

第十五届中国水论坛

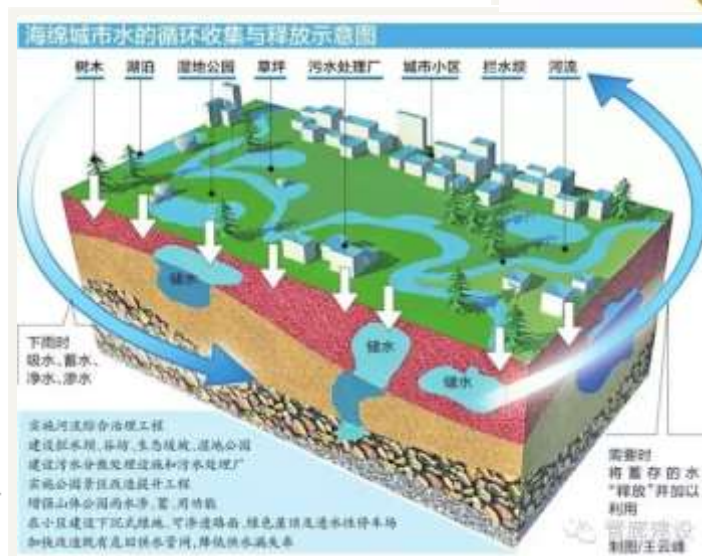
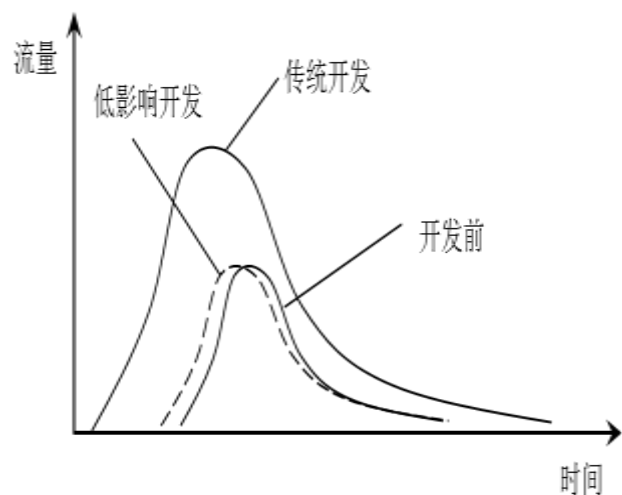
广州市典型社区海绵化改造水文效应研究

华南理工大学黄国如教授

2017年11月 深圳

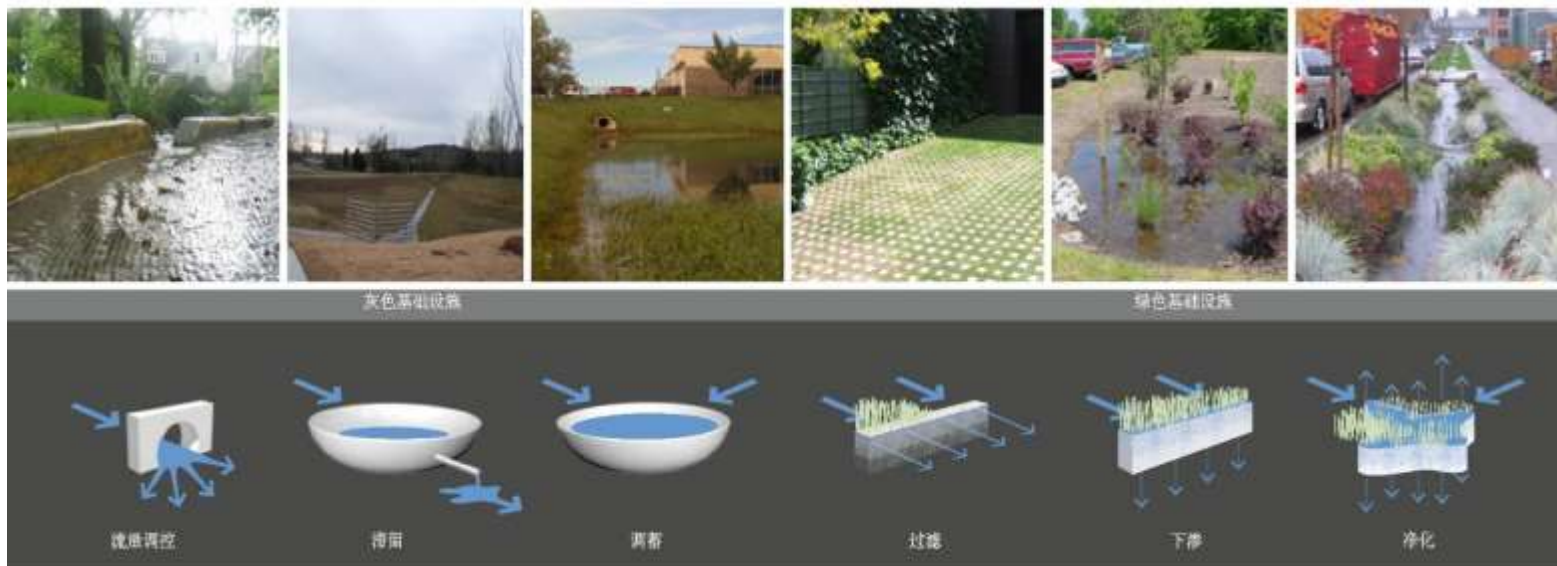
一、低影响开发措施水文效应试验研究

- ✓ 海绵城市建设核心内容是低影响开发雨水利用技术
- ✓ 现代城市雨洪管理，BMP、LID、WSUD、SUDS、GSI





低影响开发雨水利用技术主要通过利用不同设施的不同功能即“渗”、“滞”、“蓄”、“净”、“用”、“排”等，来达到减少外排径流总量、削减洪峰流量、净化雨水水质、改善生态环境、雨水资源化利用等



