



城市面源和径流污染 控制技术评价研究

北京林业大学

杨贝贝 黄凯 孙德智

汇报提纲

01

城市面源和径流污染现状及研究进展

02

城市面源和径流污染控制技术分析

03

城市面源和径流污染控制技术评价研究
—基于多准则群体决策模型

04

案例研究



01

城市面源和径流污染现状及研究进展

PART ONE



≠



我国目前面源污染负荷占整个负荷二分之一以上。

据美国、日本等国的报道，即使在点源污染全面控制（达到零排放）之后，其江河的水质达标率仅为65%，湖泊的水质达标率为42%，海域的水质达标率为78%。



城市化进程使城市不透水下垫面迅速增加。降雨冲刷引起的城市面源和径流污染已成为接纳水体污染的主要来源之一。



研究表明：

- **城市地表径流污染负荷相当于污水处理厂排放的污染负荷。**
- **地表径流中TSS、重金属及碳氢化合物浓度数量级与未经处理城市污水基本相同。**

表 1 国内外城市面源主要污染物浓度

城市	SS(mg/L)	COD(mg/L)	TP(mg/L)	TN(mg/L)
兰州	750.5	337.67	1.16	6.15
北京	734	582	1.74	11.2
武汉	350-650	60-110	0.3-0.53	4.9-6.04
美国	78.4	52.8	0.32	0.66
我国地表水环境 质量V类标准	150	40	0.4	2

与美国相比，我国城市面源主要污染物浓度偏高，且远高于地表V类。说明我国城市面源污染非常严重。

北京：SS、COD、TP、TN超标倍数分别为**3.89**、**13.55**、**3.35**和**15.97**，

表2 我国城市路、屋面雨水径流污染物浓度 (mg/L)

	路面					屋顶				
	SS	COD	BOD	TP	TN	SS	COD	BOD	TP	TN
南方城市均值(mg/L)	572.08	316.27	71.11	8.59	0.85	56.82	39.16	18.62	4.22	0.26
北方城市均值(mg/L)	436.01	238.67	39.29	6.65	0.64	148.53	203.94	72.14	8.67	0.49
特大城市均值(mg/L)	552.36	310.94	—	8.17	0.76	102.68	123.12	—	6.98	0.37
中等城市均值(mg/L)	340.03	199.13	—	6.04	0.89	—	25.53	—	3.48	0.39

我国城市道路与屋面污染具有如下地域特征：

- 路面和屋面径流污染程度：特大城市高于中等城市；
- 南方城市路面径流污染物浓度高于北方城市；
- 北方城市屋面径流污染物浓度高于南方城市。

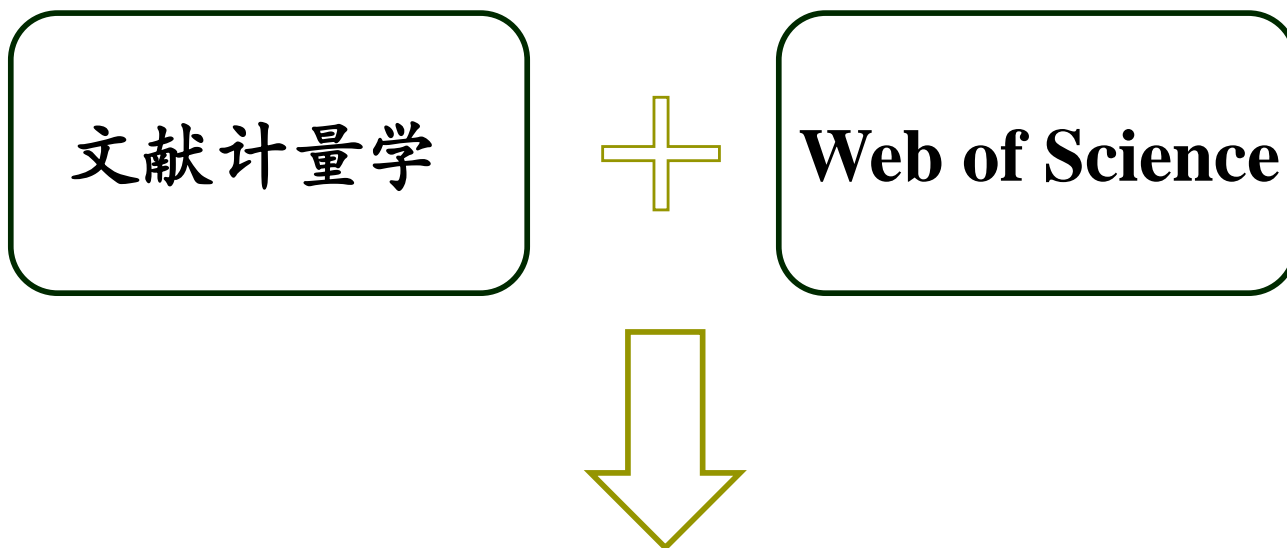
表3 上海中心城区降雨径流污染物浓度 (mg/L)

功能区	TSS	COD	TP	NH ₃ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N
交通区	1731.355	748.705	1.005	2.185	0.605	0.33
商业区	699.875	448.25	0.87	2.58	0.405	0.11
工业区	580.905	256.53	0.555	1.29	0.48	0.13
居民区	430.72	150.415	0.425	0.865	0.425	0.24

四个不同功能区地表径流污染物浓度：

交通区»商业区>工业区>居民区

面源和地表径流污染方面的文献调研



1991-2015: 2607篇

国家、机构、关键词等分析

表4 发文量前10的国家文章数据分析

Country	TP	R(%)	h-index
USA	630	1(25.37)	58(1)
UK	424	2(17.08)	40(2)
China	394	3(15.87)	30(3)
Germany	141	4(5.68)	26(6)
Canada	116	5(4.67)	27(4)
France	114	6(4.59)	26(5)
Australia	82	7(3.30)	21(10)
Spain	81	8(3.26)	22(9)
Italy	79	9(3.18)	24(7)
Japan	77	10(3.10)	18(12)

