

植草沟对北京市道路地表径流的调控效应

郭凤¹, 陈建刚², 杨军³, 孟莹莹², 龚应安²

(1. 北京林业大学 森林培育和保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100044; 3. 清华大学地球系统科学研究中心, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: [目的] 分析植草沟对北京城市道路径流的水量和水质的调控效应, 为北京市雨洪管理提供参考。[方法] 实地建立植草沟, 并根据北京市多年降雨资料和主干道路径流水质 2010—2012 年的监测结果设置径流量和水质。[结果] (1) 降雨历时短, 降雨强度低时植草沟的调控水量的功能明显。在降雨历时为 3 h, 降雨重现期为 0.33 a 时, 50 m² 的植草沟可削减 50 m² 沥青道路上产生的 66% 的径流量, 降雨强度相对降雨历时来说对植草沟传输入渗的影响更大。(2) 植草沟对水质污染物有一定的去除效果, 但达不到完全净化。建设的植草沟能够削减径流中的氨氮达 20%, 总磷达 35%, COD 达 22%。(3) 植被覆盖度能影响植草沟的调控能力。植被覆盖度增加 60%, 植草沟对 0.33 年重现期降雨 1 h 的雨量入渗率提高了 8%。(4) 若建立与北京市城六区道路等长度、宽 2 m 的植草沟, 对 1 a, 2 a 重现期 24 h 降雨形成的道路径流削减率分别为 96.3% 和 56.0%, 但对 50 a 极端降雨道路径流量的削减率仅为 13.0%。[结论] 植草沟对北京市道路地表径流具有一定的调蓄洪峰流量, 延缓产流时间, 减少径流污染的作用, 但无法单独作为有效控制城市道路地表径流水量的管理措施。

关键词: 植草沟; 道路; 地表径流; 水量; 水质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0176-06

中图分类号: TV213.9

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.038

Regulatory Effect of Grassed Swales on Road Surface Runoff in Beijing City

GUO Feng¹, CHEN Jiangang², YANG Jun³, MENG Yingying², GONG Ying'an²

(1. Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Water Science and Technology of Beijing, Beijing 100044, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] To analyze the regulatory effect of grassed swales on road surface runoff in order to provide reference for managing rainfall flood in Beijing City. [Methods] The grassed swales were constructed, and the volume and quality of water flowing was designed based on the data of the average rainfall situation and water quality of road surface runoff in Beijing City recorded during 2010—2012. [Results] (1) The effect on reducing the volume of surface runoff was stronger under rain events with short durations and low intensities. When the duration of the simulated rain event was set to three hours and the return period of rainfall was set as 0.33 year, the 50 m² grassed swales can reduce 66% of the total volume of surface runoff generated from a 50 m² road section. The intensity of a rain event has stronger influence on reducing the volume of surface runoff than the duration; (2) The grassed swales could improve the water quality but could not remove the pollutants entirely. The removal rates of ammonia nitrogen, total phosphorus, and chemical oxygen demand(COD) was 20%, 35%, and 22%, respectively; (3) The vegetation cover had an impact on the effectiveness of the grassed swales. When the vegetation cover increased by 60%, the volume of infiltrated water increased by 8% for a simulated rain event with 0.33-year return period and one hour of duration. (4) If two-meter wide grassed swales can be built along all roads in the six urban districts, they can reduce

收稿日期: 2014-03-13

修回日期: 2014-04-22

资助项目: 北京市科委项目“北京中心城区下凹桥区积滞水防控技术研究与示范”(Z121100000312037); 教育部留学回国人员启动基金(652450)

第一作者: 郭凤(1989—), 女(汉族), 吉林省农安县人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市雨洪管理。E-mail: gf19891989@126.com。

通信作者: 杨军(1973—), 男(汉族), 四川省攀枝花市人, 博士博士生导师, 主要从事城市生态、全球城市环境变化。E-mail: larix001@gmail.com。

the road surface runoff resulted from rain events with one-year and two-year return period in 24 hours by 96.3% and 56%, respectively. However, for extreme precipitation such as rain events with 50-year return period, the reduction of road surface runoff is only 13%. [Conclusion] The grassed swales had certain effects on reducing the peak flow, delaying the time of runoff, and improving the water quality of runoff in Beijing City, but it is not an effective management measure to control the urban road surface runoff water, when used alone.

