花砖、碎石、混凝土、植草格等<sup>[14]</sup>。各种材料在地面停车场铺装上均有使用,但是铺装材料对地面停车场的热效应影响程度的大小,哪种材料便于铺装且经济节约,这些问题都亟待解决。本研究以地面停车场的沥青、混凝土地砖、水泥、植草格 4 种铺装材料为研究对象,以地表温度作为衡量铺装材料对停车场热效应影响程度的指标,根据连续观测 12 个月的数据资料,系统研究分析了 4 种铺装材料地表温度的变化特征及其与气象因子的相关性,为今后地面停车场铺装选材提供了可靠的热效应参考依据。通过建立多元线性回归模型,可为气象服务提供数据理论支持<sup>[15]</sup>。

## 1 研究区概况

实验地位于北京市清华大学清华美院地面停车场,地理坐标为  $39^{\circ}59'54.00''N$ ,  $116^{\circ}19'47.73''E$ ,属温带湿润季风气候区,冬季寒冷干燥,盛行西北风,夏季高温多雨,盛行东南风。年均气温  $12.5^{\circ}C$ ,1 月平均气温  $-4.4^{\circ}C$ ,极端最低气温为  $-21.7^{\circ}C$ ,7 月平均气温为  $25.8^{\circ}C$ ,最高气温为  $41.6^{\circ}C$ ,年平均降水量  $628.9\text{ mm}$ ,主要集中在夏季的 6—8 月,降水量为  $465.1\text{ mm}$ ,占全年降水的 70%;冬季的 12 至翌年 2 月降水量最少,仅占 1%。

遵循距离近、面积大、无遮挡的原则选取了 4 种不同铺装材料(沥青、混凝土地砖、水泥、植草格)为研究对象,其中沥青地面采用不透水沥青;混凝土地砖地面采用灰色不透水混凝土地面砖;水泥地面采用硅酸盐水泥砂浆;植草格地面所用地砖为灰色不透水混凝土地面砖,其植草面积占总面积的 44.2%。

## 2 研究方法

### 2.1 观测方法

实验观测时段为 2012 年 6 月至 2013 年 5 月,日

观测时间为 07:00—17:00,观测间隔为 30 min。测量要素有地表温度、反射辐射、散射辐射、直接辐射、气温、湿度。具体方法为使用 FLIRI 7 手持红外热像仪对 4 种铺装材料地表进行垂直拍照,拍照高度为 1 m,获取拍照面积  $1\text{ m}^2$  内铺装材料的最高、最低和平均温度。在监测的同时,使用 TBQ-2L 辐射表获取地面反射辐射和散射辐射,使用 TBS-2LR 型太阳直接辐射表测取太阳直接辐射。使用 Vantage Pro 2 全自动气象站(高度 1.5 m)测取气温和湿度。

### 2.2 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据处理和分析,绘制全年月平均和全年日平均温度变化图。采用 SPSS 17.0,以全年地表温度和气象因子数据为基础进行 Pearson 相关性分析,运用多元线性回归法,对各铺装材料地表温度及气温、太阳直接辐射数据进行拟合,得到各铺装材料地表温度随气象因子变化的多元线性回归模型。数据分析的时间段划分为夏半年(5—10 月)和冬半年(11 月—翌年 4 月)。

## 3 结果与分析

### 3.1 4 种铺装材料地表温度对比分析

对 12 个月的地表温度与气温数据进行整理,并对全年月平均温度、全年日平均温度作对比分析(图 1)。

3.1.1 全年月平均温度 由图 1a 可知,4 种铺装材料地表温度年变化特征与气温一致,均呈单峰型特征,地表温度和气温的全年最高温度均出现在 6 月,最低温度出现在 12 月,说明地表温度和气温具有一定的相关性,二者相互影响。沥青、混凝土地砖、水泥、植草格 4 种铺装材料地表温度由高到低的次序为:沥青>混凝土地砖>水泥>植草格,分别比气温高  $9.0, 9.6, 7.5, 6.1^{\circ}C$ (表 1),说明 4 种铺装材料地表温度明显高于气温。依据热力学第二定律,具有较高温度的地表通过热交换作用会将热量传递给大气,说明地面对气温有加热作用<sup>[8]</sup>。

