

# 种植土绿化带净水性能的预测模型

谷国宏<sup>1</sup>, 张春会<sup>2\*</sup>, 关彤军<sup>3</sup>

(1. 石家庄市城市建设投资控股集团有限公司, 河北 石家庄 050000; 2. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018;  
3. 石家庄市政设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:**为了预测种植土绿化带对城市道路径流雨水污染物的净化效果,将雨水入渗种植土视作一维渗流和污染物迁移过程,基于质量守恒原理建立雨水入渗种植土绿化带的污染物迁移数学模型。结合种植土绿化带下边界工作条件,提出模型下边界简化处理方法,进而给出种植土绿化带净化道路径流雨水的预测模型。利用模型预测不同降雨历时种植土绿化带对道路径流雨水的净化效果,主要结论为:① 该文模型预测种植土绿化带净水性能结果与试验结果基本一致,模型合理,为种植土绿化带净水性能评估提供了一种方法;② 增大种植土厚度能够有效提高种植土对道路径流雨水污染物的净化效果,当种植土厚度从 60 cm 增加至 80 cm 时,种植土对 COD(化学耗氧量)和 SS(悬浮固体)的净化效果分别提高了 62.2% 和 69.4%。

**关键词:**种植土绿化带; 净水性能; 预测模型; 种植土厚度

**中图分类号:** U417.3

**文献标志码:** A

随着中国城市和城镇化快速发展,市内道路和社区硬化地面面积激增。硬化路面渗透性低,降雨难以入渗,城市缺水和暴雨内涝等灾害长期并存,使得城市生态环境恶化,热岛效应加剧。为了解决这一问题,在 2013 年召开的中央城镇化工作会议上,习近平总书记提出建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”。2014 年,中国住房和城乡建设部发布《海绵城市建设技术指南》<sup>[1]</sup>。2015 年,中国国务院发布《关于推进海绵城市建设的指导意见》<sup>[2]</sup>,提出通过海绵城市建设,将 70% 的降雨就地消纳和利用。2015 年和 2016 年,迁安、白城、济南、武汉、北京、上海、天津、青岛等 30 个城市入选海绵城市建设试点。随后,海绵城市建设在中国迅速发展,也引起了国内外学者广泛关注。Collins 等<sup>[3]</sup>利用透水混凝土路面截留降雨;Debusk 等<sup>[4]</sup>提出生物滞留能够高效截留降雨,减少地表径流。中国一些学者<sup>[5-12]</sup>研究了生物滞留带、雨水花园、透水路面、植草沟、雨水湿地、透水砖等在海绵城市建设中的作用和效果。近些年,程树斌等<sup>[13-14]</sup>提出了一种适用于海绵城市道路建设的种植土—碎石绿化带结构,这种结构利用道路横坡汇集路表径流雨水至绿化带,然后经由绿化带—碎石透水结构入渗地下。城市道路行驶车辆众多,北方城市空气污染严重,城市路表

污染严重。天然降雨降落于路表,形成的路表径流在汇流入种植土绿化带过程中,路表污染物被径流雨水冲刷、溶解,地表径流雨水污染严重<sup>[15-20]</sup>。携裹污染物的径流雨水进入种植土绿化带,渗入地下。当道路径流雨水渗流通过时,作为多孔介质,种植土孔隙壁能够吸附和截留雨水内污染物,使得雨水内污染物浓度降低,雨水净化。只有当雨水净化到一定程度后渗入地下,才不会污染地下水。种植土厚度、孔隙特征、道路径流雨水污染物浓度等因素都对种植土出水污染物浓度有影响,如何预测种植土绿化带对道路径流雨水的净化性能尚未有相关报道,这不利于种植土绿化带在海绵城市建设中的推广应用。因此研究种植土绿化带对道路径流雨水污染物净化的预测模型,具有重要的工程价值。程树斌等<sup>[21]</sup>开展了种植土绿化带净水性能足尺模型试验,研究了种植土净化道路径流雨水的性能,但没有提出相应计算模型。该文将雨水入渗种植土视作一维渗流和污染物迁移过程,基于质量守恒原理建立雨水入渗种植土绿化带的污染物迁移数学模型。结合种植土绿化带工作条件,提出模型下边界简化处理方法,进而给出种植土—碎石绿化带净化道路径流雨水的预测模型,从而为种植土绿化带净水性能评估提供一种方法。