Keywords: grassed swales; road; surface runoff; water quantity; water quality

随着城市化进程的加快,城市雨洪的控制与利用成为了城市环境研究的热点。目前国内外针对城市防洪排涝问题提出了各种工程和非工程的管理措施^[1]。其中源自美国的最佳管理措施(BMPs, Best management practices)因其具有调蓄洪峰流量^[2],净化水质^[3],涵养地下水等作用,并具有与自然植被相结合^[4],完备的技术体系^[5]等特点,逐渐成为了现代城市雨洪管理的一类重要措施。

北京市作为我国的政治经济文化中心,在过去 20 年里城市建设经历了一个飞速发展的过程^[6]。然而,这个过程中城市雨洪问题却日益突出,影响到北京城市居民的日常生活,一方面频频发生的城市内涝造成了巨大的经济损失和人员伤亡^[7],另一方面,北京市面临水源短缺^[8]、地下水水位下降、居民的正常生活用水难以保障的挑战。而北京市汛期雨水丰富,但大多通过城市雨水管道排出,并没有得到很好的利用^[9]。因此研究如何对北京的雨洪进行有效管理具有很强的现实意义。植草沟是 BMPs 体系中的传输控制措施,是处理道路地表径流的有效手段^[10]。而造成北京内涝的一个重要原因即是道路地表径流^[11]。由于目前针对植草沟在北京道路地表径流管理中的应用和作用机制的研究相当缺乏,因此本研究以植草沟为主要对象,通过实地监测其在模拟的北京道路地表径流情况下的表现,拟为在北京雨洪管理中采用这种 BMP 措施提供基础数据,为改善北京市汛期城市雨水排洪减灾问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及沟渠设计

试验地位于北京市门头沟区北京市水科学技术研究院试验站,实验站在北京市西南,东经 115°51'48",北纬 39°36'10"处。试验植草沟建设在试验站东南角,所处地块面积为 200 m²,平坦无坡度。植草沟的设计参考市政道路排水设计规范以及城市雨洪管理设计手册^[12-13]中对植草沟的设计参数要求,植草沟的长度设计为 25 m,宽度为 2 m,纵向坡度为 5‰,设置末端出水口(雨水口 1)与植草沟底部持平,距离进水口 20 m 处(雨水口 2)有 10 cm 的溢流口。植草沟构

建时间为 2013 年 6 月 15—20 日。具体的设计细节见图 1。雨水口 1 略高于地面即可,确保周围土壤不会随水流流入管道。

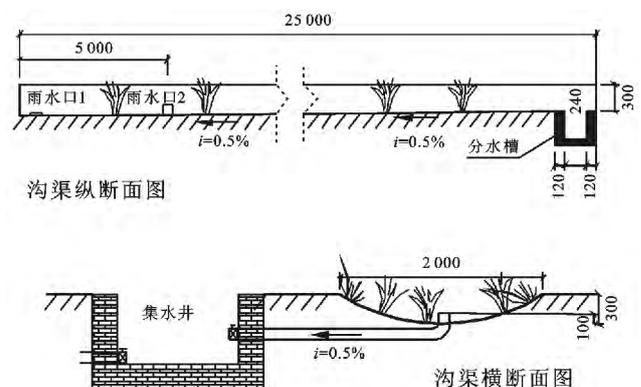


图 1 植草沟设计(图中长度数据单位为 mm)

根据城市建设中的实际情况,植草沟填埋的土壤采用了建筑物周围的回填土,采用颗粒分级法测定其质地为粉质壤土,土壤的主要物理性质为:含水率 0.09%,湿容重 2.50 g/cm³,总孔隙度 39.39%,毛管孔隙度 31.85%,饱和含水量 16.33%。

植草沟种植的植被为麦冬(*Ophiopogon japonicus*),植株间距为 15 cm。麦冬具有常绿、耐寒、耐旱、耐阴、对土壤要求不严、病虫害少的优点^[14]。在植草沟建成 1 个星期后栽种麦冬并进行 10~15 d 的正常维护管理,确保栽种成活,最后测得成活率约为 99.3%。

