

透水砖铺装地面垫层结构对城市雨水入渗过程的影响

侯立柱¹ 冯绍元¹ 韩志文² 张书函³ 丁跃元³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市大兴区水务局, 北京 102600;
3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要 为了给透水砖铺装系统综合排水设计提供依据,建立了透水砖铺装地面物理模型,采用4种透水砖铺装结构形式(垫层由不同厚度的无砂混凝土、中砂、砂砾料组合而成),进行了模拟降雨条件下雨水入渗过程试验研究。结果表明:降雨过程中超渗的水流形成表层流,其水分延续入渗使地基土壤水分继续增加;4种处理在模拟降雨1 h,强度59.36 mm/h的情况下产流量均为0,下渗率的大小与垫层透水性程度呈正比,与土壤初始含水率呈反比;在模拟降雨2 h,强度59.36 mm/h的情况下(相当100年一遇2 h降雨量),透水砖铺装地面处理1(垫层结构自上而下为中砂10 cm、砂砾料20 cm),入渗效果最优,此时无地面产流。对于新建居民小区、道路、园林绿化等领域布置综合排水系统,以及那些现有排水系统超载严重,难以进行管网改建或改建代价过高的区域,用透水砖铺装地面取代不透水铺面是减少城市地面淹水频次和涝灾程度的良好途径之一。

关键词 透水砖铺装路(地)面;垫层;路基;人工降雨;水分入渗

中图分类号 TV 12; S 273.1; TU 991.114

文章编号 1007-4333(2006)04-0083-06

文献标识码 A

Experimental study on impacts of infiltration treated with porous pavement

Hou Lizhu¹, Feng Shaoyuan¹, Han Zhiwen², Zhang Shuhan³, Ding Yueyuan³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Daxing Water Resources Bureau, Beijing 102600, China; 3. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract Four available porous pavement systems were studied to evaluate their infiltration capabilities of precipitation. The experiments were conducted to simulate different kinds of porous pavements with different sub-base materials in each of catchments, and the discharge volumes from each cell were monitored. The relationship between rainfall intensity, outflow and outflow duration was analyzed. Physical models were established in the laboratory. Because of storage of sub-base, the infiltration forms subsurface flow in the porous concrete block paving and sub-base, which increase infiltration into subgrade after rainfall. The results showed that the runoff coefficients of all treatments were 0 under a rainfall rate of 59.36 mm/h, and the infiltration coefficient of porous pavement was in direct proportion with porosity and inverse proportion with soil moisture. In all treatments, the optimum thickness of the porous pavement is 36 cm that consists of a 6 cm porous surface course and a 30 cm sub-base (10 cm sands and 20 cm gravel). When rainfall rate is 59.36 mm/h, and the lasting time is 2 hours, the runoff coefficient of treatment 1 is 0. In condition of building new residential area, pavements, parks; and rebuilding former overage drainage system too cost, the porous pavement system is a substitute for different imporous surface.

Key words porous pavement; sub-base; subgrade; artificial rainfall; infiltration

城市区域屋面、混凝土及沥青路面等不透水下垫面面积的迅速增加,导致暴雨洪峰增加、地面积水

收稿日期: 2006-02-20

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0127);国家自然科学基金资助项目(50409013);北京市优秀人才培养专项经费资助项目(20041D0200201)

作者简介: 侯立柱,高级工程师,博士研究生,主要从事水资源与水环境方面的研究, E-mail: hou.lz2002@163.com; 冯绍元,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事水资源与水环境研究, E-mail: feshyu@263.net

及淹没损害^[172]。国际上通常使用透水沥青、透水性地砖以及类似我国园林中鹅卵石的材料等铺设透水性路面,增大路面的透水和透气性,使雨水及时渗入地下土壤,以削减暴雨洪峰,减少水土流失,涵养当地水源,改善区域生态环境^[3]。