传统开发

- 转嫁异地
- 快排
- 集中
- 刚性对抗



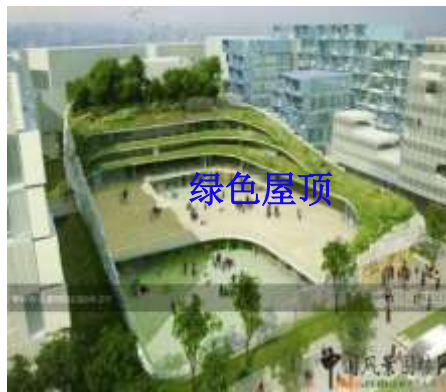
低影响开发

- 原位截留
- 慢下来
- 分散
- 效仿自然，弹性适应
- 网状而非链状

渗：利用各种路面、屋面、地面、绿地，从源头收集雨水



渗透塘



绿色屋顶



透水路面

滞：降低雨水汇集速度，延缓峰现时间，调节时空分布



蓄：降低峰值流量，减少外排径流总量，为雨水入渗利用



下沉式雨水调蓄



利用天然水系调蓄



水景观与雨水调蓄相结合

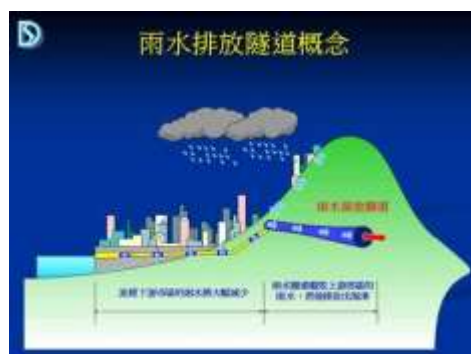
净：通过一定过滤措施减少雨水污染，改善城市水环境



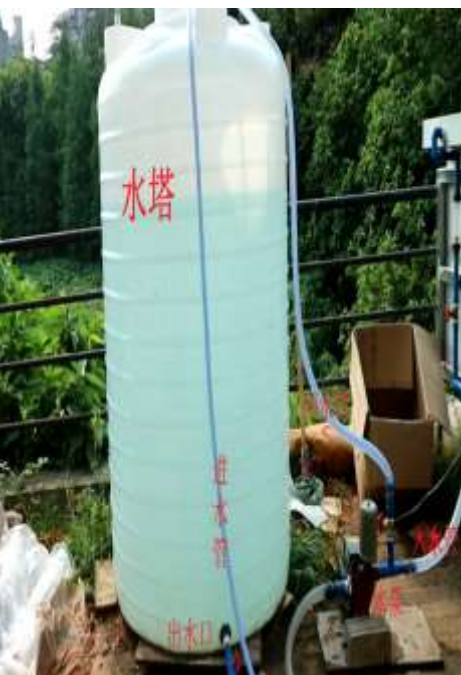
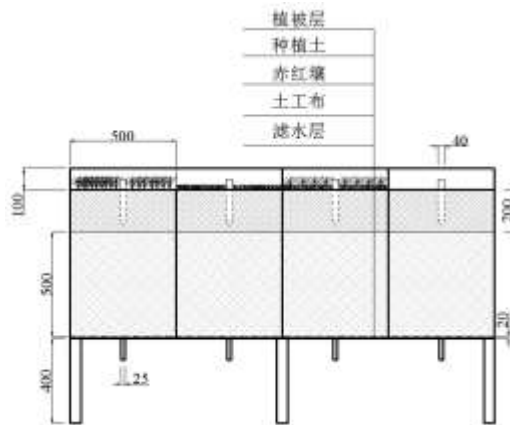
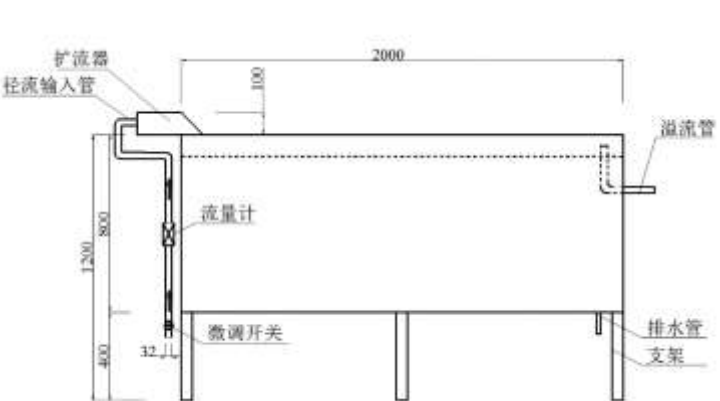
用：利用雨水资源化，缓解水资源短缺，提高用水效率

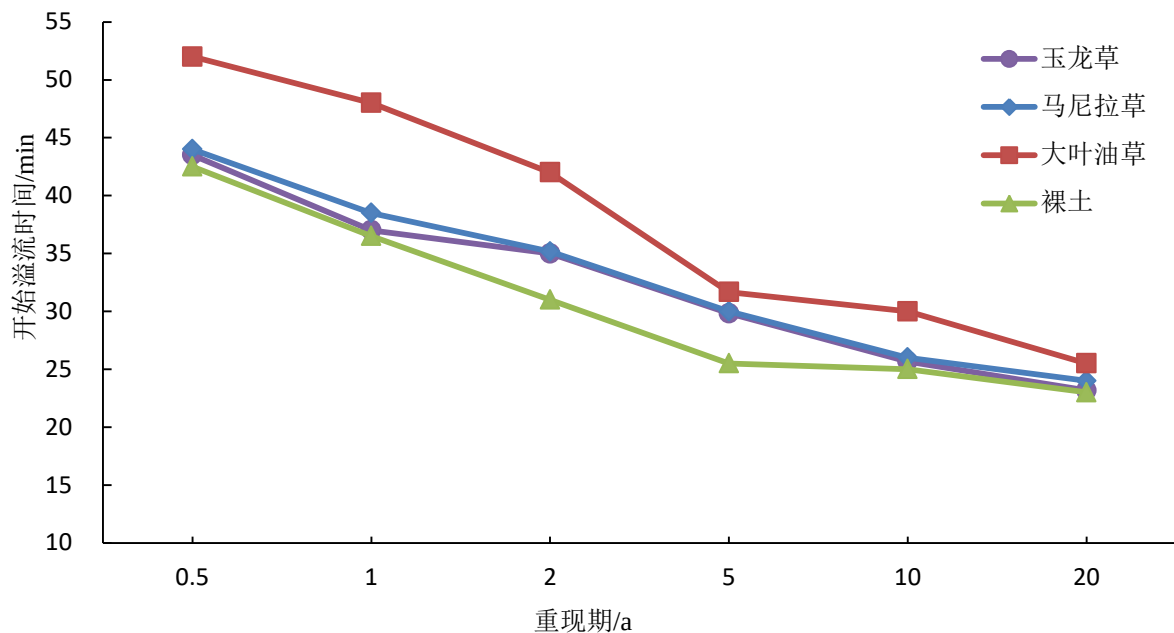


排：构建安全的城市排水防涝体系，避免内涝等灾害确保城市运行安全

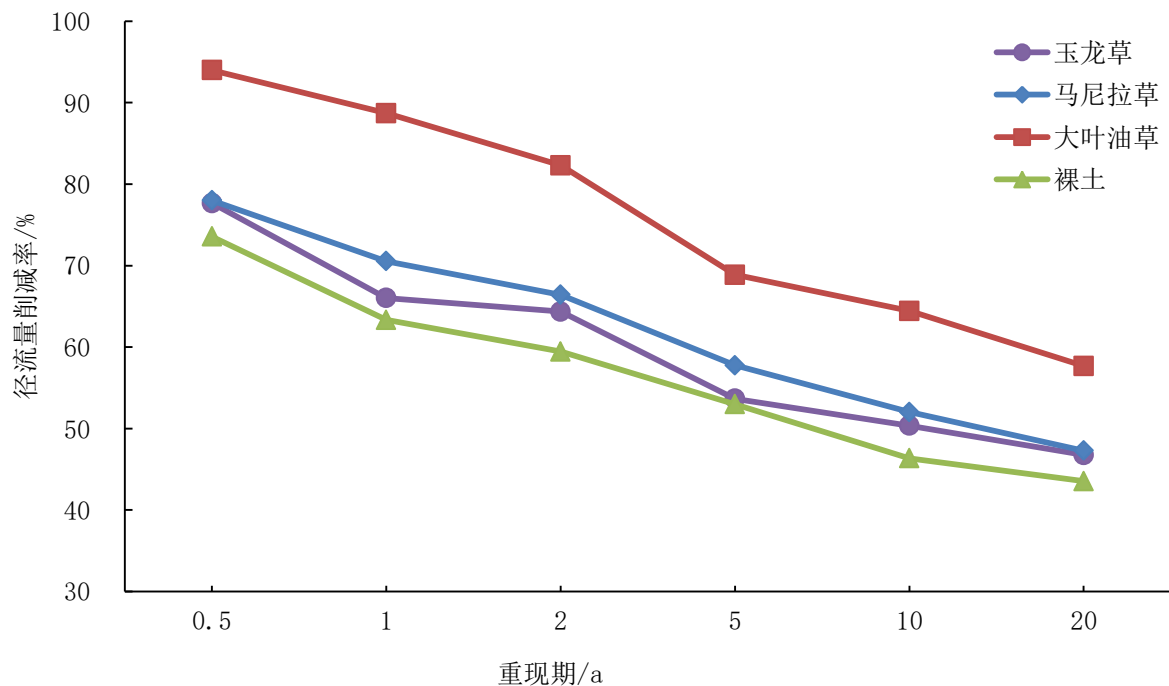


(1) 低势绿地试验





➤ 随着重现期增大，产生溢流时间随之减小，影响因素为土壤渗透系数，裸土没有植物根系松动土壤，表层土渗透系数较小；玉龙草和马尼拉草有较浅根系，表层土渗透系数稍大；大叶油草具有较长根系，表层渗透系数最好

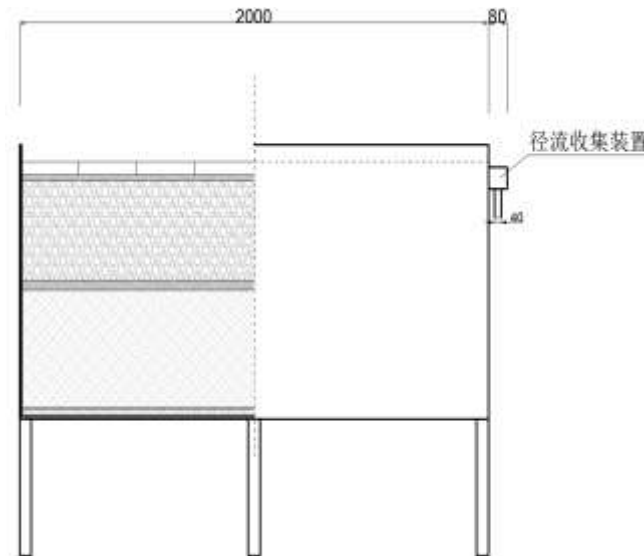
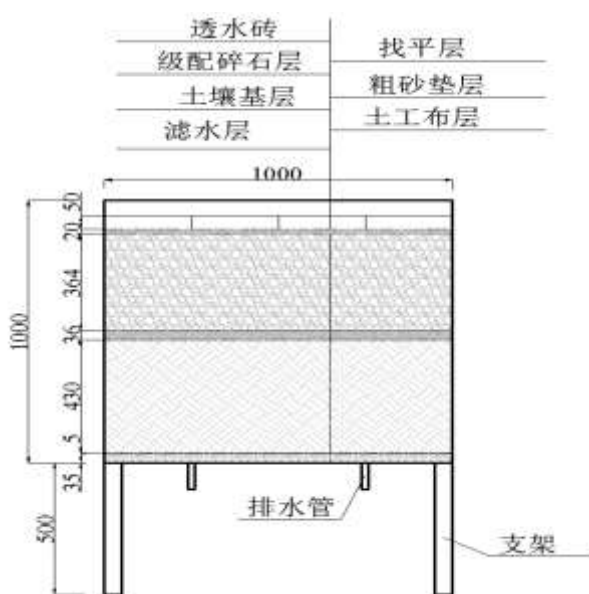