1.2 试验设计

根据北京多年降雨数据和道路地表径流水质数据设计进水量,配定污染物浓度。试验共 17 个处理(表 1),为探究植草沟的水处理效果,分别针对水量(8 个处理)、水质(4 个处理)以及 10 cm 高度出水口排水(5 个处理)进行试验设计。每次试验均进行 1 次重复。

表 1 中水量的设计方式如下:根据公式(1)计算得到单车道路 2.5 m 宽,20 m 长度汇水面积(50 m²)在不同重现期条件下的汇水量。植草沟的研究,中国目前大多选用 0.33~1.0 a 的重现期^[11],本研究为剖析植草沟在雨量小时的入渗作用,以及径流传输条件

下水量及降雨历时方面的变化规律,故试验选择 2 个重现期 0.33 a 和 0.5 a,分别在历时为 1 h 和 3 h 条件下进行试验,试验为 2 因素 2 水平,如表 1 处理 1-1

和处理 1-8;选择重现期为 1 a,历时为 1 h 条件的处理 3-5,对植草沟在 10 cm 溢流口条件下的处理水量进行验证。

表 1 水量和水质试验设计

项目	试验安排								
无高度出水口水量试验	处理 1-1	处理 1-2	处理 1-3	处理 1-4	处理 1-5	处理 1-6	处理 1-7	处理 1-8	—
水质试验	处理 2-1	处理 2-2	处理 2-3	处理 2-4	—	—	—	—	—
10 cm 高度出水口水量试验	处理 3-1	—	处理 3-2	—	处理 3-3	—	处理 3-4	—	处理 3-5
试验时间	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月
降雨重现期/a	0.33	0.33	0.5	0.5	0.33	0.33	0.5	0.5	1
进水量/(L·s ⁻¹)	0.22	0.22	0.37	0.37	0.22	0.22	0.37	0.37	0.46
试验时长/h	1	1	1	1	3	3	3	3	1
NH ₃ -N 浓度/(mg·L ⁻¹)	4.01	4.66	4.50	5.16	—	—	—	—	—
TN 浓度/(mg·L ⁻¹)	13.07	3.40	12.01	5.90	—	—	—	—	—
TP 浓度/(mg·L ⁻¹)	0.64	0.56	0.57	0.49	—	—	—	—	—
COD 浓度/(mg·L ⁻¹)	670	780	660	706	—	—	—	—	—
TSS 浓度/(mg·L ⁻¹)	30.33	36.00	30.19	30.00	—	—	—	—	—

水量设计参考北京市《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》中的暴雨径流公式:

$$q = \frac{2001(1+0.811 \lg p)}{(t+8)^{0.711}} \quad (1)$$

式中: q ——设计暴雨强度 [L/(s·hm⁻²)]; p ——设计重现期 (a); t ——降雨历时 (min)。

试验开始前,应用 S 点采样法,取表层土样进行含水量的测定。先根据不同重现期调节好水泵的出流量,并准确读出水表的初始读数。计时开始即开始供水,并沿程记录湿润时间及末端流出时间,与此同时每隔 15 min 测定指定点(与入水口距离 5, 10, 15, 20, 25 m)的流速、水深,同时记录末端出流量,并在停止供水后继续测定水深变化。

表 1 水质试验中污染物浓度的设计根据北京市道路多年地表径流监测的水质指标含量: NH₃-N 为 3.74~5.83 mg/L, TN 为 11.1~18.9 mg/L, TP 为 0.36~0.86 mg/L, COD 为 153~779 mg/L, TSS 为 266~678 mg/L。分别应用氯化铵(NH₄Cl)、硝酸钾(KNO₃)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、葡萄糖(C₆H₁₂O₆)、地表沉积物配定 NH₃-N, TN, TP, COD, TSS 在上述含量范围内,结果如表 1。水质采样因模拟过程中不涉及初期径流冲刷效应^[15],故在试验中采集 2 次出口流量作为重复,采集 1.5 L 水样于取样桶中,放冰箱中 4 °C 冷藏,并在 24 h 内测定氨氮,其他指标 7 d 内测定。