**收稿日期:** 2021-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(编号:51574139);河北省科技研发重点项目(编号:18276109D)

**作者简介:** 谷国宏,男,大学本科,高级工程师. E-mail:123911770@qq.com

**\* 通信作者:** 张春会,男,博士,教授,博士生导师. E-mail:zhangchunhui789@126.com

## 1 数学模型

种植土绿化带结构示意图如图 1 所示,种植土绿化带由高渗透性种植土(渗透系数一般大于  $0.5 \text{ cm/h}$ )、储水碎石层组成,上层种植土厚度一般为  $60 \sim 100 \text{ cm}$ ,下层碎石层一般为  $60 \sim 100 \text{ cm}$ ,种植土两侧面为 C20 混凝土,碎石层两侧面设置防水土工布。天然雨水降落路表面,经过横坡汇集流入绿化带,然后经由种植土入渗存储至地下。种植土两侧面可近似视作不透水,雨水入渗为一维垂直入渗。种植土纵向长度远大于横向,分析中可以视作平面应变问题。于是,雨水污染物迁移也可以视作竖向一维问题,取任意一个单元体进行分析,其示意如图 2 所示。

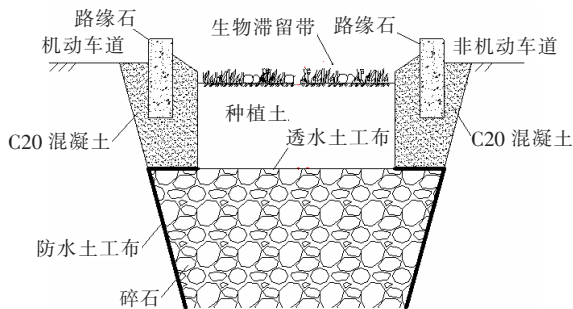


图 1 种植土绿化带示意图

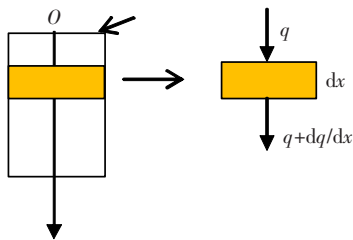


图 2 种植土雨水入渗和污染物迁移示意图

在图 2 中,将坐标原点取在种植土横断面上表面中心位置, $x$  轴向下为正,雨水从上向下渗流过种植土。

由单元体质量守恒原理,有:

$$\frac{\partial M}{\partial t} dx = -\frac{\partial q}{\partial x} dx \quad (1)$$

式中: $M$  为单位体积入渗雨水的某污染物质量; $q$  为流过单元体雨水内污染物质量。

$$M = CV_w = C\Theta \quad (2)$$

式中: $C$  为某污染物浓度; $V_w$  为单位土体内雨水体积; $\Theta$  为体积含水量。

将式(2)代入式(1),有:

$$\Theta \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \quad (3)$$

单元体污染物质量流量变化由浓度梯度扩散和雨水渗流引起,可以写为:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\Theta D \frac{\partial C}{\partial x} + UC \right) \quad (4)$$

式中: $U$  为达西渗流速度; $D$  为水动力弥散系数。

式(4)代入到式(3),有:

$$\Theta \frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -\Theta D \frac{\partial C}{\partial x} + UC \right) \quad (5)$$

即:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

式中: $\nu = U/\Theta$ 。

水动力弥散系数  $D$  可以表示为:

$$D = \alpha \nu + D^* \quad (7)$$

式中: $\alpha$  为弥散度,通常取  $0.1 \text{ m}$ ;  $D^*$  为分子扩散系数。

种植土颗粒对污染物有吸附作用,将种植土吸附污染物质量与种植土质量之比定义为吸附度  $S$ ,取单位体积种植土,则吸附度  $S$  可以表示为:

$$S = \frac{M_s}{\rho_d} \quad (8)$$

式中: $M_s$  为单位体积种植土吸附质量; $\rho_d$  为种植土干密度。

于是,有:

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} \quad (9)$$

考虑吸附作用,式(6)改写为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_d}{\Theta} \cdot \frac{\partial S}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial C}{\partial x} \quad (10)$$

令:

$$K_d = \frac{\partial S}{\partial C} \quad (11a)$$

$$R = \left( 1 + \frac{\rho_d}{\Theta} K_d \right) \quad (11b)$$

将式(11)代入式(10),有:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial C}{\partial x} \quad (12)$$

式中: $R$  为污染物的阻滞因子。

在初始时刻,种植土内无污染物,初始条件为:

$$C(x, t=0) = 0 \quad (0 \leq x \leq H) \quad (13)$$

式中: $H$  为种植土厚度。

种植土绿化带左右边界均为不透水边界,上边界

为汇集的道路径流雨水,雨水内某种污染物浓度为 $C_0$ ,则上边界条件为:

$$C(x,t)=C_0 \quad (x=0,t>0)$$
 (14)