➤ 随着重现期增大，径流量削减率随之减小，影响因素主要为对水的蓄存能力和下渗能力，它们对水蓄存能力一样，但由于不同植物层根系对土松动作用不同，导致其下渗能力也不同

类别		进水总量 (L)	溢流量 (L)	TP	TN	NH ₃ -N	SS	BOD ₅	COD _{cr}
1年一遇	玉龙草	224.45	76.252	75.25	87.31	86.70	83.01	87.62	91.92
	马尼拉草	224.23	66.040	73.49	85.76	81.67	91.09	89.99	93.49
	大叶油草	226.34	25.551	90.86	95.84	94.94	95.50	96.13	97.48
	裸土	224.09	82.182	80.35	83.62	88.46	81.51	86.88	91.76
5年一遇	玉龙草	297.42	137.850	42.89	60.60	54.70	67.53	72.00	75.52
	马尼拉草	295.08	124.658	51.55	64.01	59.27	77.34	77.16	80.67
	大叶油草	296.00	92.151	62.64	79.43	70.41	84.87	83.64	86.91
	裸土	302.00	142.002	40.59	65.14	58.33	66.67	75.91	75.11

低势绿地对雨水径流污染物控制主要取决于溢流出的雨水径流质量即雨水径流控制效果，大叶油草的雨水径流控制效果最强，因此其雨水径流污染物控制效果也最好，马尼拉草、玉龙草、裸土则因为雨水径流控制效果差距不明显，因此其对径流污染削减能力互有强弱，差距不明显

(2) 透水铺装试验



透水铺装试验装置长2000mm、宽1000mm，箱体高度设计为1000mm，并在装置末端设置径流收集装置，透水铺装表层采用透水砖，其厚度为50mm，土壤基层为广州常见的赤红壤，找平层所用材料为粗砂

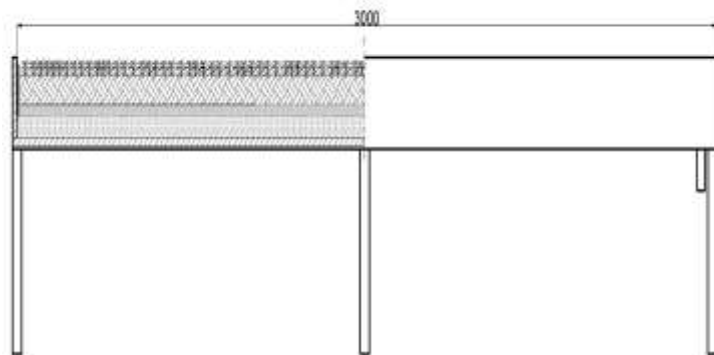
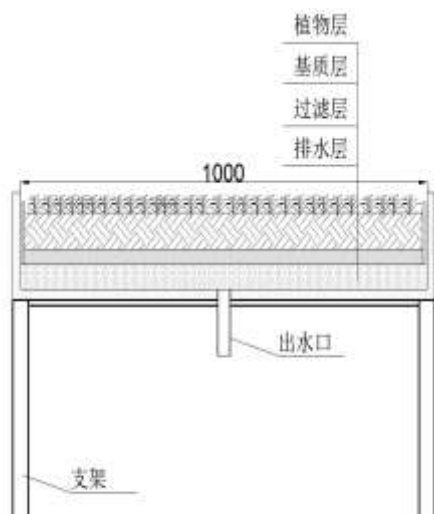
降雨强度等级	小雨	中雨	大雨	暴雨
设定雨强 (mm/h)	20	45	65	95
实际雨强 (mm/h)	17.85	52.50	65	98
降雨总量 (L)	35.70	105.00	130	196.00
径流量 (L)	9.21	63.75	90.202	170.16
径流量削减率 (%)	74.20	39.28	30.61	13.19

随着降雨强度等级增大，透水铺装对雨水径流量削减能力也随之减小，而且随着雨强增大，透水铺装对径流量削减能力下降明显，径流量削减率范围在13.19%~74.20%之间。这是因为透水铺装对雨水径流的削减能力主要取决于其表层的下渗速度和底部的蓄水能力，随着雨强增大，降雨速度快于下渗速度，而下渗能力是有限的，因此随着雨强增大，透水铺装对径流量的削减能力也随之下降

类别		TP	TN	NH ₃ -N	SS	BOD ₅	COD _{cr}
小雨	总负荷 (mg)	112	1300	622	98600	11380	69800
	径流污染物浓度 (mg/L)	0.14	2.02	0.888	53	4.60	6.60
	平均负荷 (mg)	1.29	18.60	8.18	488.13	42.37	60.79
	削减率 (%)	98.849	98.569	98.685	99.505	99.628	99.913
	径流量 (L)	9.210					
大雨	总负荷 (mg)	112	1300	622	98600	11380	69800
	径流污染物浓度 (mg/L)	0.17	4.77	2.48	338	29.9	163
	平均负荷 (mg)	15.33	430.26	223.70	30488.28	2697.04	14702.93
	削减率 (%)	86.31	66.90	64.04	69.08	76.30	78.94
	径流量(L)	90.202					

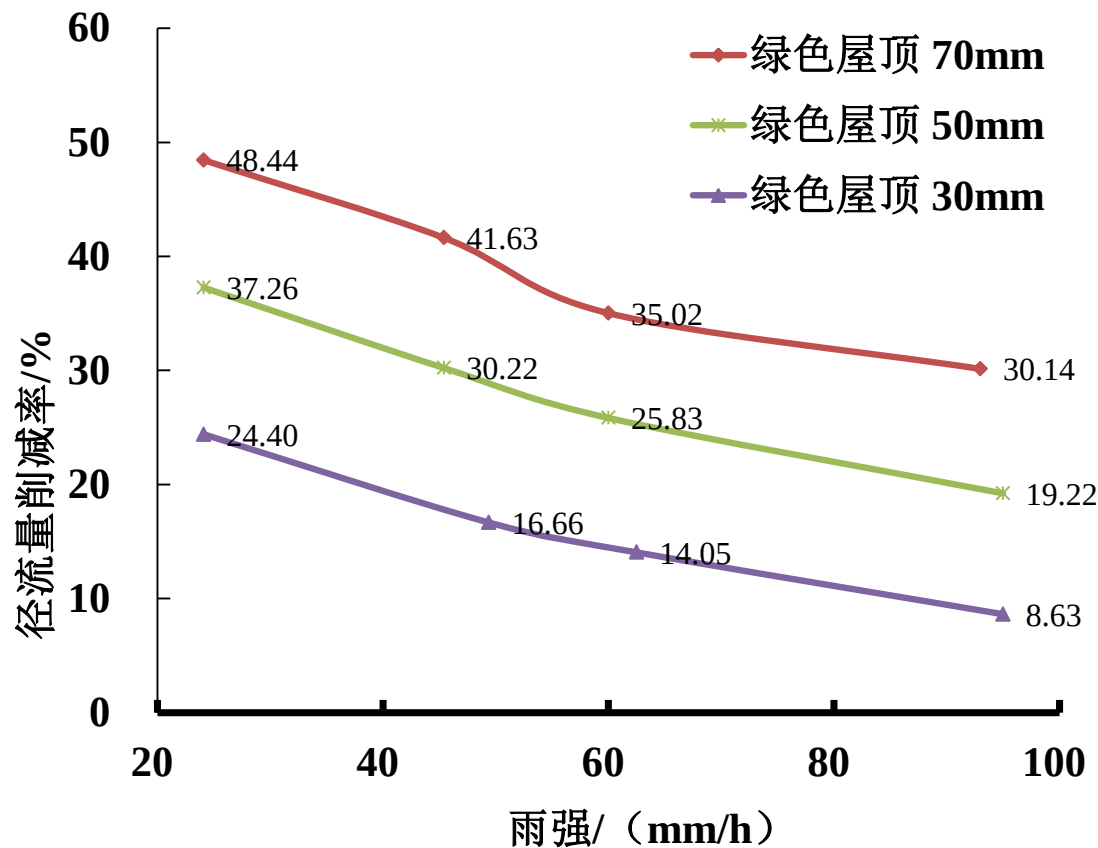
透水铺装对径流污染物削减率达到98%以上，因为小雨时雨力不强，形成的表面径流流速不快，污染物能很好地被透水铺装表面层吸附和截留；大雨时透水铺装对污染物削减能力较小，这是因为大雨时雨力较强，形成的表面径流流速较快，较易将吸附和截留在透水铺装表面层的污染冲刷到径流中，造成透水铺装表面层能够截留和吸附的污染物减少