1.3 指标测定方法

水量指标测定方法:沟渠试验总的进水量通过水

表读数差减法得到 (m³, 精确到小数点后 5 位);出水量通过量筒、量杯人工测量 (ml, 精确到个位);流速通过简易浮标法测定 (cm/s), 浮标位移通过直尺读数 (cm, 精确到小数点后 2 位), 时间通过秒表读数 (s, 精确到小数点后 2 位);水深通过直尺读数直接测定 (cm, 精确到小数点后 2 位);入渗量通过水量平衡进水量与出水量差减法得到 (m³, 精确到小数点后 5 位)。

水质指标的测定根据国家水质标准检测分析方法:① NH₃-N 为重铬酸盐法 (GB/T11914—1989);② TN 为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T11894—1989);③ TP 为钼酸铵分光光度法 (GB/T11893—1989);④ COD 为重铬酸盐法 (GB/T11914—1989);⑤ TSS 为重量法 (GB/T11901—1989)。

植被覆盖度的测定方式是在 1.5 m 高处用数码相机垂直拍照后,在 Photoshop 软件中分析照片中植被所占的比例。

土壤渗透过程线的测定方法是在沟渠灌满水后,测定水深 (cm, 小数点后 2 位) 随时间 (s, 小数点后 2 位) 的变化。

2 结果及分析

2.1 植草沟对径流水量的调控作用

本文中因供水量恒定,植草沟的调蓄作用主要体现在 2 个方面:延缓产流时间,增加入渗水量。

对于无高度出水口情况,从表 2 结果可以看出,植草沟末端排水口出流时间为 20~40 min,即延缓产流时间 20 min 到 40 min 不等;植草沟入渗率为 21%~85%,即可有效增加入渗水量,反映其对洪峰流量的控制。

降雨条件的不同,对沟渠的水量调蓄效果有一定

的影响,降雨历时不变时,降雨强度越大,出流时间越短,入渗率越小;降雨强度相同时,降雨历时越长,出流时间不变,沟渠的入渗量相应的减小。这表明沟渠的产流时间受降雨强度影响较大。降雨强度不变,而沟渠的入渗量减小,这主要是随着降雨历时的延长,土壤渗透速率逐渐减小,接近饱和渗透速率。

表 2 植草沟对产流时间和入渗率的调控

试验条件	处理 1-1	处理 1-2	处理 1-3	处理 1-4	处理 1-5	处理 1-6	处理 1-7	处理 1-8
植被覆盖度/%	21.34	85.71	21.34	85.71	21.34	85.71	21.34	85.71
末端排水口出流时间/s	1701.33	2 619.80	1 109.12	1 120.40	1 744.41	2 607.56	1 093.73	1 159.17
入渗率/%	77.23	85.15	54.09	58.85	66.34	67.95	20.89	28.36

10 cm 高出水口记录的数据表明(表 3),在注蓄存储条件降雨强度越大,出流时间越快;0.5 a 重现期降雨 3 h 的降雨量才有出流,并且对 1 a 重现期降雨 1 h 的降雨量几乎可以完全容纳并入渗。实测数据显示,在 10 cm 高出水口条件下沟渠 1 h 可处理水量约为 1.5 m³。

表 3 10 cm 高出水口条件下沟渠调蓄水量

实验条件	供水量/ m ³	开始溢流 时间/min	排出水量/ m ³	入渗水量/ m ³
处理 3-1	0.91	0	0	0.91
处理 3-2	0.93	0	0	0.93
处理 3-3	2.16	0	0	2.16
处理 3-4	3.49	71	0.67	2.82
处理 3-5	1.47	55	0.01	1.46

2.2 植草沟对径流水质的净化作用

本试验使用地表沉积物配制悬浮物,但由于地表沉积物易沉降,不便于实验测量;同时,总氮测定结果误差值较大,且低于道路地表径流的多年平均值。因此,本研究只对 TP, NH₃-N, COD 这 3 个指标进行分析。