TP: the number of total publications,

R(%): rank and percentage of total publications

表 5 发文量前20的机构文章数据分析

Institute	TP	R(%)	h-index
Chinese Acad Sci, China	136	1(5.48)	21
Beijing Normal Univ, China	72	2(2.90)	16
USDA ARS, USA	62	3(2.50)	20
Univ Lancaster,UK	47	4(1.89)	19
Univ Calif Davis,USA	26	5(1.05)	13
Swedish Univ Agr Sci,Sweden	25	6(1.01)	12
US EPA, USA	25	7(1.01)	11
INRA, France	24	8(0.97)	13
Cornell Univ,USA	22	9(0.89)	14
Aarhus Univ,Denmark	20	10(0.81)	10

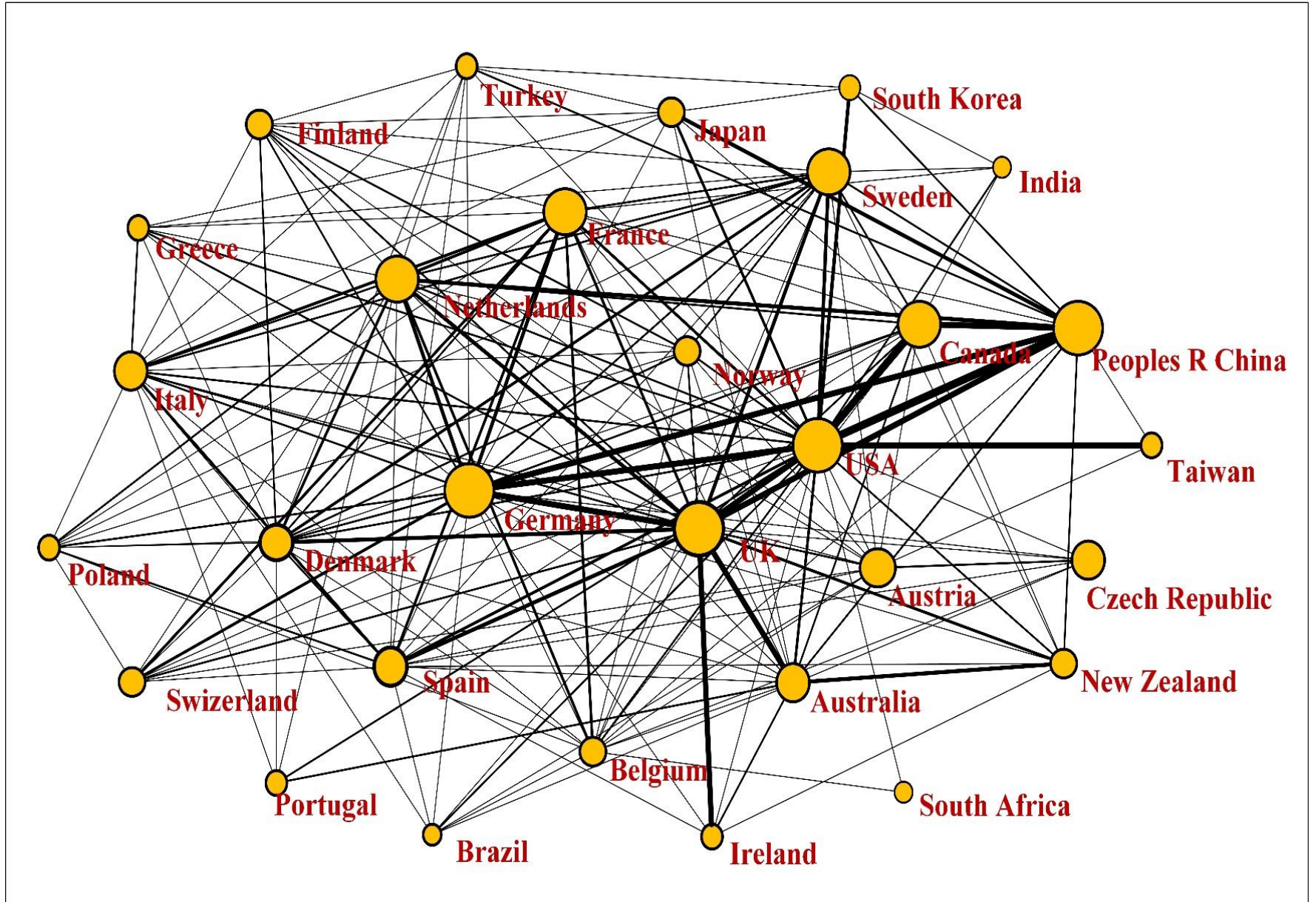
TP: number of total publications,

R(%): rank and the percentage of total publications

表 6 1991-2015年关键词分析

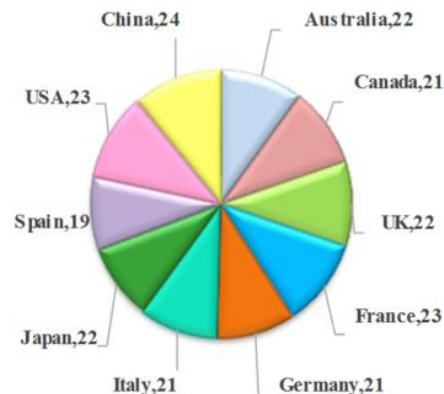
1991-1995		1996-2000		2001-2005		2006-2010		2011-2015	
keyword	frequency	keyword	frequency	keyword	frequency	keyword	frequency	keyword	frequency
management	12	model	46	model	123	model	163	model	197
agriculture	11	agriculture	38	managemen t	67	managemen t	99	nitrogen	148
nitrogen	11	management	33	nitrogen	65	river	90	phosphorus	133
phosphorus	11	groundwater	30	phosphorus	58	runoff	84	river	111
groundwater	11	nitrogen	27	runoff	54	agriculture	81	agriculture	103
system	10	runoff	26	agriculture	52	nitrogen	81	managemen t	92
nutrient	9	watershed	24	river	47	nutrient	68	runoff	89
river	8	phosphorus	23	sediment	45	phosphorus	68	soil	88
model	7	nitrate	21	GIS	43	nitrate	63	sediment	86
pesticide	7	sediment	21	watershed	42	sediment	63	nutrient	85
GIS	6	urban	21	nitrate	39	soil	63	watershed	85
eutrophication	5	GIS	19	nutrient	39	watershed	63	land	77
flow	5	river	19	soil	33	land	58	load	67
nitrate	5	soil	17	catchment	32	catchment	52	SWAT	58