(3) 绿色屋顶试验



绿色屋顶长3000mm、宽1000mm，在装置末端设置出水口，排水层、过滤层、基质层、植被层，种植基质用城市绿色废弃物再生的立体绿化营养基质，厚度分别为30mm、50mm和70 mm

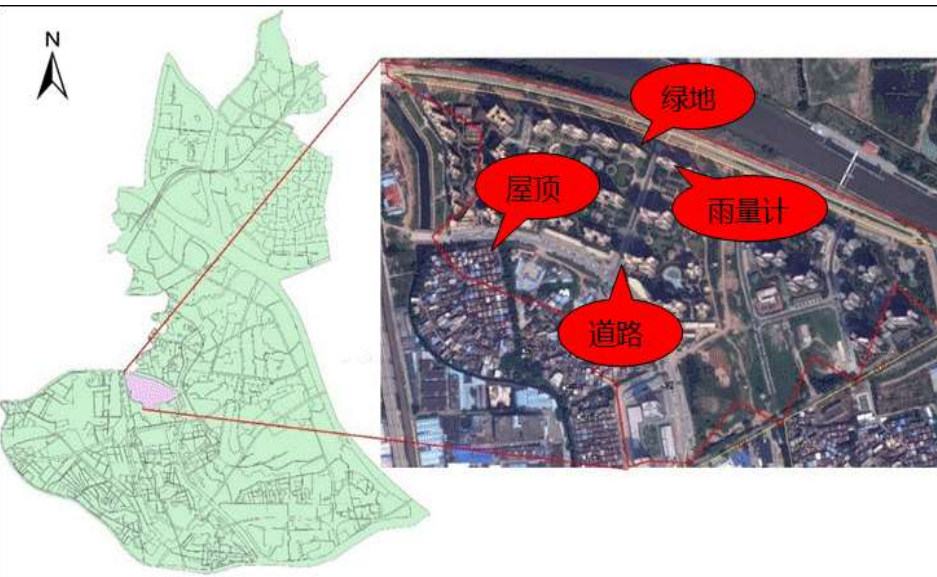




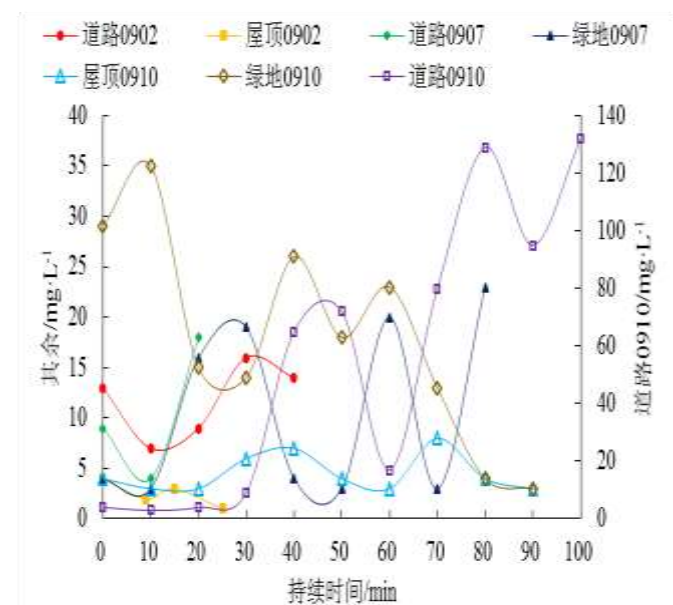
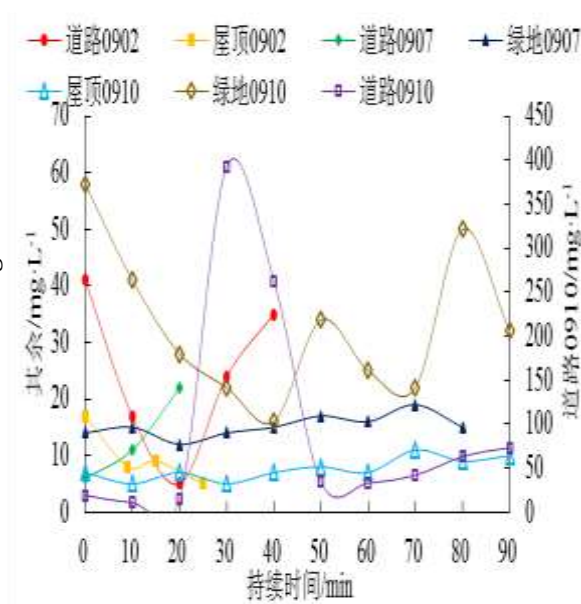
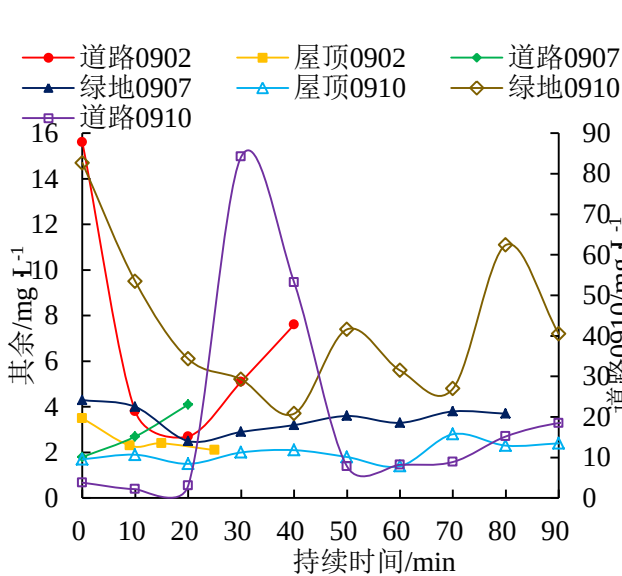
随着降雨强度等级增大，绿色屋顶对径流量的削减率随之减小。在降雨强度在20mm/h~95mm/h，30mm、50mm和70mm基质层的绿色屋顶径流量削减率分别为8.63%~24.40%、19.22%~37.26%和30.14%~48.44%

随着基质层厚度增加，绿色屋顶的径流量削减率也随之增加，这是因为基质层是绿色屋顶削减滞留雨水的重要组成部分，基质层越厚所用材料储水性能越好，则绿色屋顶所能滞留的雨水就越多，但考虑到屋顶的承载能力，绿色屋顶的基质层厚度不是越大越好

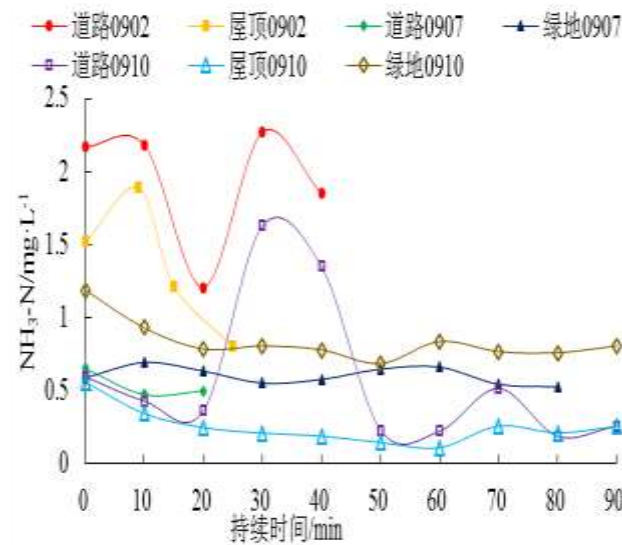
二、城市非点源污染初期冲刷效应



水质	BOD ₅	COD _{cr}	TSS	NH ₃ -N	TN	TP
N/个	52	52	52	52	52	52
V _{max} /(mg/ L)	84.20	393.00	132.00	2.27	3.96	0.26
V _{med} /(mg/ L)	3.75	16.50	8.50	0.62	2.46	0.05
V _{min} /(mg/ L)	1.40	5.00	1.00	0.11	1.35	0.02
$\bar{V}$ /(mg/L)	7.80	33.80	19.80	0.75	2.43	0.08
σ	13.40	63.20	30.10	0.56	0.68	0.06
C _v	1.72	1.87	1.52	0.74	0.28	0.73