Schluter 和 Chris 的研究结果表明,透水性铺装填充物的空隙率大小对停车场出口水流量影响很小,但是对径流洪峰削减作用显著^[4];Benedetto 采用透水性铺装促进下渗,解决了下雨导致的飞机场积水问题^[5]。透水砖路(地)面是透水性铺装的一种,可广泛应用于居民小区、道路、园林绿化等领域。我国许多学者在透水砖材料强度、透水系数等方面进行了研究^[67],但是针对透水砖铺装地面垫层结构形式对入渗和产流的影响,尤其是对于压实后透水砖铺装地基土壤入渗方面缺乏足够的研究,使已经铺装的透水砖地面的实际效果千差万别,难以真正起到减少地面积水、增加土壤入渗、削减洪峰流量的作用。

本研究选取北京市目前常见的几种垫层结构作为研究对象,对透水砖铺装地面结构的降雨入渗过程进行研究,旨在为城市雨水利用方案制定和透水

砖铺装地面推广应用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在北京市水利科学研究所雨洪利用中心试验场进行,采用人工降雨方式。试验槽长 3 m,宽 2 m,高 1 m,共 4 个。槽的一侧安装透明玻璃,以观测湿润锋;槽内铺装透水砖地面;槽底设排水板,开直径 1.0 cm 小孔,下设出水口,接直径 50 mm 排水管,监测收集渗透水量。人工降雨器放在钢架上,采用雨鸟 1800 系列散射喷头,MPR15EST 喷嘴 36 个,每个喷嘴的设计工作压力 0.1 MPa,流量 0.1 m³/h,喷洒控制范围 1.2 m × 4.0 m。模拟降雨器的降雨均匀度 0.905,4 组喷头开启时实际喷洒强度 59.36 mm/h,降雨强度通过控制喷头组合实现。

1.2 试验材料

1) 地基。地基土壤取自北京海淀区东北旺,基本物理参数见表 1。地基土壤压缩系数 < 0.102 MPa⁻¹,属低压缩性^[8],符合试验地基土壤要求;击实后土壤渗透系数 2.28 × 10⁻⁴ mm/s。

采用称重拌和法制备土样。按照地基土壤最优

表 1 地基土壤基本参数

Table 1 Physical analyses of subgrade soil

土壤类型	液限/ %	塑限/ %	塑性指数/ %	压缩系数/ MPa ⁻¹	压缩模量/ MPa	最大干密度/ (g/cm ³)	饱和含水率/ (cm ³ /cm ³)
中粉质壤土	28.8	15.5	13.3	0.069	23.613	1.77	0.399

体积含水率 0.236 cm³/cm³、压实度 0.9,利用自制夯实设备夯实压平,分层装入试验槽。装填过程中,采用环刀法分 5 层检测土壤原位干密度,确保达到筑路设计干密度 1.593 g/cm³。装填后检查深度、纵坡、横坡及边线,使其符合设计要求。

2) 垫层。单级配碎石粒径 5 ~ 10 mm;级配不良砂干密度 1.71 g/cm³,最大干密度 1.91 g/cm³,最小干密度 1.37 g/cm³,孔隙率 38%;砂砾料层和中砂层相对密度 0.70。无砂混凝土垫层铺设 72 h 后用直径 100 mm 岩芯钻取样,深度为垫层厚度,检测结果见表 2^[9-11]。

3) 面层。试验用透水砖规格 100 mm × 200 mm × 60 mm,抗压强度 44.3 MPa,有效孔隙率 7.45%,渗透系数 0.789 mm/s;面层地表坡度 1% ~ 2%。

1.3 试验处理

建立透水砖铺装地面物理模型,设计 4 种透水砖面层铺装处理,垫层结构见表 3。每个处理的地

表 2 无砂混凝土垫层基本参数

Table 2 Physical analyses of concrete lacking sand

厚度/ cm	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	渗透系数/ (mm/s)	孔隙率/ %
10	12.27	1.22	12.61	8.46
20	10.46	2.45	25.81	8.21

表 3 不同处理透水砖地面结构

Table 3 Typical cross-section of porous pavements

处理	地面结构
1	透水砖 6 cm + 中砂 10 cm + 砂砾料 20 cm + 中粉质壤土 64 cm
2	透水砖 6 cm + 无砂混凝土 10 cm + 中砂 5 cm + 砂砾料 15 cm + 中粉质壤土 64 cm
3	透水砖 6 cm + 中砂 5 cm + 砂砾料 15 cm + 中粉质壤土 74 cm
4	透水砖 6 cm + 无砂混凝土 20 cm + 中粉质壤土 74 cm