发文量前30的国家/地区合作分析



发文量前10的国家关键词共现情况

stormwater	Australia	USA								
SWAT	Canada	Italy	China							
system	France	Japan	Spain	China						
flow	Japan	UK	USA	China						
GIS	Germany	Italy	UK	USA						
BMPs	France	Germany	Italy	USA						
pesticide	France	Germany	Japan	Spain						
monitoring	Australia	France	Italy	Japan						
watershed	Australia	Canada	France	Japan	USA	China				
load	Australia	Canada	France	Italy	Japan	China				
wetland	Australia	Canada	France	Spain	UK	USA	China			
sediment	Australia	Canada	France	Japan	Spain	UK	USA	China		
utrophication	Canada	France	Germany	Japan	Spain	UK	USA	China		
nitrate	Canada	France	Germany	Italy	Spain	UK	USA	China		
assessment	Australia	France	Germany	Italy	Japan	UK	USA	China		
urban	Australia	Canada	Germany	Italy	Japan	UK	USA	China		
catchment	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Spain	UK	China		
heavy metal	Australia	Canada	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	China		
groundwater	Australia	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA		
land use	Australia	Canada	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China	
runoff	Australia	Canada	France	Germany	Japan	Spain	UK	USA	China	
river	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Spain	UK	USA	China	
phosphorus	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	UK	USA	China	
nitrogen	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China
agriculture	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China
management	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China
soil	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China
nutrient	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China
model	Australia	Canada	France	Germany	Italy	Japan	Spain	UK	USA	China



研究成果

Mapping the scientific research on non-point source pollution: A bibliometric analysis.