实际工程中种植土厚度为0.6~1.0 m。入渗雨水流出种植土后,渗入碎石层,再入渗地下。这种情况下种植土下边界的污染物浓度不确定。然而,种植土绿化带下边界为碎石层,渗水性能优良,种植土渗出雨水快速排走,雨水内污染物也快速排走,这种条件下污染物迁移情形与种植土很厚时的情形相近,于是该文虚拟种植土厚度 $h$ 很大,在远方 $h$ 处种植土出水污染物浓度为0,其示意如图3所示,则下边界条件写为:

$$C(x,t)=0 \quad (x=h,t>0,h\gg H)$$
 (15)

根据式(15)的边界条件,求得污染物浓度后,仅取 $H$ 范围内的污染物浓度分布数据即为该文种植土内污染物浓度分布。

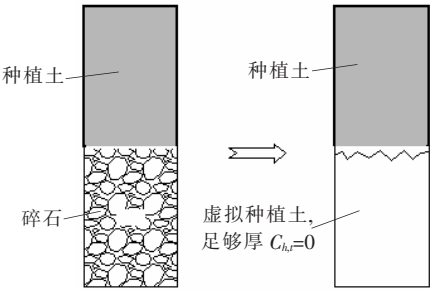


图3 下边界条件转化

求解上述种植土内污染物迁移数学模型,获得其解析解为<sup>[22]</sup>:

$$C = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - (U/\Theta R)t}{2\sqrt{Dt/\Theta R}} \right] + \exp \left( \frac{Ux}{D} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{x + (U/\Theta R)t}{2\sqrt{Dt/\Theta R}} \right] \right\}$$
 (16)

当 $K_d=0$ 时, $R=1$ ,种植土不吸附污染物。

2 试验验证

2.1 试验概况及结果

该文依托石家庄市汇明路种植土绿化带海绵道路工程,在室内试验室开展种植土对道路径流雨水净化效果的足尺模型试验<sup>[21]</sup>。试验装置、试验步骤和试验过程等信息均参考文献<sup>[21]</sup>。试验中道路径流雨水为人工配置,COD浓度为172.4 mg/L,SS浓度为503.9 mg/L。种植土厚60 cm,碎石层厚75 cm,种植土空隙率为0.464,试验桶平面面积为0.502 4 m<sup>2</sup>,种

植土平均渗透系数为0.92 cm/h(或0.000 26 mm/s)。通过计算<sup>[21]</sup>,在试验中每次降雨0.369 m<sup>3</sup>,每次降雨约6 000 min,降雨6次,获得出水污染物浓度如表1所示。

表1 种植土绿化带出水污染物试验结果<sup>[21]</sup>

降雨次数/次	COD 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
1	50.1	32.1
2	35.5	42.1
3	38.5	62.3
4	43.5	97.3
5	48.1	114.2
6	50.7	118.0
均值	44.4	77.7

2.2 模型预测

使用该文模型预测种植土绿化带出水污染物浓度。

在计算中,根据经验 $\alpha$ 取为100 mm, $D^*$ 为 $2.5 \times 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>/s<sup>[23]</sup>,则: $D=\alpha v+D^*=0.056\ 25$  mm<sup>2</sup>/s。

如前所述,为了模拟种植土绿化带下边界,种植土厚度取很大,该文取10倍实际种植土厚度,即种植土计算厚度取6 m计算,这种条件下下边界出水污染物浓度为0。种植土初始时刻土内没有污染物。 $v$ 可以写为:

$$v = \frac{U}{\Theta} = \frac{0.000\ 26}{0.464} = 0.000\ 56\ \text{mm/s}$$

利用该文式(16),计算获得0.6 m厚种植土出水污染物浓度分别如图4、5所示。图中横坐标为种植土厚度,其中0~600 mm范围即为600 mm厚种植土范围,600 mm处的出水污染物浓度即为600 mm厚种植土出水污染物浓度。