注:中砂部分起找平层作用,便于铺装透水砖。

基土壤中埋设 4 层 TDR 土壤水分测定探头, 每层 2 个, 水平间距 1 m, 取测量值的平均值作为各层土壤含水率。最上一层探头距垫层底面 10 cm, 以下各层间距均为 15 cm。

1.4 试验方法

为分析透水砖铺装地面不同垫层结构降雨产流

规律和地基土壤水分变化规律, 进行了 2 场不同雨强的降雨试验。用 6050X1 Trase 型 TDR 测定各处理降雨过程和降雨后不同深度土壤水分的动态变化, 记录不同透水砖铺装垫层地表产流的开始、结束时刻和产流量, 以及降水渗入土层流出的开始、结束时刻和排水量等(表 4)。

表 4 不同垫层结构降雨入渗产流排水试验结果

Table 4 Data of different treatments obtained from outflow monitoring

处理	降雨日期	降雨量 / mm	降雨历时	产流开始时刻	产流结束时刻	表面径流量 / mm	径流系数 / %	排水结束日期	排水开始时刻	排水结束时刻	排水量 / mm
1				15:47	15:49	0.000	25	0			0
2	2004-07-08	59.36	14:49—15:49	15:45	15:49	0.001	67	0			0
3						0	0			0	
4						0	0			0	
1								0	0	2004-08-06	12:35
2	2004-08-05	118.72	10:15—12:15	11:10	12:20	20.27	17	2004-08-07	12:35	8:00	14.81
3						0	0	2004-08-06	12:35	8:30	6.58
4						0	0	2004-08-07	12:35	8:30	8.04

注: 参考 GB14—87《室外排水设计规范》^[12]计算各次降雨量对应的降雨重现期, 118.72、59.36 mm 分别对应 100 年一遇 2 h、6 年一遇 1 h 降雨量; 排水指槽底渗流。

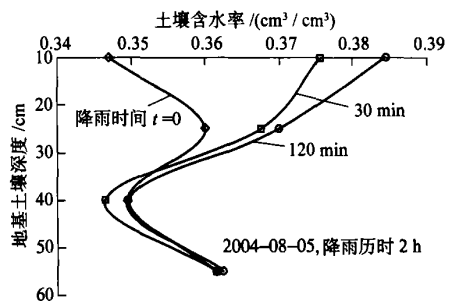
2 结果与分析

2.1 地基土壤水分随时间的动态变化

1) 降雨过程。对土壤表层流的研究结果^[13-14]表明, 当土壤质地有明显分层时, 容易满足表层流形成的条件。雨水渗入地面表层部分, 作横向流动后进入下级流道, 其流速较地面径流慢。表层流占总径流量的比值与流域地质条件有关。本研究结果与其类似, 透水砖铺装结构的面层、垫层部分具备产生表层流的条件。图 1 示出 2004-08-05 人工降雨过程中处理 3 的地基土壤水分动态(各处理结果类似, 此处仅选处理 3 进行讨论)。此次降雨前 15 d 有一次降雨过程, 降雨量 94.09 mm。

由图 1 可以看出, 地基土壤初始含水率较高。降雨过程中 0~40 cm 土层土壤水分增加, 0~25 cm 土层尤为显著。一方面透水砖铺装表层流的存在, 使雨水在地面积水消失后仍继续入渗地基土壤, 另一方面, 透水砖铺装结构地基土壤密度较大, 水分运移速度缓慢^[15]; 因此, 本次试验前的降雨带来的土壤水分没有完全从槽底部排出, 这也是地基土壤初始含水率较高的原因。

土壤含水率在垂直剖面上有明显的拐点(图 1), 即有明显的土壤水零通量面存在, 且随时间的推移, 零通量面的位置基本不变。这也是由于地基土壤密度较大, 土壤水入渗较慢, 虽然连续降雨条件下上层土壤水增加幅度较大, 但下层增加不显著的缘故。