Environmental Science and Pollution Research, 2016,



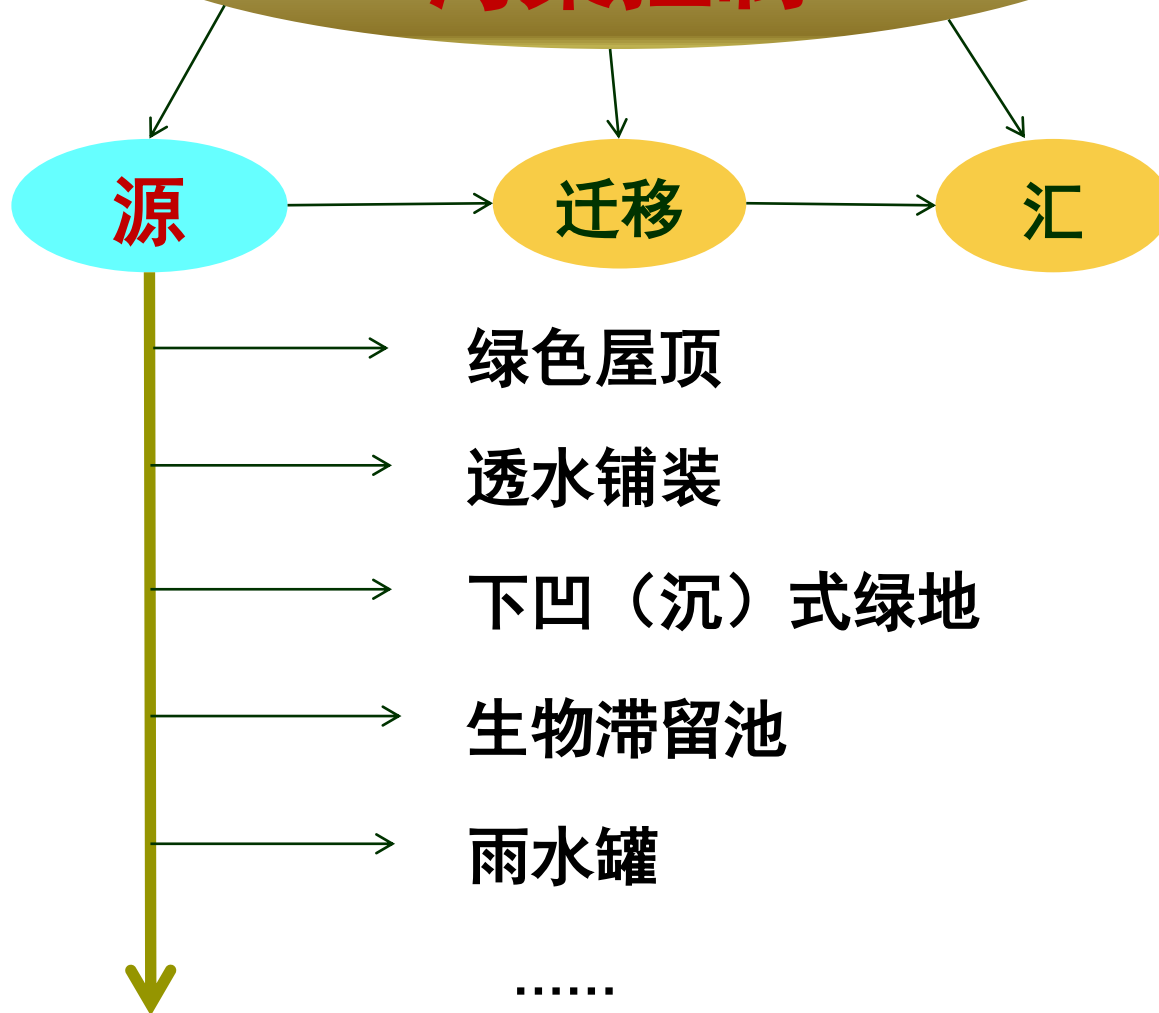


02

城市面源和径流污染控制技术分析

PART TWO

城市面源和径流 污染控制





绿色屋顶



透水铺装

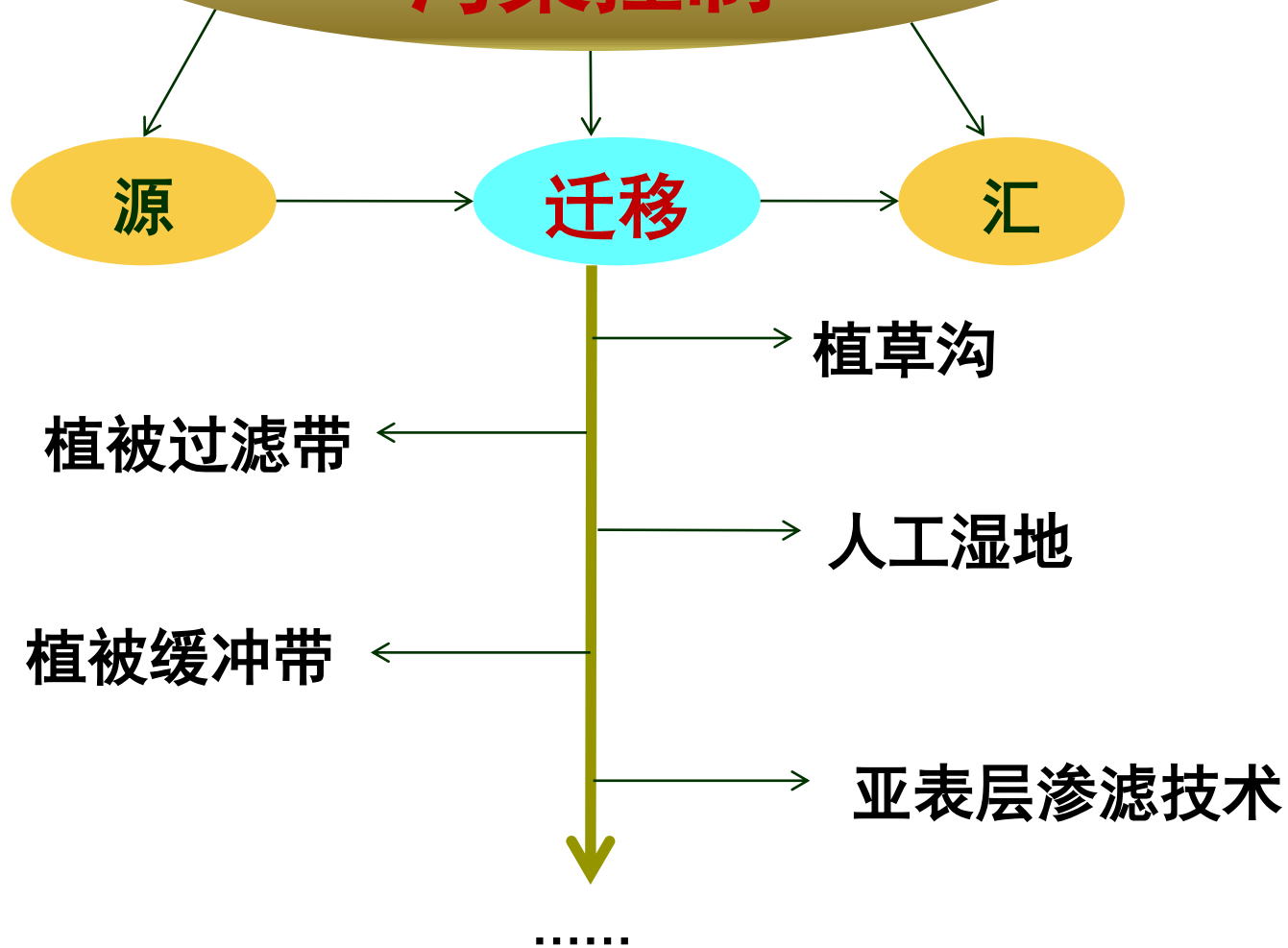


下凹式绿地



生物滞留槽

城市面源和径流 污染控制





植草沟（植被浅沟）



植被过滤带

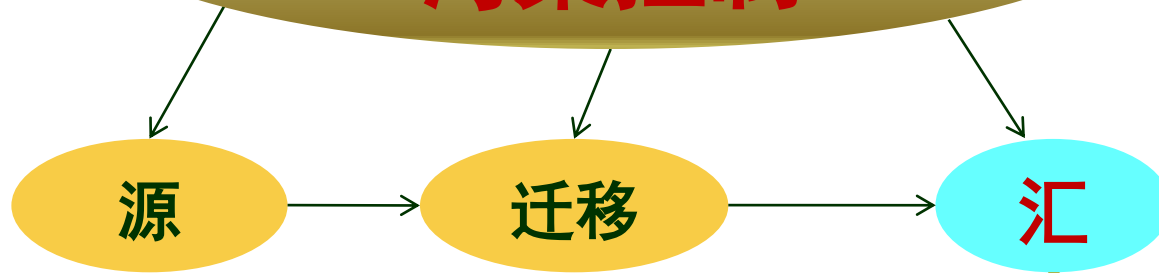


植被缓冲带



人工湿地

城市面源和径流 污染控制

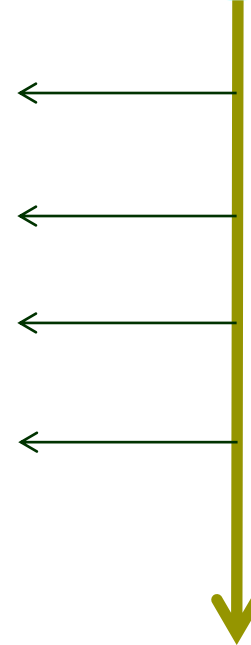


干式滞留池

湿式滞留池

生态护岸

控污型岸边带系统





干式滞留池



湿式滞留池



生态护岸



控污型岸边带系统

城市低影响开发技术

渗透技术：透水铺装、
绿色屋顶、
渗透塘、
渗井等

调节技术：调节池、
调节塘

转输技术：植草沟、
渗管/渠

储存技术：湿塘、
雨水湿地、
蓄水池、
雨水罐

截污净化技术：
植被缓冲带、
人工土壤渗滤等

表 7 控制技术特点 (1)