3.1.2 全年日平均温度 由图 1b 可知,4 种铺装材料地表温度均呈单峰型变化特征,与气温变化趋势一致。在 13:45 这一时间,地表温度和气温到达最高点。从夏半年(图 1c)来看,4 种铺装材料地表温度由高到低的次序为:沥青>混凝土地砖>水泥>植草格,分别比气温高  $13.9, 11.7, 9.7, 6.8^{\circ}C$ (表 1),说明夏半年地表对气温的加热作用显著,气温受地表温度的影响较大。从冬半年(图 1d)来看,气温基本稳定,9:15 之后地表温度逐渐高于气温。沥青、混凝土地砖、水泥、植草格 4 种铺装材料地表温度与气温相

比,分别比气温高 4.1,3.7,5.4,5.5 °C(表 1),说明冬半年地表对气温的加热作用大大降低,相对于夏半年,地表对气温只有微弱的加热作用,沥青和混凝土地砖地表温度甚至低于气温。

因此铺装材料地表温度全年或夏半年的比较能较好地反映 4 种铺装材料对停车场热效应贡献程度的大小,4 种铺装材料地表温度由高到低的次序为沥青>混凝土地砖>水泥>植草格。

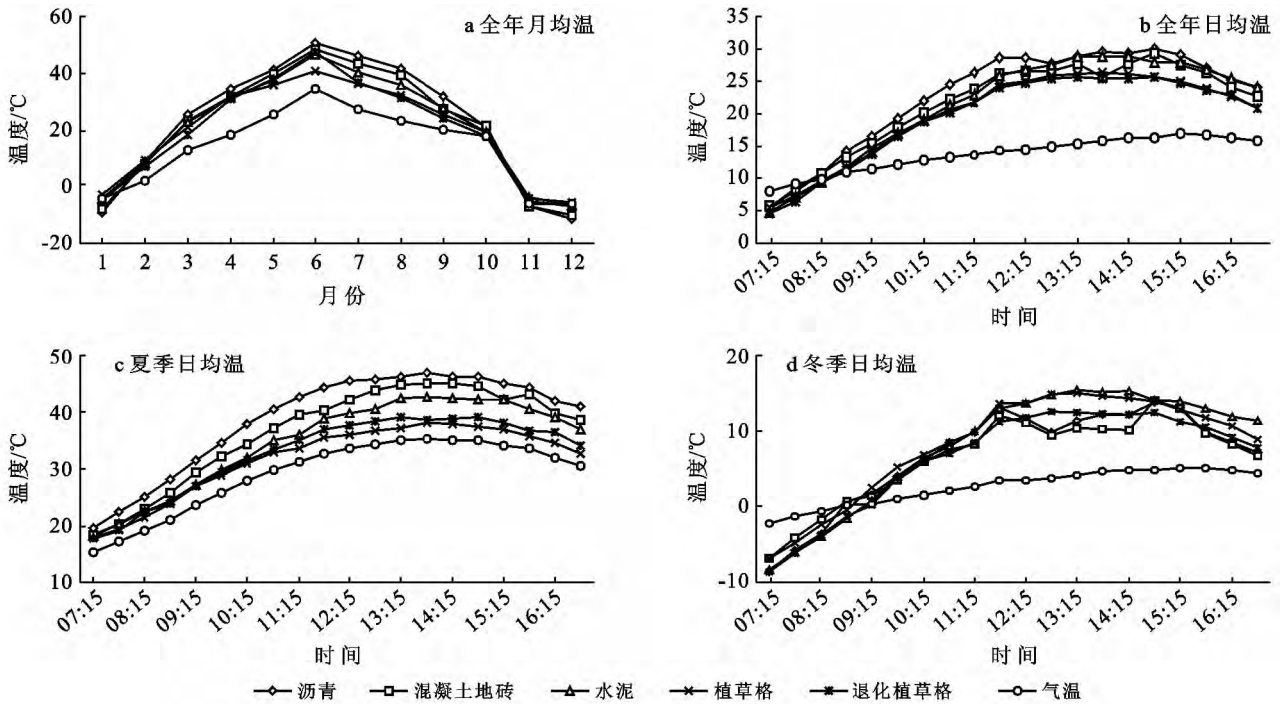


图 1 4 种铺装材料地表温度与气温全年月平均、全年日平均、夏半年日平均、冬半年日平均温度变化

表 1 4 种铺装材料地表温度和地面停车场的气温

项目	沥青	混凝土地砖	水泥	植草格	气温
全年日平均温度	22.8	21.4	21.3	19.9	13.8
夏半年日平均温度	38.8	36.6	34.6	31.7	24.9
冬半年日平均温度	6.7	6.3	8.0	8.1	2.6
全年最高温度	57.9	56.0	54.2	47.1	40.0
夏半年最高温度	57.9	56.0	54.2	47.1	40.0
冬半年最高温度	44.8	43.2	40.3	39.7	22.0

### 3.2 4 种铺装材料地表温度与气象因子相关性分析

对全年各月获取的数据进行 Pearson 相关性分析,得到冬半年、夏半年、及全年总体不同铺装材料地表温度与各项气象因子的相关性结果如表 2 所示。