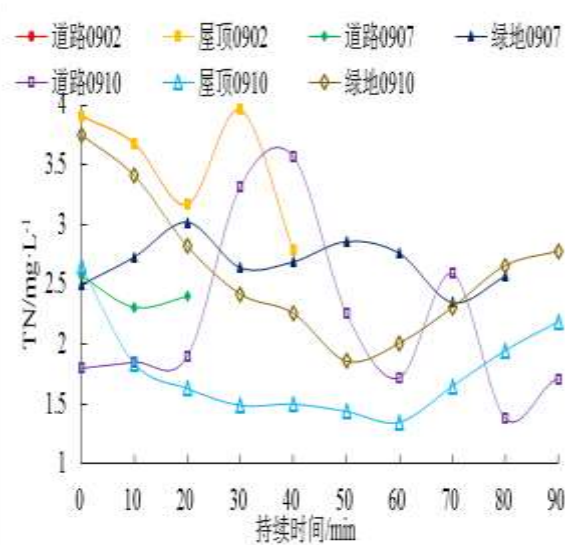


BOD₅



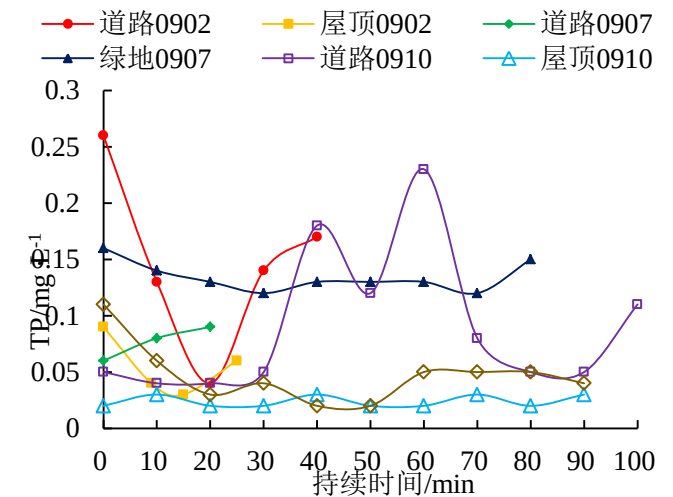
NH₃-N

COD_{cr}



TN

TSS



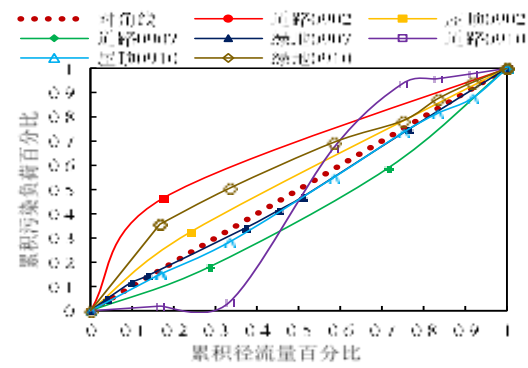
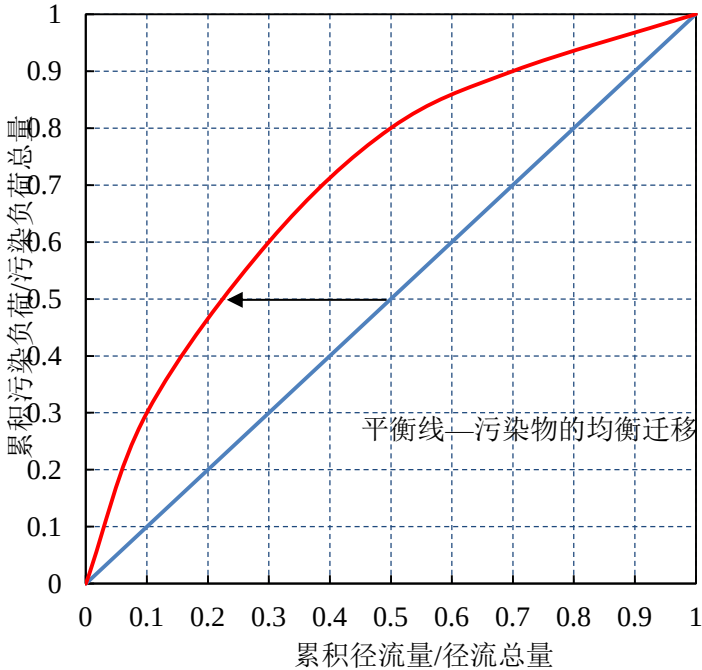
TP

初期冲刷效应分析及量化

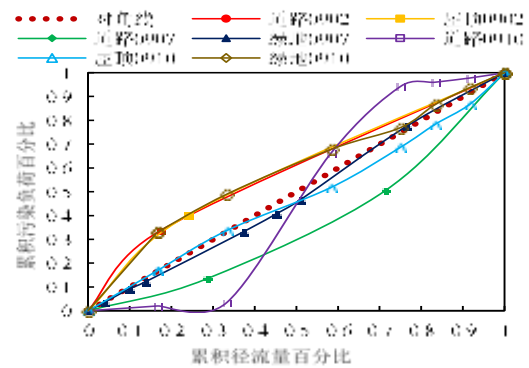
(1) 无量纲累积曲线M(V)

$$\frac{M(t)}{V(t)} = \frac{\int_0^t Q(t)C(t)dt / \int_0^T Q(t)C(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt / \int_0^T Q(t)dt}$$

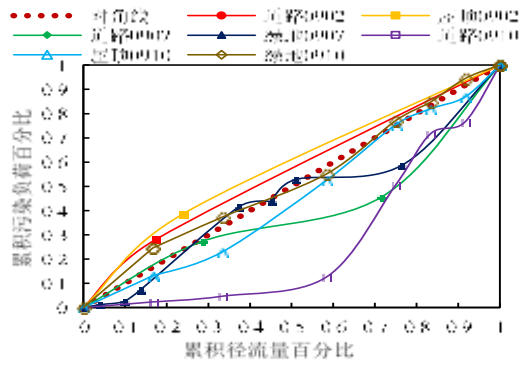
$$\approx \frac{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \bar{C}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \bar{C}(t_i) \Delta t}{\sum_{i=0}^k \bar{Q}(t_i) \Delta t / \sum_{i=0}^n \bar{Q}(t_i) \Delta t}$$