技术名称	适用性	优点	缺点	建造费用	维护费用
绿色屋顶	建筑与小区	有效减少屋面径流总量和径流污染负荷, 节能减排	对屋顶荷载、防水、坡度、空间条件等有严格要求。	高	高
透水铺装	建筑小区、道路、绿地与广场	适用区域广、施工方便, 补充地下水、峰值流量削减、雨水净化作用	易堵塞, 寒冷地区有被冻融破坏的风险。	中	中
下沉式绿地	建筑小区、道路、绿地与广场	适用区域广, 建设和维护费用均较低	大面积应用时, 易受地形等条件的影晌, 实际调蓄容积较小。	低	低
雨水罐	建筑小区	雨水罐多为成型产品, 施工安装方便, 便于维护。	但其储存容积较小, 雨水净化能力有限。	低	低
入渗沟	建筑小区	削减地表径流、有效削减污染物、占地面积小、适用性广、回补地下水、具有景观效果。	处理径流能力有限、对土壤条件要求高、易堵塞、运行维护繁琐, 费用高。	中	高/中
植草沟	建筑小区、道路、绿地与广场	建设及维护费用低, 易与景观结合	选址约束性大、对当地地下水是潜在污染源、易造成蚊蝇滋生。	较高	中
植被过滤带	道路、停车场	系统较为稳定, 滞留径流能力较强、设计灵活, 景观效果好。	占地面积大、建设及运行维护费用高、管理维护要求高。	高/中	中/低
雨水湿地	建筑小区、道路、绿地与广场	有效削减污染物, 削减径流总量和峰值流量, 回补地下水、景观效应好。	占地面积大、维护频率高、维护不当易造成二次污染。	高	中

控制技术特点 (2)

技术名称	适用性	优点	缺点	建造费用	维护费用
入渗池	建筑小区	削减地表径流量、净化雨水、回补地下水。	占地面积大、易堵塞、易污染地下水、对土壤条件要求高。	小	高/中
干式滞留池	建筑小区、城市绿地	有效削减峰值流量，建设及维护费用较低，对TSS有较高去除效果。	占地面积大、维护频率高、对溶解性物质去除效果差。	小	中/小
湿式滞留池	建筑小区、城市绿地与广场	减少径流量、削减径流峰值、回补地下水、对污染物去除率高。	占地面积大、运行条件要求高、维护工作大。	中	中
生态护岸	水系河岸	形式多样、适用区域广、有效削减径流流量。	占地面积大、维护费用高、维护要求高。	高/中	高
砂滤池	建筑小区、道路	占地面积小、出水水质好、应用灵活、使用方便	维护要求高、过程复杂、建设和运行维护的费用高。	高	高
控污型岸边带	水系河岸	减少河流污染源、截流地表径流、提高生物多样性。	运行较长时间会影响出水水质，影响岸边带的作用。	高	高
生物滞留池	建筑小区、城市道路、绿地广场	适用区域广、景观效果好，径流控制效果好，建设与维护费用较低。	维护频率高、对土壤条件要求高。	较高	较高
亚表层渗滤	建筑小区、城市道路、绿地广场	投资低、占地少、管理方便、景观效果好。	消耗能源，易堵塞；需开挖土方和填充基质材料；需建预处理系统。	低	

控制技术特点（3）

技术名称	适用性	优点	缺点	建造费用	维护费用
缓凝土	水系河岸	透水性、稳定性、抗冲刷与流失性能、景观性好、减少径流量	占地面积大、维护费用高	高/中	高
滨水缓冲区	建筑小区、道路、绿地与广场	建设与维护费用低	对场地空间大小、坡度等条件要求较高，且径流控制效果有限。	低	低
塘-湿地	建筑小区、道路、绿地与广场	应用区域广、建设和运行成本低、污染物去除率高、操作简单	占地面积大、易堵塞	低	低
渗透塘	汇水面积大区域	补充地下水、削减峰值流量，建设费用较低	场地条件要求较严格，对后期维护管理要求较高	中	中
渗井	建筑与小区、道路及停车场的周边绿地内	渗井占地面积小，建设和维护费用低	水质和水量控制作用有限	低	低
湿塘	建筑与小区、绿地与广场	有效削减径流总量、径流污染和峰值流量	对场地条件要求较严格，建设和维护费用较高	高	中
雨水湿地	建筑与小区、道路、绿地与广场	有效削减污染物，削减径流总量和峰值流量，回补地下水、景观效应好	占地面积大、维护频率高、维护不当易造成二次污染。	高	中

控制技术特点（4）

技术名称	适用性	优点	缺点	建造费用	维护费用
蓄水池	建筑小区、城市绿地	节省占地、雨水管渠易接入、储存水量大。	建设费用高，后期需重视维护管理	高	中
调节塘	建筑与小区、城市绿地	有效削减峰值流量	功能单一，建设及维护费用较高。	高	中
调节池	城市雨水管渠系统中	有效削减峰值流量	功能单一，建设及维护费用较高	高	中
渗管/渠	建筑与小区及公共绿地	对场地空间要求小	但建设费用较高，易堵塞，维护较困难	中	中
植被缓冲带	城市水系周围、道路、停车场等周边	高雨水的截流能力、有效控制径流污染、净化水质	建设和维护费用较高	低	低
初期雨水弃流设施	屋面雨水的雨落管、径流雨水的集中入口前端	占地面积小，建设费用低，可降低雨水储存及雨水净化设施的维护管理费用。	径流污染物弃流量一般不易控制。	低	中
人工土壤渗滤技术	建筑与小区、城市绿地	雨水净化效果好，易与景观结合	建设费用较高	高	中

单项控制技术通过有机组合，可实现径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制、雨水资源化利用等目标。

表 控制技术组合应用方式

LID 设施 后方可连接 LID 设施	雨水花园	绿色屋顶	植被草沟	滞留设施	收集回用	透水铺装	过滤设施	入渗设施	雨水湿地
雨水花园	—	✓				✓			
绿色屋顶		—							
植被草沟		✓	—						
滞留设施		✓	✓	—			✓		
蓄水桶/模块		✓			—	✓	✓		
透水铺装		✓				—			
过滤设施							—		
渗透井/沟		✓	✓			✓		—	
雨水湿地	✓		✓	✓					—

《城市面源和径流污染控制及低影响开发技术手册》

(初稿)

该手册包括：**城市面源和径流污染控制技术**和**城市低影响开发技术**两大部分。涉及到各技术**概念、构造、技术要点、适用性、优缺点及后期维护**等方面，并附有三个相关技术的**典型案例**。