3.2.1 与气温的相关性 由表 2 可知,从全年水平看,4 种铺装材料地表温度与气温呈极显著相关。各铺装材料地表温度与气温的相关系数由大到小分别为:水泥 0.957>混凝土地砖 0.937>植草格 0.929>沥青 0.915。各铺装材料夏半年与气温的相关性显著高于冬半年,说明在夏半年能较好地反映 4 种铺装材料地表温度与气温的相关性,夏半年地表温度与气温的相关性排序为:水泥>混凝土地砖>植草格>沥青。

表 2 不同铺装材料地表温度与各项气候指标的相关性分析

时间	数据	沥青	水泥	混凝土地砖	植草格
冬半年	气温	0.888**	0.935**	0.867**	0.911**
	直接辐射	0.194	0.036	0.127	0.136
夏半年	气温	0.912**	0.951**	0.934**	0.922**
	直接辐射	0.737**	0.662**	0.693**	0.733**
全年	气温	0.915**	0.957**	0.937**	0.929**
	直接辐射	0.599**	0.490*	0.544*	0.572**

注:\*\*在 0.01 水平(双侧)上极显著相关;\*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.2.2 与直接辐射的相关性 由表 2 可知,从全年水平看,4 种铺装材料地表温度与直接辐射的相关性

低于地表温度与气温相关性的显著程度,其相关系数由大到小分别为:沥青 $0.599 >$ 植草格 $0.572 >$ 混凝土地砖 $0.544 >$ 水泥 $0.490$ 。夏半年的相关性最高,呈极显著相关,全年相关性次之,呈显著相关,冬半年相关性最弱,说明 4 种铺装材料地表温度夏半年的数据能较好地反映与直接辐射的相关性,夏半年排序为沥青 $>$ 植草格 $>$ 混凝土地砖 $>$ 水泥。

### 3.3 4 种铺装材料地表温度与气象因子的线性回归模型

运用全年所取得数据,对各铺装材料地表温度数据进行拟合(表 3),得到各铺装材料地表温度随气象因子变化的回归模型,通过  $R^2$  和  $P$  值可以看出模型中各项数据拟合程度较高,所有的方程均通过了置信度为 0.99 的  $F$  检验。根据夏半年和冬半年相关性指数差异,建立模型时应选择适当的气象因子,夏半年选择的相关因子为气温( $T_a$ )和直接辐射( $Q_r$ );冬半年为气温;全年为气温和直接辐射。