从图 2 可以看出,试验建立的植草沟对氨氮的去除率为 10%~20%,对总磷的去除率为 15%~35%,对 COD 的去除率较恒定,约为 20%。降雨条件的不同,对水质净化效果也有影响,相同降雨历时条件下,降雨强度越小,沟渠对水质的净化作用越明显。

2.3 植被覆盖度对植草沟调控能力的影响

植被覆盖度会影响植草沟的处理能力。经测定,植草沟的覆盖度 7 月为 21.34%,9 月为 85.71%。从表 2 的结果可以看出,植草沟的调蓄能力与植被的覆盖度密切相关。草的覆盖度越大,沟渠末端的排水口出流时间越长,入渗率越大。植被覆盖度增加 60%,入渗率约提高 10%,总体体现的是植草沟的调蓄能力越大。

从图 2 中也可以看出,植被盖度越大,沟渠对氨氮及总磷的去除效果越好。当植被覆盖率增加 60%时,氨氮去除率可提高约 10%,总磷去除率可提高约 20%,而对 COD 的去除效果差别不大,这主要因为氨磷为植物生长必须的大量元素, COD 是有机物综合含量的指标之一,主要由微生物分解,土壤及植物对它的作用并不明显。

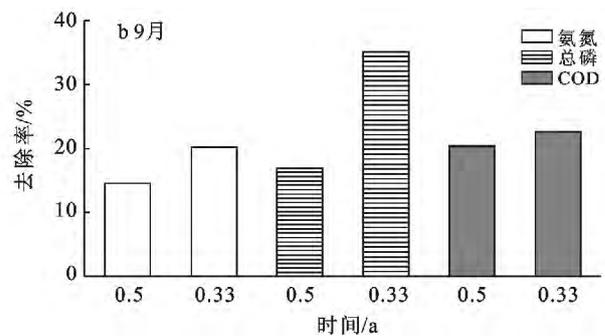
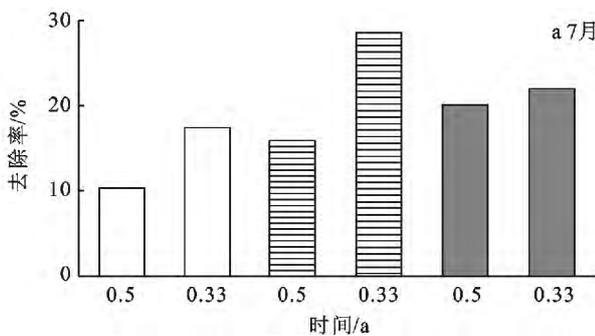


图 2 植草沟对径流水质的净化效果

2.4 植草沟处理水量估算

渗透过程线(图 3)末端斜率为土壤的饱和渗透

速率,测定结果:7 月为 1.94×10^{-6} m/s,9 月为 1.87×10^{-6} m/s。渗透过程线的测定为沟渠一次性注满

水,测定水深随时间的变化。7月的测定结果比9月的大,这主要与沟渠经受的干旱天数有关,试验前晴天数,7月份约10 d,9月份约3 d。另外,试验在50 min左右的数值变化较大,可能是前期植草沟构建时对底部土壤扰动较大,使得土壤20—30 cm土层孔隙增大。有研究表明,随着植被的恢复,土壤稳定入渗速率会不断提高^[16],这与本文的结果略有出入,笔者分析主要是因为本研究的试验时期较短,沟渠恢复时间不足,但对渗透速率的测定结果影响不大。

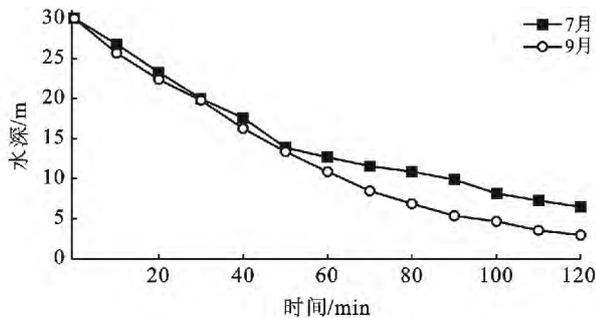


图3 植草沟处理土壤渗透过程

由此可计算,沟渠的水力负荷能力为 $1.87 \times 10^{-6} \sim 1.94 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,则理论上试验建立的植草沟1 h可处理的水量约为 7 m^3 (注蓄存储),1 h入渗水量约为 0.34 m^3 ,可推算在1 a重现期、降雨1 h条件下沟渠可处理的汇水面积约为 80 m^2 。