国家水专项课题：

城市水污染控制与水环境综合整治技术集成

例：绿色屋顶

概念与构造：是指各类建筑物和构筑物的顶部以及天台、露台上的绿化。其构造如右图。



适用性：适用于符合屋顶荷载、防水等条件的平屋顶建筑和坡度 $\leq 15^\circ$ 的坡屋顶建筑。

优缺点：可有效减少屋面径流总量和径流污染负荷。对屋顶荷载、防水、坡度、空间条件等有严格要求。

技术要点:

- (1) 建筑荷载:花园式屋顶绿化建筑荷载 $250\text{kg}/\text{m}^2$ 以上;简单式屋顶绿化建筑静荷载必须达到 $100\text{kg}/\text{m}^2$ 以上;
- (2) 防水:对防水层有抗根系穿透、耐腐蚀要求,须选择防水材料;
- (3) 基质材料:一般为轻量基质,可减轻楼顶荷载的负担;
- (4) 植物种类:应遵循植物多样性和共生性原则,以生长特性和观赏价值相对稳定、滞尘控温能力较强的本地常用和引种驯化成功的植物为主。

设施维护:

- (1) 应及时补种修剪植物、清除杂草、防治病虫害;
- (2) 溢流口堵塞或淤积导致过水不畅时,应及时清理;
- (3) 排水层排水不畅时,应及时排查原因并修复;
- (4) 屋顶出现漏水时,应及时修复或更换防渗层。