表 3 不同铺装材料地表温度变化模型

项目	线性回归模型	$R^2$	$P$
全年	$T_1 = 2.203T_a + 2.840Q_r - 25.708$	0.982	0.00
	$T_2 = 2.532T_a + 2.018Q_r - 25.364$	0.981	0.00
	$T_3 = 2.090T_a + 2.146Q_r - 21.070$	0.978	0.00
	$T_4 = 2.037T_a + 2.345Q_r - 22.908$	0.984	0.00
夏半年	$T_1 = 2.044T_a + 4.557Q_r - 44.917$	0.967	0.00
	$T_2 = 2.099T_a + 2.974Q_r - 39.159$	0.974	0.00
	$T_3 = 2.159T_a + 3.749Q_r - 44.420$	0.967	0.00
	$T_4 = 1.529T_a + 3.248Q_r - 30.115$	0.978	0.00
冬半年	$T_1 = 2.197T_a + 4.480$	0.850	0.00
	$T_2 = 1.645T_a + 4.517$	0.884	0.00
	$T_3 = 1.958T_a + 3.758$	0.854	0.00
	$T_4 = 1.960T_a + 6.678$	0.847	0.00

注:  $T_1, T_2, T_3, T_4$  分别表示沥青、水泥、混凝土地砖、植草格 4 种铺装材料地表温度;  $T_a$  为气温;  $Q_r$  为直接辐射。

模型较好地反映了 4 种铺装材料地表温度与气象因子相关性分析中说明的地表温度与气温、直接辐射的关系。从全年看,水泥地表温度与气温的相关性最显著,表明在相同条件下水泥地表温度随着气温的改变而变化的程度最明显。从夏半年看,混凝土地砖地表温度与气温相关性最高,冬半年沥青地表温度与气温相关性最高,说明辐射对地表温度的变化有间接影响。植草格地表温度与气温的相关性明显低于其他 3 种材料,在相同条件下气温每升高  $1^\circ\text{C}$ ,植草格会比混凝土地砖少升高  $0.63^\circ\text{C}$ ,说明植物的水分蒸发和蒸腾对地表起到一定的降温作用<sup>[16]</sup>。

从全年和夏半年看,沥青地表温度与太阳直接辐

射的相关性明显高于其他 3 种铺装材料,所以在强太阳辐射地区不建议地面停车场使用沥青材料进行铺装。冬半年直接辐射和地表温度相关性不显著,所以在低温条件下气温是与地表温度最具相关性的因素。

## 4 讨论

地表与大气存在热交换作用,这种热交换作用分为两种,一种是潜热通量,即地表与大气间水分的热交换,另一种是显热通量,即地表与大气间通过湍流形式的热交换,两种热交换都受太阳辐射、气温、风速、湿度等气象要素的影响<sup>[17]</sup>。地面停车场下垫面组成复杂,包括混凝土、沥青、砖、花岗岩、草坪砖等各种不同的铺装材料<sup>[18]</sup>,各铺装材料地表温度与材料的比热容有关,即单位质量物体改变单位温度时的吸收或释放的内能<sup>[19]</sup>,相关系数反映了各铺装材料地表吸热能力的不同。但各铺装材料成分复杂,属于混合物,其比热容已不能准确算出,各铺装材料主要成分的比热容值的比较已不能代表各铺装材料地表温度的比较,且各铺装材料物理性质和铺装工艺的差异会导致铺装材料的比热变化和其与气温、太阳直接辐射等气象要素的相关性程度不同,从而影响地表与大气的热交换作用,进而对地面停车场的热效应产生不同的影响。

地面通过吸收太阳辐射增温,由于铺装材料物理性质的影响,每种铺装材料地面增温程度不同;当地表温度高于气温时,通过热交换作用,地表的热量传递给大气,对大气起到加热作用,反之起冷却作用<sup>[8]</sup>,由于各铺装材料增温程度不同,对大气的加热、冷却作用效果不一。研究发现 4 种铺装材料地表全年月均温度和全年日均温度都高于气温,说明地表对气温有加热作用,其中沥青最强,混凝土地砖、水泥次之,植草格最弱。通过相关性分析得出,气温与直接辐射是影响地表温度的重要因素,地表温度与两者呈显著正相关关系;不同铺装材料与两因素的相关性系数大小不同,反应了铺装材料的物理性质差异,正是这种差异导致了不同铺装材料对地面停车场热效应贡献程度的不同。