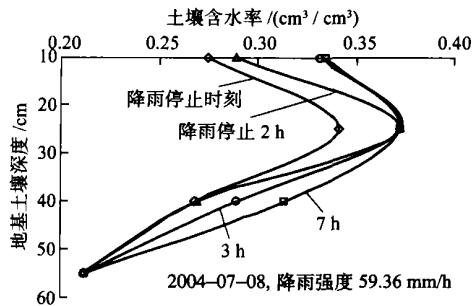
地面及垫层结构: 透水砖 6 cm + 中砂 5 cm + 砂砾料 15 cm + 中粉质壤土 74 cm

图 1 降雨过程透水砖铺装土壤剖面的水分动态变化

Fig. 1 Infiltration curves of subgrade in treatment 3

2) 降雨停止后。当供水停止, 地表积水因蒸发或入渗而耗尽时, 入渗过程就此结束, 然而地基土壤

内水分的向下移动仍需持续很长一段时间,此期间水分在土壤剖面内进行再分配。在入渗过程中,湿润到接近饱和程度的土层并没有保留全部水分,一部分水在重力与土壤水吸力梯度作用下继续向更深的土层运动(图2)。



地面及垫层结构:透水砖 6 cm + 无砂混凝土 10 cm + 中砂 5 cm + 砂砾料 15 cm + 中粉质壤土 64 cm

图2 人工降雨后的土壤水分再分布

Fig. 2 Soil moisture content profiles after artificial raining of subgrade in porous pavement system

从图2可以看出,供水停止后,随着时间的延续,0~25 cm 土层水分增加明显,3 h 后增加幅度减小;25 cm 以下土层含水率开始增加微小,随时间逐渐增大。另外,试验中还发现,随着时间的延长,湿润锋面的下移速度愈来愈小,且形状愈不明显。这是由于:a. 当原湿润土层水分减少,干土层水分增加后,2 土层间的吸力梯度相应减小,入渗期间比较明显的湿润锋形状在再分布过程中逐渐消散。b. 在透水砖铺装条件下,由于表层流的存在,入渗后土壤水分动态变化过程十分复杂,对于同一深度土壤,某一时刻前可能是吸水过程,该时刻后则是脱水过程。

3) 地基土壤水分动态分析。可以将透水砖铺装地面雨水入渗过程分为2个阶段:第1阶段为降雨过程中,由于透水砖表面粗糙,减缓了地表水流速,地面入渗增加,使垫层容蓄的雨量增加,同时延缓了地表积水的出现;第2阶段为降雨停止后,由于垫层的存在,下雨过程中超渗的水流形成垫层水库,即所谓“表层流”,其水分延续入渗使地基土壤水分继续增加。

2.2 不同初始含水率对入渗的影响

图3示出不同处理地基土壤10 cm深处(其他土层深度类似)土壤水分随时间的变化曲线。处理3的初始含水率最小,但上升最快,并达到最高,接近饱和含水率 $0.399 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$;处理4的地基土壤初始含水率最大,上升幅度最小。因此,当土壤初始含

水率较低时,可以将土壤水分的运移分为2个阶段:1) 含水率增加阶段。湿润锋推移到该层后,同时受到重力势和基质势的作用,土壤含水率增加迅速,但未达到饱和含水率,土壤水分处于稳定上升阶段。2) 含水率稳定不变阶段。当土壤水分接近饱和后,土层进入稳定入渗阶段,该土层的水流量进入稳定状态,入渗率达到稳渗率。这与 Bodman 对非透水砖铺装土壤初始含水率的研究结果^[16]类似,即在入渗初期,随着含水率的增高,土壤入渗速率减小;随着时间的延续,含水率对入渗的影响变小。

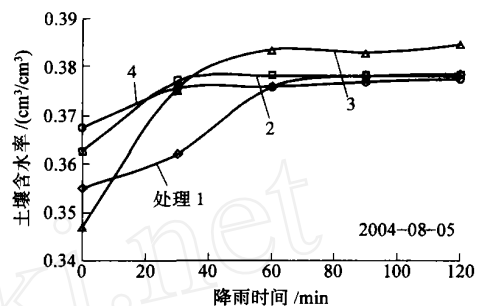


图3 不同处理地基土壤10 cm深处初始含水率对入渗的影响

Fig. 3 Effect between initial water content of subgrade and infiltration

试验中还发现,随着初始含水率的增大,初渗率变小,趋于稳定入渗率的时间变短;土壤越干燥,初始入渗速率越大,入渗稳定后土壤的含水率越高,原因是初始含水率越低,基质势梯度量值越大,入渗锋面的平均吸力愈大,需要较多水分进入较大充气孔隙以接近饱和。