为剖析植草沟对极端降雨的水量调蓄作用,如2012年7月21日北京市61 a来最强降雨,本文估算植草沟对50 a重现期降雨的调蓄作用。由《北京统计年鉴》可查得2012年北京市城六区道路总长度为6 271 km,总面积为9 236 hm^2 。假定在北京城六区内建立与道路等长度、宽2 m,与实验所建植草沟构造一致的植草沟。根据《室外排水设计规范》中沥青道路径流系数0.9计算道路径流量,则建立的植草沟对道路径流的削减率如表4所示。

表4 模拟植草沟调蓄水量

降雨强度	降雨量/ mm	道路地表 径流量/ m^3	植草沟减少 道路径流比例/%
24 h,1 a	47.3	3.9×10^6	96.3
24 h,2 a	81.4	6.8×10^6	56.0
24 h,50 a	350.9	2.9×10^7	13.0

由上表可知,建立的植草沟可对1 a和2 a重现期降雨形成的道路地表径流削减效果良好,但对于极端降雨,植草沟仅能处理小部分道路地表径流量。由此可见植草沟在暴雨、特大暴雨等极端天气下只能作

为道路雨洪综合管理措施的一个组成部分,而不能作为一个主要的雨洪管理手段使用。

3 结论与讨论

根据前人试验的经验性总结^[17],植草沟对径流污染物的去除率一般为COD 47%~82%,TP 20%~40%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 25%~74%,TSS 60%~80%,TN 20%~60%。与前人的结果相比,本试验中植草沟对污染物的去除率偏低,COD去除率仅为20%,TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除也没有达到一般水平,这主要是植草沟对污染物的去除作用还与植草种类及沟渠长度有关^[18],也与进水的污染物浓度有关^[19]。

植草沟可削减道路径流量^[20],但其入渗水量与沟渠填料有关,填料渗透性好则植草沟入渗水量大^[21],本试验建立的 50 m^2 植草沟土壤背景为建筑回填土,颗粒分级法测定0.075~0.005 mm的土壤颗粒含量为58.50%,渗透系数较小,导致其处理水量相对较低。有研究表明,沥青道路0.33 a(0.026 mm/min)重现期产流时间约为15 min,0.5 a(0.044 mm/min)重现期产流时间约为5 min^[22],这充分体现了植草沟的延缓产流时间作用。同时植草沟也具有削减洪峰的作用^[18],但本研究中植草沟出水口高度的作用还有待进一步证实。本试验中植草沟的植被覆盖度越大,其调控效果越好,这主要是因为随着植被的恢复,土壤稳定入渗速率会不断提高^[16]。另外,本文对植草沟的水力负荷分析表明其仅对低强度降雨调蓄作用良好,这与国内外相关研究结果一致^[23-25]。

通过对本文试验结果的分析可得到以下主要结论。

(1) 植草沟具有延缓产流时间,涵养地下水的作用。降雨历时越短,降雨强度越低,植草沟的处理能力发挥的越好,降雨强度相对降雨历时来说对植草沟传输入渗能力的影响更大;植被覆盖度越大,植草沟的水量调控效果越好。

(2) 植草沟具有一定的污染物去除能力,并且降雨强度大,去除效果较差,植被覆盖率增加,去除效果会相应提高;

(3) 试验建立的植草沟无法单独作为有效控制城市道路地表径流水量的管理措施。

本研究虽然证实了植草沟在北京道路径流水量和水质管理方面的作用,但还存在一些不足。在水量方面,由于设计的入流量恒定,没有进行植草沟减小洪峰流量的试验,但增加入渗量在一定程度上反映了对洪峰流量的控制作用。此外实际道路产流、汇流情