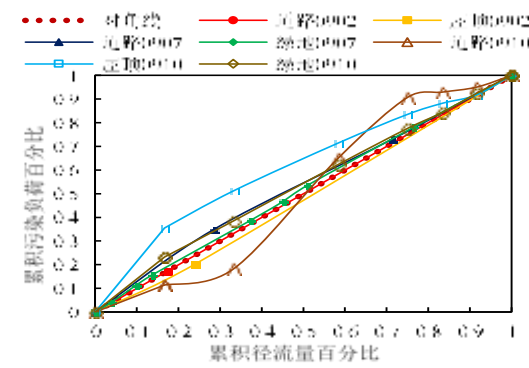
(a) BOD₅



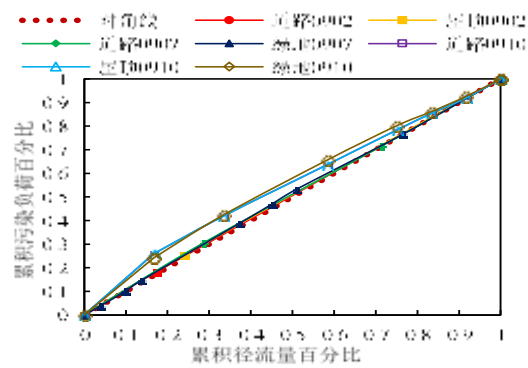
(b) COD_{Cr}



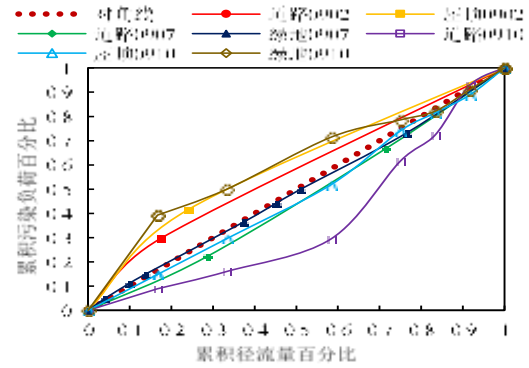
(c) TSS



(d) NH₃-N



(e) TN



(f) TP

(2) 初期冲刷系数 b

$$G = L^b$$

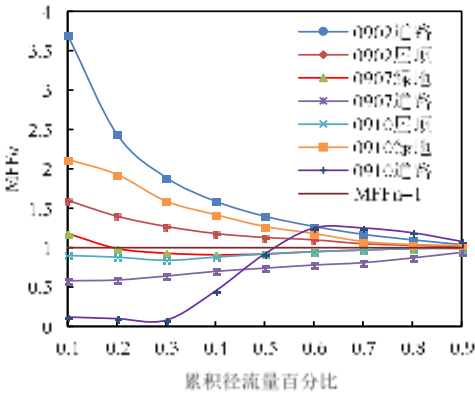
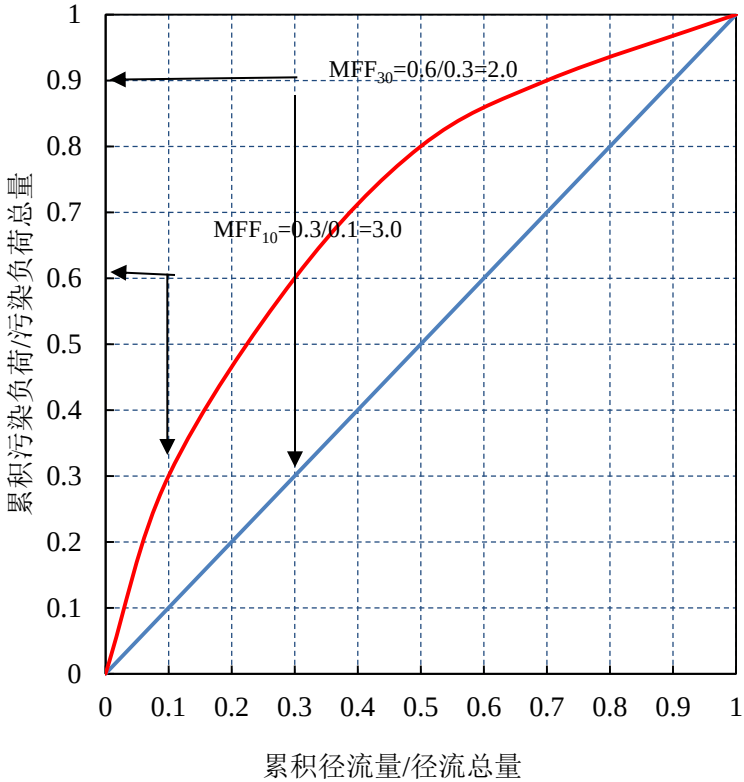
水质指标	降雨日期	道路		屋顶		绿地	
		b	R^2	b	R^2	b	R^2
BOD ₅	2016090	0.4395	1	0.7885	1	—	—
	2016090	1.3483	0.9979	—	—	0.9086	0.9956
	2016091	2.4791	0.9376	1.0566	0.9981	0.5630	0.9952
COD _{cr}	2016090	0.6222	1	0.6393	1	—	—
	2016090	1.5664	0.9938	—	—	1.0272	0.9985
	2016091	2.4791	0.9376	0.9590	0.9966	0.5630	0.9952
TSS	2016090	0.6650	1	0.7255	—	—	—
	2016090	0.9361	0.8597	—	—	1.4562	0.9697
	2016091	2.1092	0.9415	1.1533	0.9910	0.7821	0.9862
NH ₃ -N	2016090	1.0022	1	1.1189	1	—	—
	2016090	0.8317	0.9990	—	—	0.9724	0.9985
	2016091	1.3157	0.9688	0.5697	0.9990	0.8119	0.9989
TN	2016090	0.9715	1	0.9621	1	—	—
	2016090	0.9451	0.9998	—	—	1.0060	0.9993
	2016091	1.2419	0.9957	0.7472	0.9990	0.7918	0.9999
TP	2016090	0.6954	1	0.6156	1	—	—
	2016090	1.2003	1	—	—	0.9262	0.9992
	2016091	1.3440	0.9636	1.0614	0.9985	0.4982	0.9849

➤ TN有71.4%发生初期冲刷效应，其余均有57.1%发生初期冲刷效应

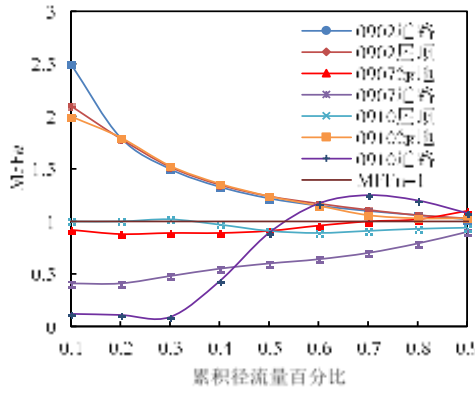
➤ 道路、屋顶和绿地分别有44.4%、66.7%和75%发生初期冲刷效应，降雨过程中道路中车辆持续行驶，不断带来污染物，使道路污染物浓度较高，不易发生初期冲刷效应，绿地由于其下垫面性质较易发生初期冲刷效应

(3) MFF指数量化

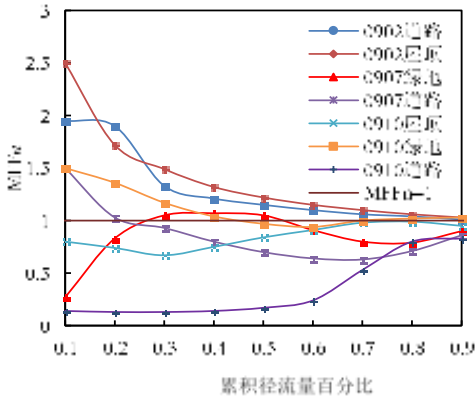
$$MFF_n = \frac{\int_0^t Q(t)C(t)dt / M}{\int_0^t Q(t)dt / V}$$



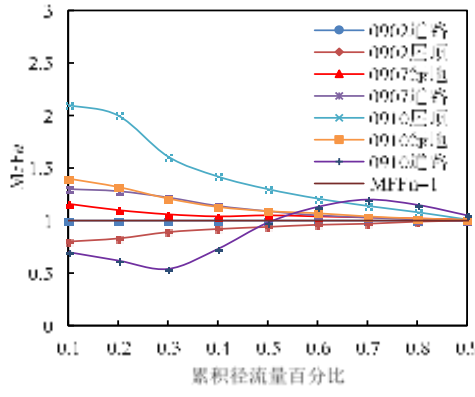
(a) BOD₅



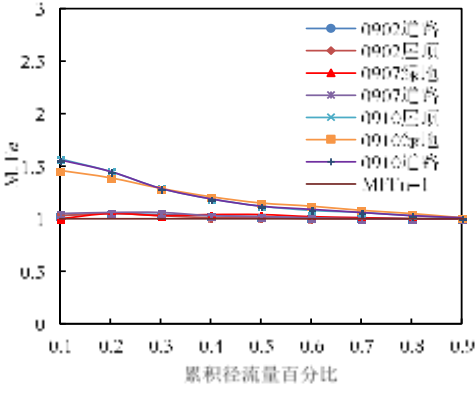
(b) COD_{cr}



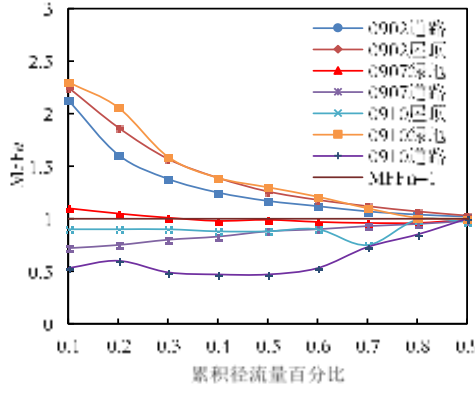
(c) TSS



(d) NH₃-N



(e) TN



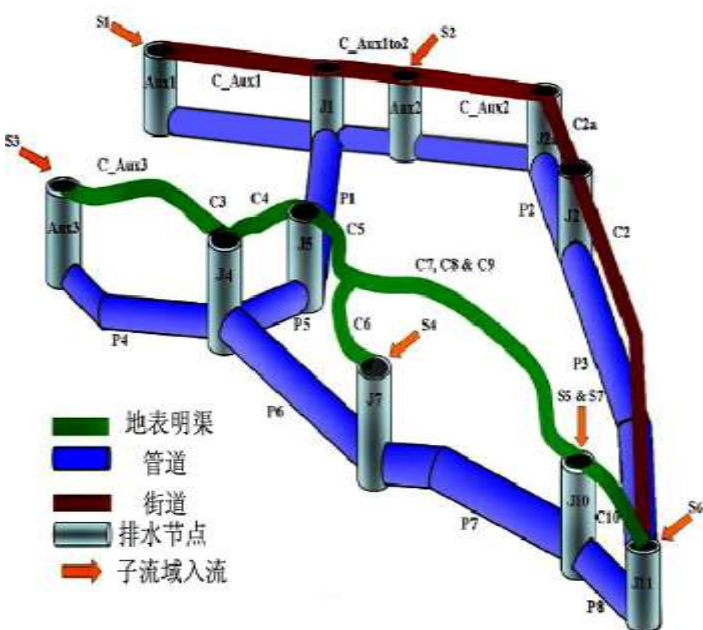
(f) TP

水质指标	降雨日期	道路			屋顶			绿地		
		<i>M</i> 曲线	系数 <i>b</i>	MFF	<i>M</i> 曲线	系数 <i>b</i>	MFF	<i>M</i> 曲线	系数 <i>b</i>	<i>M</i>
BOD ₅	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	○	●	○
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●
COD _{cr}	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	○	○	○
	20160910	○	○	○	○	●	○	●	●	●
TSS	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	●	○	—	—	—	○	○	○
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●
NH ₃ -N	20160902	○	○	○	○	○	○	—	—	—
	20160907	●	●	●	—	—	—	●	●	●
	20160910	○	○	○	●	●	●	●	●	●
TN	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	●	●	●	—	—	—	●	○	●
	20160910	●	○	●	●	●	●	●	●	●
TP	20160902	●	●	●	●	●	●	—	—	—
	20160907	○	○	○	—	—	—	●	●	●
	20160910	○	○	○	○	○	○	●	●	●