2.3 不同垫层结构降雨后土壤水分动态分析

地基土壤10、25、40和55 cm处,4种处理的土壤含水率过程线存在较大区别,2004-07-08雨后土壤水分动态见图4。人工模拟降雨后1~2 d内,地基土壤10、25 cm处土壤含水率下降约5%,其中处理1含水率下降最为明显。地基土壤40、55 cm处含水率呈增大趋势,其中处理1水分上升最为明显,说明水分在往下运移;土壤40 cm处,4种处理土壤含水率均上升,但幅度不大;土壤55 cm处,雨后1~2 d,处理1和2土壤含水率增幅达13%,处理4缓慢上升4%,处理3土壤含水率先下降而后上升。

可看出雨后1~2 d土壤含水率变化快慢顺序为:处理2 < 处理4 < 处理3 < 处理1。处理2垫层上部为无砂混凝土,下层为松散的中砂和砂砾料,这

种封闭式的垫层,易于使下部垫层保有水分,而使地基土壤的入渗水分减少;处理 4 垫层为纯无砂混凝土,有效孔隙率比松散砂砾料小,不利于降水就地入渗,功能劣于处理 3 和 1;处理 1 的垫层为松散的砂砾料,有效孔隙率大,透水砖及其垫层的雨水入渗为

大孔隙流,孔隙流速大,导致其水头压力高,在降雨结束后仍有水分继续入渗地基土壤,故而处理 1 地基土壤 10、25 cm 处的土壤含水率雨后 1~2 d 降幅最大。

从图 4 可以看出,降雨后 4 种透水砖铺装处理

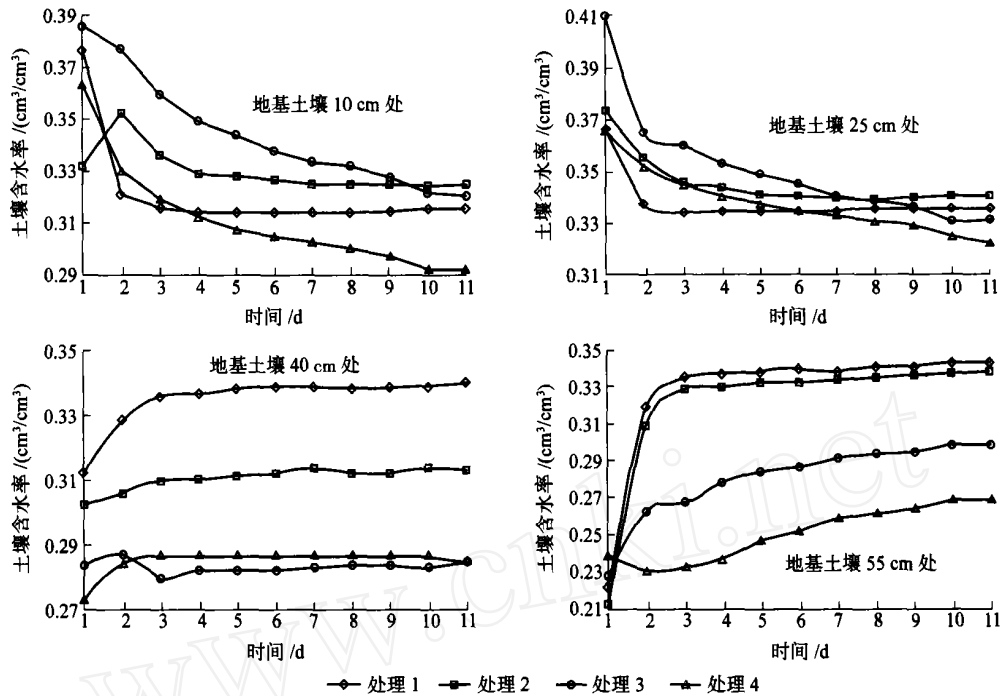


图 4 不同垫层结构雨后土壤水分动态分析

Fig. 4 Experimental subgrade moisture contents of porous pavement systems after one rain