03

城市面源和径流污染控制评价研究

—基于多准则群体决策模型

PART THREE



3.1 评价指标体系的建立

3.2 评价方法（模型）的建立

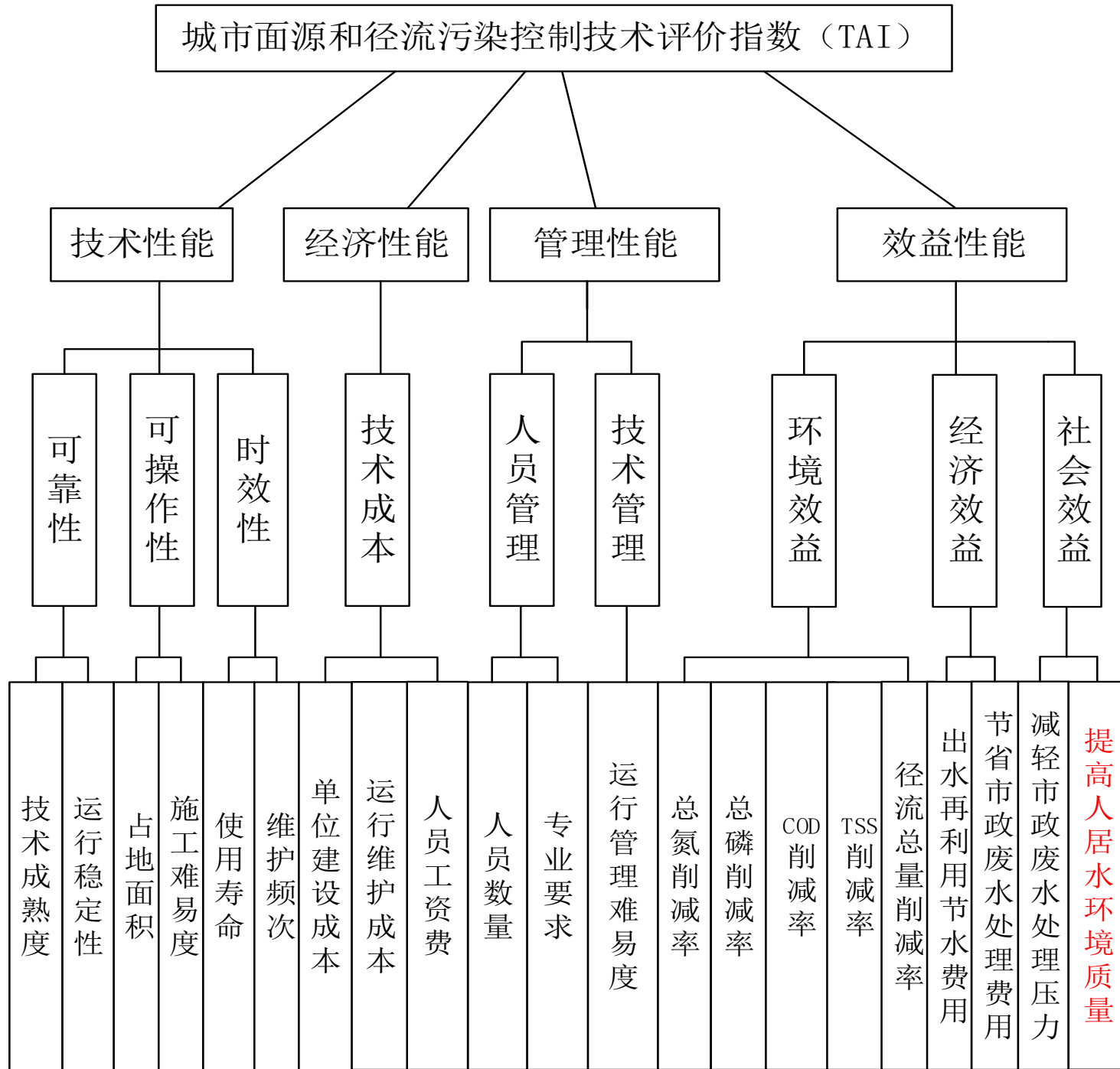
3.3 评价标准的建立

3.1 评价指标体系的建立

城市面源和径流污染控制技术评价基于技术、经济、管理和效益4方面建立评价指标。

- 本研究构建的评价指标体系：**技术性能、经济性能、管理性能和效益性能**作为一级指标。
- 确定了一级指标后，进一步细化，建立相应的二级、三级指标。

面源和径流控制技术评价指标



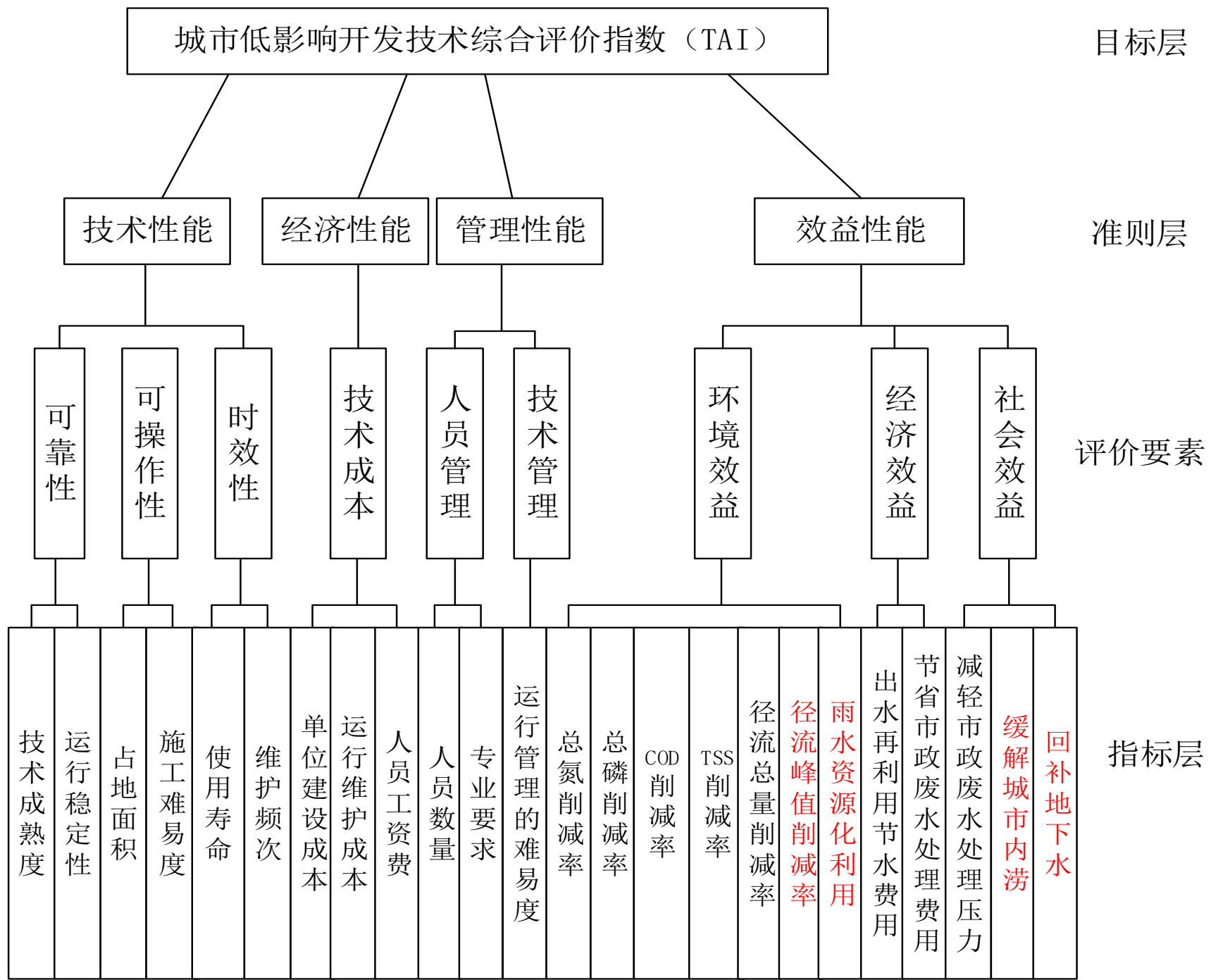
目标层

准则层

评价要素

指标层

低影响开发技术评价指标体系





3. 1 评价指标的建立

3.2 评价方法（模型）的建立

3. 3 评价标准的建立

3.2 评价方法（模型）的建立

采用**多准则群体决策模型**。

该模型的实质，是对专家意见进行**聚类分析**的**层次分析**。

◆ **层次分析法——指标权重**

◆ **聚类分析（系统聚类法）——专家权重（消除专家个人影响）**

层次分析法（AHP）

是将定性与定量分析方法相结合的多目标决策分析方法。

用法:构造判断矩阵，求出最大特征值及所对应的特征向量 **W**，归一化后，即为某一层指标对于上一层相关指标的相对重要性权值。

依据心理学研究得出的“**人区分信息等级的极限能力为 7 ± 2** ”的结论，AHP法在对指标的相对重要性进行评判时，引入了**九分位的比例标度**，见表8，表9。

表8 指标间对比关系按重要程度赋分方法

相对重要程度	含义
1	表示两个因素相比，具有同等重要性
3	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素极端重要
2、4、6、8	上述两相邻判断中间值


表9 指标间对比关系按不重要程度赋分方法

相对重要程度	含义
1	表示两个因素相比，具有同等重要性
1/3	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素稍微不重要
1/5	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素明显不重要
1/7	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素强烈不重要
1/9	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素极端不重要
1/2、1/4	上述两相邻判断中间值

根据表8、表9赋分原则，专家就某一层次要素对上一层次要素的贡献程度作出要素间的两两判断，可得到评估所需的判断矩阵。

	指标A	指标B	指标C	指标D
指标A	1	3	1/5	7
指标B	1/3	1	1/7	2
指标C	7	7	1	9
指标D	1/7	1/2	1/9	1

指标间两两判断


$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 1/7 & 2 \\ 7 & 7 & 1 & 9 \\ 1/7 & 1/2 & 1/9 & 1 \end{bmatrix}$$

4阶判断矩阵

系统聚类法（Hierarchical Clustering Methods）

根据AHP法可得出每个专家对上述各项指标的权重。然而, 专家之间的判断结果往往存在较大的差异。

为消除专家个人偏好对结果产生的影响, 提高专家共识, 对各专家评判结果进行系统聚类分析。

系统聚类法: 通过计算各个向量之间的距离, 将距离相近的向量进行合并, 最后通过选定的阈值来确定分类的一种数值分析方法。

本研究根据系统聚类法原理，将专家判断结果看作是一个向量，专家评判结果之间的一致性程度即向量之间的距离 d_{lm} 采用向量**夹角余弦**来定义。

若两个专家对同一层次的特征向量分别为 $L = (l_1, l_2 \dots l_n)$ 和 $M = (m_1, m_2 \dots m_n)$ ，则这两个专家判断结果的一致性程度 d_{lm} 可定义为：

$$d_{lm} = \cos \theta_{lm} = \frac{(L, M)}{|L| \cdot |M|} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i m_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_i^2 \sum_{i=1}^n m_i^2}} \quad (1)$$