况要复杂的多,而在合适路段建立植草沟进行模拟降雨试验将更接近真实情况。植草沟宽度、长度的设定也要考虑不同等级道路规划等诸多因素。在今后的研究中,将对这一不足进行改进。另外水质配定的部分指标没有达到道路径流的监测结果,使得对植草沟的调控能力分析不够完善,在今后的研究中,可逐渐完善植草沟对道路地表径流的净化能力研究。

在本研究中植草沟的设计及建立以城市道路地表径流水质、水量为背景,以在城市规划建设中的应用为目的。试验结果证明建立的植草沟可促进道路地表径流的入渗,降低出流量,对城市建设及道路地表径流的控制具有参考价值。试验中发现以《市政道路设计规范》为参考建立的植草沟不能满足对水质的净化作用,流经植草沟后的地表径流水质污染物含量仍然较高,这就要求对植草沟的出流进行进一步的处理或对相关设计规范进行补充完善。

[参 考 文 献]

- [1] Office of Research and Development Washington. The Use of Best Management Practices (BMPs) in Urban Watersheds[M]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [2] Chang C L, Lo S L, Huang S M. Optimal strategies for best management practice placement in a synthetic watershed[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 153(1/2/3/4): 359-364.
- [3] Marla C M, Lee So-young, Lee-Hyung Kim. Long-term monitoring of infiltration trench for nonpoint source pollution control[J]. Water Air Soil Pollut, 2010(212): 13-26.
- [4] Jia Haifeng, Lu Yuwen, Chen Yurong, et al. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic village[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84(9): 112-119.
- [5] 张新鑫. BMPs 技术及其在我国城市绿地中的应用研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
- [6] 许学珍. 北京市流动人口对经济增长影响的实证研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2013.
- [7] Qiu Jane. Urbanization contributed to Beijing storms[J]. Nature, 2012(10): 1038.
- [8] 范旻. 高速城市化进程对北京地区水化学特征的影响及北京水安全评价初探[D]. 北京:首都师范大学, 2009.
- [9] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京城市道路降雨径流监测与分析[J]. 环境化学学报, 2011, 30(10): 1814-1815.
- [10] Yousef Y A, Wanielist M P, Harper H H. Removal of Highway Contaminants by Roadside Swales[R]. Transportation Research Board, Washington DC, 1985.
- [11] 顾孝天, 李宁, 周扬, 等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 1-6.
- [12] 车武, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [13] Richard A, Claytor, Thomas R. Design of Stormwater Filtering Systems[M]. America: The Center for Watershed Protection, 2006.
- [14] 陈兴福, 杨文钰, 刘文昌. 麦冬生长特性及其与产量的相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2006, 31(14): 1141-1143.
- [15] 张书函, 孟莹莹, 陈建刚, 等. 城市机动车道路面初期效应及初期径流弃除量探讨[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(9): 100-104.
- [16] 渤海峰, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 1-5.
- [17] 王健, 尹炜, 叶闯, 等. 植草沟技术在面源污染控制中的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 90-94.
- [18] Mohamed M A K, Lucke T, Boogaard F. Preliminary investigation into the pollution reduction performance of swales used in a stormwater treatment train[J]. Water Science & Technology, 2014, 69(5): 1014-1020.
- [19] 张新颖. 浅草沟系统对城市暴雨径流的控制试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [20] Lee Jungmin, Hyun Kyounghak, Choi Jongsoo. Analysis of the impact of low impact development on runoff from a new district in Korea[J]. Water Science & Technology, 2013, 68(6): 1315-1321.
- [21] Deletic A, Fletcher T D. Performance of grass filters used for stormwater treatment: A field and modeling study[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(3): 261-275.
- [22] 王书吉, 姚兰, 任晓力. 城市沥青道路路面产流规律分析研究[J]. 节水灌溉, 2007(5): 51-53.
- [23] Davis A P, Stagge J H, Jamil E, et al. Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff[J]. Water Research, 2012, 46(20): 6775-6786.
- [24] Chahar B R, Graillot D, Gaur S. Storm Water Management through Infiltration Trenches[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(3): 274-281.
- [25] Liao Zhengliang, He Ying, Huang Fei, et al. Analysis on LID for highly urbanized areas' water logging control: Demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai[J]. Water Science & Technology, 2013, 68(12): 2559-2567.