中处理 1 土壤中水分向下运移最快,其垫层的水分疏干最快,使地基土壤孔隙对下场降雨水分入渗起到明显的腾空效果。

3 结论

1) 采用的 4 种透水砖铺装地面结构对降雨入渗均有明显的促进作用,各种垫层透水砖地面的径流系数比不透水砖地面均减小。降雨过程中超渗的水流形成表层流,其水分延续入渗使地基土壤水分继续增加。

2) 下渗率的大小与垫层透水性程度成正比,与土壤初始含水率成反比关系。在其他条件相同的情况下,垫层的空隙率越大透水地面的降雨径流量越小。

3) 比较透水砖铺装处理的入渗性能可知:处理 2 < 处理 4 < 处理 3 < 处理 1,具备松散性砂砾料垫层的透水砖铺装结构的入渗效果,优于无砂混凝土垫层铺装结构。在模拟降雨 2 h,强度 59.36 mm/h (相当于 100 年一遇 2 h 降雨量),前期降雨少的情

况下,透水砖铺装处理 1 (垫层结构自上而下为中砂 10 cm、砂砾料 20 cm) 的入渗效果最优,此时无地面产流。

对于新建居民小区、道路、园林绿化等区域的综合排水系统,以及那些现有排水系统超载严重而难以进行管网改建,或改建代价过高的区域,用透水砖铺装地面取代不透水铺面是减少城市地面淹水频次和涝灾程度的良好途径之一。

参 考 文 献

- [1] Trimble S W. Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed [J]. Science, 1997, 278 (21): 1442~1444
- [2] Nelson E J, Booth D B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed [J]. Journal of Hydrology, 2002, 264 (1~4): 51~68
- [3] Pratt C J. Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(5): 145~

- 155
- [4] Schluter W, Chris J. Modelling the outflow from a porous pavement [J]. *Urban Water*, 2002, 4(3):245-253
- [5] Benedetto A. A decision support system for the safety of airport runways: the case of heavy rainstorms[J]. *Transportation Research Part A*, 2002, 36:665-682
- [6] Yang J, Jiang GL. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(3):381-386
- [7] 王武祥. 透水性路面与透水性混凝土路面砖[J]. *建筑砌块与砌块建筑*, 2005(2):35-38
- [8] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[Z]. 北京:中国水利水电出版社, 1999
- [9] 中华人民共和国建设部. JGJ 53—92 普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法[Z]. 北京:中国华龄出版社, 1994
- [10] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 5150—2001 水工混凝土试验规程[Z]. 北京:中国电力出版社, 2001
- [11] 国家建筑材料工业局. JC/T 446—2000 混凝土路面砖[Z]. 北京:建材工业出版社, 2000
- [12] 中华人民共和国国家计划委员会. GBJ14—87 室外排水设计规范(1997年版)[Z]. 北京:中国计划出版社, 1998
- [13] 文康, 金管生, 李蝶娟, 等. 地表径流过程的数学模拟[M]. 北京:水利水电出版社, 1991
- [14] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000
- [15] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1):16-18
- [16] Bodman GB, Colman EA. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1944, 8(2):166-182

(上接第 77 页)

- [5] 郭建新, 刘松林, 倪丽, 等. 一种改进的基于最大类间方差的图像分割方法[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8):665-666
- [6] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. *IEEE Trans Actions on SMC*, 1979(9):652-655
- [7] 边肇祺, 张学工, 等. 模式识别[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 2000
- [8] 徐慧 等. Visual C++ 6.0 数字图像实用工程案例精选[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004
- [9] Marchant J A, Renaud B. Real-time tracking of plant rows using a Hough transform[J]. *Real Time Imaging*, 1995, 1(5):363-371
- [10] 钟玉琢, 乔秉新, 李树青. 机器人视觉技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1994