实验通过手持红外热像仪测定地表温度,改变了通过地温表测定地表温度的传统测定方式,测定数据更加准确,且可以通过红外照片分析各点温度及平均温度,保证了数据的稳定有效。

## 5 结论

(1) 4 种铺装材料对地面停车场热效应的影响由大到小为:沥青 $>$ 混凝土地砖 $>$ 水泥 $>$ 植草格,不透

水性铺装材料——沥青、混凝土地砖、水泥的热效应大于透水性铺装材料——植草格。因此,在选择地面停车场铺装材料时,建议首选透水性铺装材料,若选择不透水性材料,宜多使用水泥,减少沥青使用。

(2) Pearson 相关性分析结果显示,从全年看,气温与地表温度呈极显著相关,相关性程度由高到低为:水泥>混凝土地砖>植草格>沥青;直接辐射与地温呈显著相关,夏半年直接辐射的相关度较高,相关性影响程度由高到低为沥青>植草格>混凝土地砖>水泥。因此,在气温高、辐射强的地区尽量不要选择水泥和沥青。

(3) 建立了 4 种铺装材料地表温度与气温、直接辐射的多元线性回归模型,模型显示,水泥、混凝土地砖和沥青随着气温变化的变化程度较高,而植草格由于植物的水分蒸发和蒸腾作用随着气温的变化程度较低。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Bass B, Baskaran B. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas [M]. Ottawa: National Research Council, 2003.
- [2] 历华,曾永年,柳钦火. 基于遥感的长沙市城市热岛与土地利用/覆盖变化研究[J]. 国土资源遥感,2008,20(4): 47-52.
- [3] 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.
- [4] Oke T R. Boundary Layer Climate [M]. London: Methuen, 1987:252-302.
- [5] 刘宇,匡耀求,吴志峰,等. 不同土地利用类型对城市地表温度的影响[J]. 地理科学,2006,26(5):597-602.
- [6] 谢元礼,范熙伟,韩涛,等. 基于 TM 影像的兰州市地表温度反演及城市热岛效应分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(9):172-175.
- [7] 苏雅丽,张艳芳. 基于 Landsat TM/ETM+ 的西安市城市热岛效应时空演变[J]. 水土保持通报,2011,31(5): 230-234.
- [8] 刘霞,王春林,景元书,等. 4 种城市下垫面地表温度年变化特征及其模拟分析[J]. 热带气象学报,2011,27(3): 373-378.
- [9] 黄良美,黄海霞,项东云,等. 南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J]. 生态环境,2007,16(5): 1411-1420.
- [10] 白改成,时修礼. 同辐射条件下不同下垫面温度差异分析[J]. 气象与环境科学,2008,31(B9):122-124.
- [11] 王吉苹. 基于可持续发展减缓城市热岛效应的实验研究[J]. 水土保持通报,2013,33(3):100-103.
- [12] 杨建英,陶晓燕,赵廷宁. 停车场绿化与静态交通问题 [C]// 中国水土保持学会规划设计专业委员会 2009 年年会暨学术研讨会论文集,2009.
- [13] 赵明洁,王厚华. 绿化改造工程对城市热岛效应的影响 [J]. 环境工程,2009,27(S1):577-580.
- [14] 于洋. 基于光影分析的地面停车场绿化模式[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [15] 张菁,梁红,姜晓艳,等. 沈阳市夏季不同下垫面温度特征及其在气象服务中的应用[J]. 气象科学,2008,28(5):528-532.
- [16] 冉琼,张增祥,张国平,等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正[J]. 中国水土保持科学,2005,3(2):32-36.
- [17] 王修信,高凤飞,朱启疆,等. 城市公园绿地水热通量的环境影响因素定量分析[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(1): 64-69.
- [18] 杨义朋. 景观道路铺装的理论与实践探索研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [19] 陈德鹏,钱春香,王辉,等. 水泥基材料比热容测定及计算方法的研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(2): 127-131.