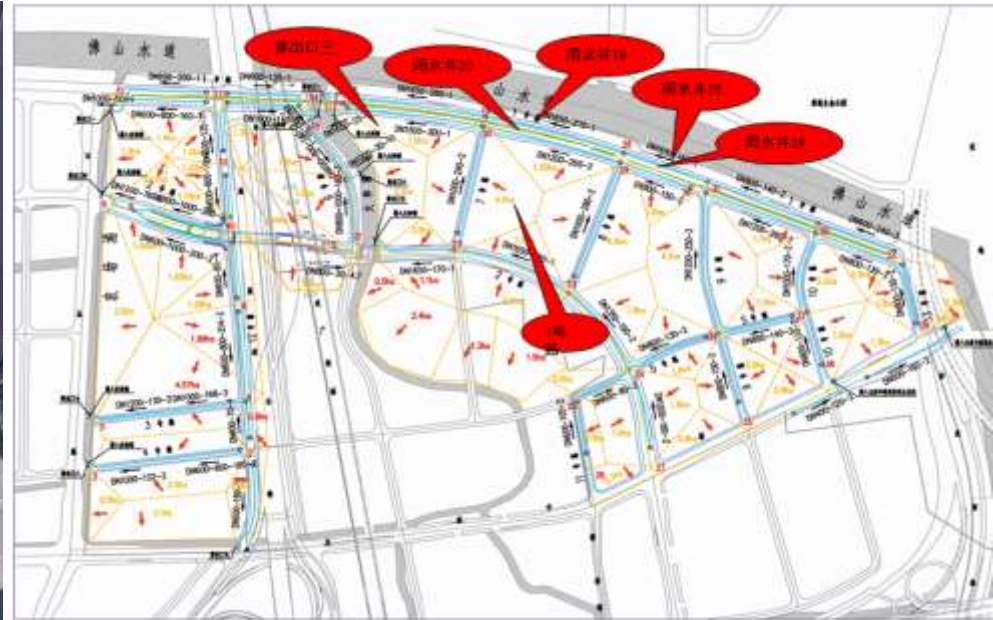
初始冲刷受控于下垫面、最大降雨强度、降雨历时等，不同下垫面和同样下垫面结果皆不同。*M*曲线图法和MFF法结果完全一致，MFF法是在*M*法上而来，可得到定量化结果，采用MFF指数法作为

三、基于PCSWMM海绵化改造水文效应

- PCSWMM模型是CHI以SWMM为核心的水文水动力模型
- 支持1D-2D模型耦合，支持基于开放标准的DEM、GIS和CAD格式及数据，结果表达也比SWMM更直接、形象、便捷，可模拟与暴雨径流相关的水量与水质问题，且包含LID控制模块，能够模拟LID设施对降雨的减缓程度



模型构建及参数率定



研究区域0.43km²，检查井130，2个出口，132个子汇水区

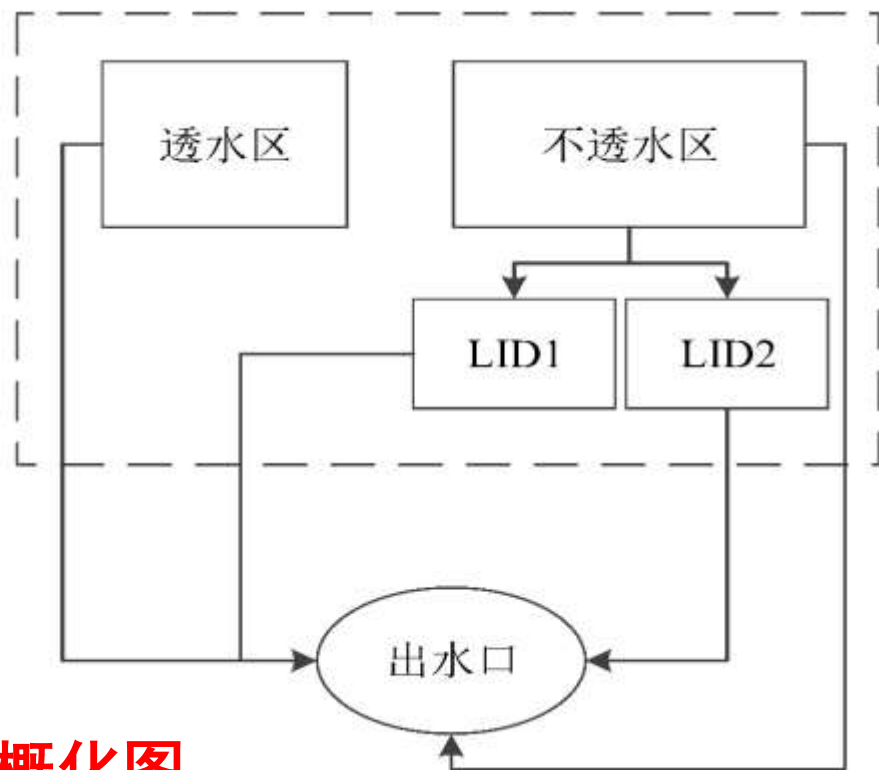
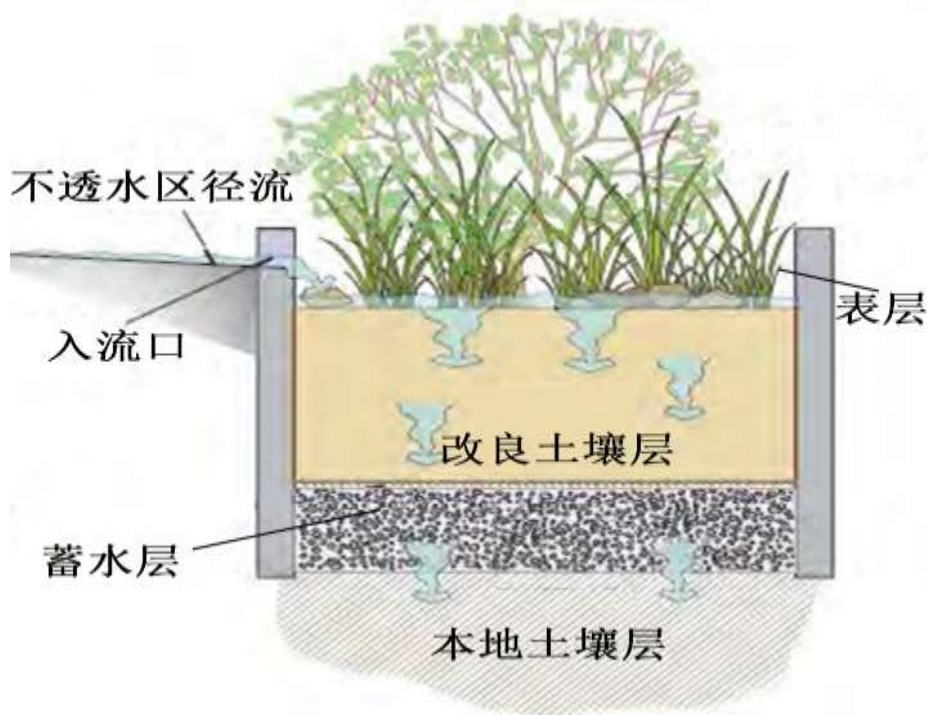
水质参数以最大值、平均值、某时刻瞬时值为条件，误差绝大部分小于10%，模拟精度较高，模型有较好精度和可靠性

$$E = \frac{(C_{\text{sim,max}} - C_{\text{obs,max}})^2 + (C_{\text{sim,avg}} - C_{\text{obs,avg}})^2 + (C_{\text{sim,same}} - C_{\text{obs,same}})^2}{(C_{\text{obs,max}} - \overline{C_{\text{obs}}})^2 + (C_{\text{obs,avg}} - \overline{C_{\text{obs}}})^2 + (C_{\text{obs,same}} - \overline{C_{\text{obs}}})^2}$$