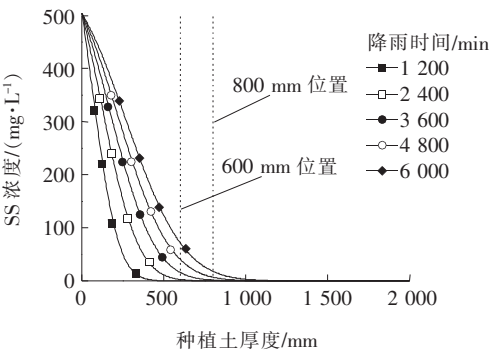


图4 预测出水SS浓度

图4中横坐标0~600 mm范围为不同降雨历时种植土内污染物SS的浓度分布。从图4可以看出:①

当种植土厚度为 600 mm 时,降雨 6 000 min 后种植土出水 SS 浓度约为 72 mg/L,这与试验中 6 次降雨平均值 77.7 mg/L 相差约 7.3%,表明使用式(16)计算种植土 6 次降雨出水 SS 浓度能取得较好结果。对比前 2 次降雨试验结果,式(16)所计算的出水 SS 浓度偏大,这主要是由于式(16)没有考虑种植土对 SS 吸附作用的影响所致;② 随着降雨时间增加,种植土内污染物浓度逐渐增大,影响范围也逐渐增大。当降雨 1 200 min 时,SS 大致分布在 480 mm 范围内,当降雨时间达到 6 000 min 时,SS 的分布范围扩展至 1 040 mm。

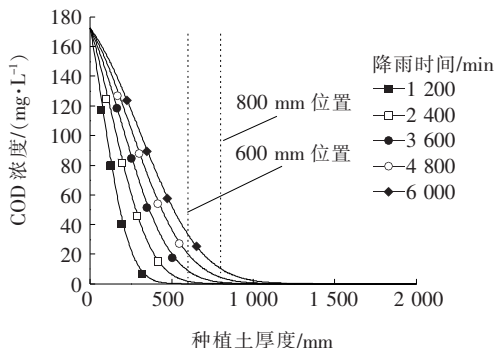


图 5 预测出水 COD 浓度

从图 5 可以看出:当种植土厚度为 600 mm 时,降雨 6 000 min 后种植土出水 COD 浓度约为 37 mg/L,这比试验中 6 次降雨出水 COD 浓度平均值 44.4 mg/L 小约 16.7%,主要是由于实际种植土内初次状态可能含有一定的 COD,理论计算中认为种植土初始 COD 浓度为 0,使得计算结果低于试验测试结果。总体上,该文对种植土下边界的简化处理是合理的,该文模型能够较好地预测种植土对道路径流雨水内污染物的净化,为种植土绿化带净化道路径流雨水性能评估提供了一种方法。

图 4、5 中标出了种植土厚度为 800 mm 时,不同降雨历时种植土出水污染物浓度。可以看出:当种植土厚度为 800 mm 时,降雨 6 000 min 后种植土出水 COD 浓度、SS 浓度分别约为 14、22 mg/L,对比种植土 600 mm 时的计算结果,种植土出水 COD 和 SS 浓度都大幅降低,分别降低了 62.2% 和 69.4%,可见增大种植土厚度能够有效提高种植土对道路径流雨水净化的效果。

### 3 结论

将道路径流雨水入渗种植土视作一维过程,进而

建立雨水入渗种植土绿化带的污染物迁移数学模型,并结合试验数据验证了模型合理正确。得到以下主要结论:

(1) 该文模型预测种植土绿化带净水性能结果与试验结果基本一致,对种植土下边界简化处理方法可行,模型合理,为种植土绿化带净水性能评估提供了一种方法。

(2) 增大种植土厚度能够有效提高种植土对道路径流雨水污染物的净化效果,当种植土厚度从 60 cm 增加至 80 cm 时,种植土对 COS 和 SS 的净化效果分别提高了 62.2% 和 69.4%。

### 参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[Z], 2014.
- [2] 中国国务院. 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见[Z], 2015.
- [3] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic Comparison off our Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 12 (13): 1146—1157.
- [4] DEBUSK K M, WYNN T M. Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(9): 800—808.
- [5] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等. 填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 73—78, 102.
- [6] 宫永伟, 戚海军, 李俊奇, 等. 城市道路低影响开发设计的雨洪滞蓄效果分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(9): 151—158.
- [7] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 1—5.
- [8] 顾天奇, 张古陶, 孙海洋, 等. 新建开发区海绵城市实践——以苏州太湖新城市政道路生态雨水渗透及利用工程为例[J]. 中国市政工程, 2016(2): 30—32, 113—114.
- [9] 王元元, 刘燕燕, 何顺顺, 等. 聚氨酯碎石和透水砖两种人行铺装结构及性能对比[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 42—46.
- [10] 冯颖莹, 刘磊, 郑书航, 等. 基于定量计算的道路侧分带下沉式绿地设计[J]. 城市道桥与防洪, 2020(9): 98—101, 16.
- [11] 陈骁. 基于海绵城市的透水性沥青路面应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [12] 吴思远, 罗惠云, 王建富. 排水模型在院落海绵化改造方案设计中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 102—108.