水质指标	数据类型	道路				屋顶				绿地		
		20160907		20160910		20160902		20160910		20160907		20160902
		实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测
BOD ₅	最大值	4.10	4.20	19.20	19.15	3.50	2.80	2.80	2.87	4.30	4.00	14.70
	平均值	2.87	1.70	9.65	7.83	2.58	1.83	1.99	1.95	3.48	2.70	7.53
	同时刻	1.80	1.71	8.20	9.40	2.30	2.80	1.70	1.49	4.30	4.00	9.50
	E	10.8		2.3		10.4		0.7		2.6		
COD _{cr}	最大值	22.00	25.600	74.00	75.77	9.00	11.00	11.00	10.60	19.00	22.60	58.00
	平均值	13.00	15.00	40.30	40.25	7.33	7.00	7.60	8.09	15.20	11.20	32.80
	同时刻	11.00	11.80	33.00	26.00	5.00	5.16	8.00	7.55	15.00	14.40	41.00
	E	5.3		1.6		5.0		0.5		6.4		
TSS	最大值	18.00	25.00	132.0	126.20	4.00	4.75	8.00	7.80	23.00	29.00	35.00
	平均值	10.33	9.80	55.50	53.50	3.00	2.86	5.00	5.60	10.60	11.60	18.00
	同时刻	18.00	23.00	65.00	52.80	4.00	4.28	6.00	5.67	4.00	4.42	14.00
	E	17.0		1.9		2.6		0.8		15.7		
NH ₃ -N	最大值	0.653	0.750	1.630	1.060	0.890	0.590	0.562	0.623	0.696	0.930	1.190
	平均值	0.543	0.260	0.550	0.650	0.610	0.380	0.256	0.251	0.605	0.760	0.837
	同时刻	0.653	0.698	0.431	0.400	0.220	0.270	0.212	0.205	0.590	0.570	0.932
	E	12.7		1.1		27.9		2.4		11.0		
TN	最大值	2.57	3.02	3.57	3.52	2.74	2.54	2.65	2.56	3.02	3.38	3.75
	平均值	2.43	1.58	2.15	1.70	2.51	2.24	1.77	1.89	2.68	2.59	2.63
	同时刻	2.57	2.66	2.26	2.10	2.55	2.54	1.65	1.67	2.50	1.89	2.82
	E	7.5		2.2		0.9		0.4		3.8		
TP	最大值	0.090	0.090	0.230	0.229	0.040	0.030	0.030	0.028	0.160	0.210	0.110
	平均值	0.076	0.080	0.091	0.095	0.035	0.020	0.024	0.025	0.134	0.130	0.047
	同时刻	0.080	0.080	0.120	0.100	0.030	0.030	0.030	0.027	0.160	0.110	0.040
	E	0.3		1.4		14.2		0.9		11.6		
(%)												

LID计算原理

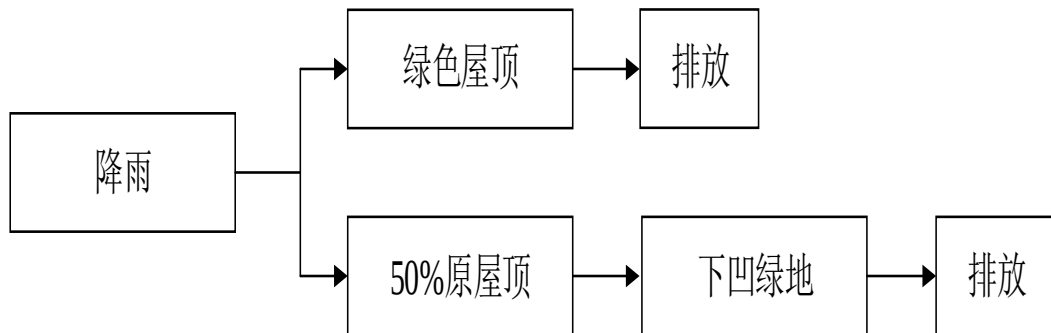
PCSWMM根据各种LID措施原理，将其概化为7种LID措施：生物滞留池、下渗沟槽、透水铺装、雨水桶、植草沟、雨水花园和绿色屋顶，每种措施含有不同的“层”，每个层之间根据水量平衡方程计算各层的特征值，如水深、土壤持水率等



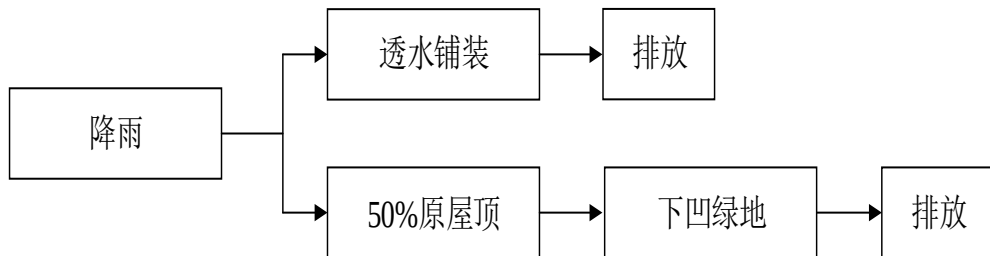
生物滞留池概化图

LID组合措施方案设计

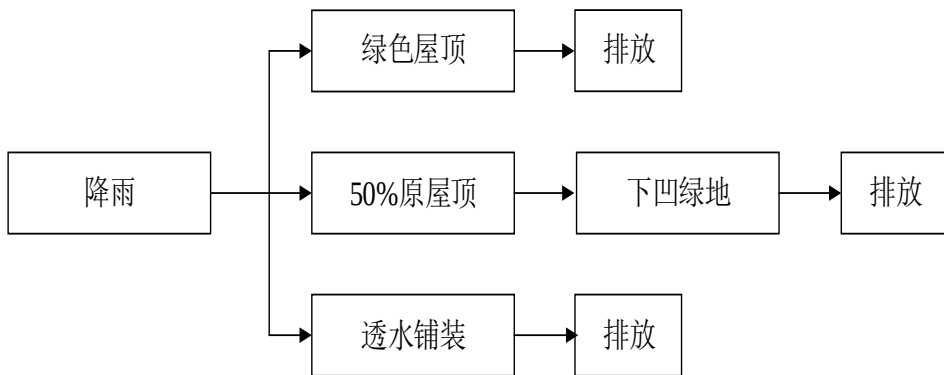
方案A



方案B



方案C



参考相关文献及各地区低影响开发手册，选取下垫面的50%改造为对应的低影响开发措施，分析各种方案情况下LID措施的效果

0.5年一遇2小时模拟结果

LID 布设方案	排水口	流量/(m ³ /s)	BOD ₅	COD _{cr}	TSS	NH ₃ -N	TN	TP
LID 添加前	#1	3.35	105.58	261.01	185.78	6.55	12.04	0.28
	#2	2.41	82.69	169.24	146.73	4.02	8.37	0.27
方案 A	#1	1.96	123.66	312.58	199.16	7.62	13.73	0.27
	#2	0.94	72.51	167.58	155.45	4.01	8.34	0.21
方案 B	#1	1.33	115.24	270.63	172.56	5.82	10.74	0.24
	#2	0.69	62.96	150.96	155.03	3.98	8.21	0.18
方案 C	#1	1.26	117.29	275.68	173.61	5.90	10.85	0.24
	#2	0.56	56.99	142.87	152.53	3.75	7.82	0.18

- 方案A、方案B、方案C流量均小于LID添加前，说明均对流量明显削减，方案C为方案A与方案B组合，效果优于方案A与方案B，方案B削减效果优于方案A
- 在计算污染物冲刷时，不区分LID区域和非LID区域，直接采用子汇水区全部径流量和面积计算冲刷所产生的污染物，故添加LID后用于计算冲刷污染物的径流量增大，导致设置了LID措施的出水口污染物浓度峰值有可能高于未设置LID措施的出水口污染物浓度峰值，或者多添加高于未添加该项LID措施

LID布设方案	设计重现期/年	径流量	BOD ₅	COD _{cr}	TSS	NH ₃ -N	TN	TP
方案A	0.5	45.96	38.02	33.71	33.91	37.66	40.48	50.20
	1	45.26	35.15	31.81	29.51	35.75	37.87	50.16
	2	44.25	30.83	28.89	23.62	33.00	34.10	49.61
	5	43.35	24.20	24.60	16.48	29.69	29.10	48.45
	10	42.85	19.06	21.30	12.27	27.61	25.57	47.54
	20	41.96	14.15	17.89	9.09	25.57	22.07	46.04
方案B	0.5	63.36	53.22	54.44	47.61	47.89	51.48	69.02
	1	61.66	48.11	49.93	41.60	44.80	47.74	67.85
	2	59.52	41.91	44.45	33.72	40.86	42.80	66.14
	5	57.50	33.27	37.33	23.91	36.23	36.44	63.71
	10	55.95	26.42	31.99	17.61	33.18	31.65	61.93
	20	54.48	19.98	26.96	12.90	30.61	27.28	59.91
方案C	0.5	64.77	56.93	57.44	51.20	51.91	55.29	71.37
	1	63.68	52.53	53.44	45.47	49.14	51.99	70.42
	2	62.03	46.88	48.38	37.60	45.17	47.19	69.03
	5	60.53	38.37	41.50	27.49	40.30	40.76	67.22
	10	59.65	31.48	36.32	20.94	37.29	36.13	65.61
	20	58.27	24.35	30.98	15.39	34.43	31.35	63.72

➤ 当采用方案A、B、C，削减率随重现期增大而减小

➤ 削减率方案C>B>A



恳请各位同行批评指正！