d_{lm} 越大，两个向量之间的一致性程度越高，说明两专家在比较判断时的相似性越大。当一致性程度达到一定水平时，就可将这两个专家归为一类。

假设对 m 位专家进行系统聚类分析后，第 k 位专家所在的类中包含有 ψ_k 位专家，设第 k 位专家的权重系数为 λ_k ， λ_k 与 ψ_k 成正比。由式 $\sum_{k=1}^m \lambda_k = 1$ 和式 $\lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_m = \psi_1 : \psi_2 : \dots : \psi_m$ ，可得第 k 位专家的权重系数为：

$$\lambda_k = \frac{\psi_k}{\sum_{j=1}^m \psi_j} \quad (2)$$

基于群决策的层次分析法（AHP）

基于群决策AHP，某一层次特征向量 $W = (w_1, w_2, \Lambda, w_n)^T$ 中的 w_i ，可由各位专家同一层次判断矩阵得到的特征向量 $W^{(k)}$ ，通过权重系数对每一因素权重进行加权平均而得，计算公式为：

$$w_i = \sum_{k=1}^m (\lambda_k \cdot w_i^{(k)}) \quad (3)$$

根据公式（3）通过专家权重系数 λ_k 对每一因素权重进行加权平均，可得到集结各专家意见的评价指标的综合权重向量 $W = (w_1, w_2, \Lambda, w_n)^T$ ，也即求得各层指标相对于上一层次的综合权重。

由公式 (3) 计算得到各层指标相对于上一层次的综合权重, 对各指标综合权重进一步计算得到所有指标相对于目标层的总权重 w_i' 。

假设层次结构由目标层、准则层和指标层所组成, 其中准则层有 m 个指标, 指标层有 n 个指标。

准则层对目标层的权重向量为: $W = (w_1, w_2, \Lambda, w_m)^T$

指标层对准则层的权重向量为: $W_j = (w_{1j}, w_{2j} \Lambda, w_{nj})^T$

则指标层各指标对目标层的权重向量为: $W' = (w_1', w_2', \Lambda, w_n')^T$

$$\text{其中 } w_i' = \sum_{j=1}^m w_j \times w_{ij}, i = 1, 2, \Lambda, n \quad (4)$$

控制技术综合评价指数（TAI）

根据评价指标的权重及各技术的打分结果，由下式可得出各控制技术的综合评价指数（TAI）：

$$\begin{cases} TAI = \sum_i^n w_i' \cdot C_i \\ \sum_i^n w_i' = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中：TAI—控制技术的综合评价指数；

C_i —为第*i*个指标评分值；

w_i' —为第*i*个指标相对于目标层的总权重。



3.1 评价指标的建立

3.2 评价方法（模型）的建立

3.3 评价标准的建立

3.3 评价标准的建立

3.3.1 评价指标的评分标准

3.3.2 综合评价指数（*TAI*）的评价标准

3.3.1 评价指标的评分标准

评价指标权重确定后，由于能够定量表述的各个指标的单位、数量级等不同，不能对各个指标直接进行运算或比较。要对所有指标的评价标准进行统一，再进行分析评价。

本研究中将各评价指标划分为**定量指标**和**定性指标**。

定量指标：

技术成熟度、使用寿命、维护频次、单位建设成本、运行维护成本、人员数量、水质指标、水量指标等。

定性指标：

运行稳定性、施工难易度、占地面积、人员工资费、专业要求、运行管理难易度、雨水资源化利用、出水再利用节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水处理压力、提高人居环境质量、缓解城市内涝、回补地下水等。

定量指标的评分标准

本研究将定量指标分级为**较低**、**低**、**中**、**较高**、**高**五个等级，赋值范围**1~9**。

例如：**水质指标**

- 主要有：TSS、TN、TP、COD等削减率；
- 将较低、低、中、较高、高五个等级分别对应的指标值定为10%以下、10%-20%、20%-40%、40%-60%、60%以上；
- 对应分值分别为1、3、5、7、9，介于两者之间分别赋值2、4、6、8。

定性指标的评分标准

对于无法进行定量分级的定性指标分为**A/B/C**三个等级，赋值范围为**1-9**。

举例说明：运行稳定性

A、所实施的技术运行稳定性好 **6-9**

B、所实施的技术运行稳定性一般 **3-6**

C、所实施的技术运行稳定性差 **1-3**

各技术评价打分表

表10 城市低影响开发技术评分表（定量指标）

技术名称		
评价指标	评价等级	评分
技术成熟度		
使用寿命		
维护频次		
单位建设成本		
运行维护成本		
人员数量		
TN去除率		
TP去除率		
TSS去除率		
COD去除率		
径流总量削减率		
径流峰值削减率		

各技术评价打分表

表14 城市低影响开发技术评分表（定性指标）

技术名称		
评价指标	评价等级	评分
运行稳定性		
施工难易度		
占地面积		
人员工资费		
专业要求		
运行管理难易度		
雨水资源化利用		
出水再利用的节水费用		
节省市政废水处理费用		
减轻市政废水处理压力		
缓解城市内涝		
回补地下水		

3.3 评价标准的建立

3.3.1 评价指标的评分标准

3.3.2 综合评价指数 (TAI) 的评价标准

3.3.2 综合评价指数（TAI）的评价标准

根据各指标的评价标准和赋值情况，结合国内外相关研究，由 $C_i \in [1.0, 9.0]$ ，再根据公式（5）得到 $TAI \in [1.0, 9.0]$ 。

因此，可将城市面源和径流污染及低影响开发技术评价标准分为 $[1.0, 3.0]$ 、 $(3.0, 5.0]$ 、 $(5.0, 7.0]$ 、 $(7.0, 9.0]$ 四个等级分别对应技术综合应用差、一般、良、优。



04

PART FOUR

案例研究

北京未来科技城低影响开发示范工程

共包括5个低影响开发工程，7种关键技术：

(1) 不同类型透水地面工程：透水混凝土铺装、透水砖铺装、草坪砖等透水地面降雨径流小区；



透水混凝土铺装



透水砖铺装



植草砖铺装

(2) 下凹式绿地工程：下凹式绿地、渗透管、渗透井等增渗设施；

(3) 生物滞留槽工程：建在停车场周边地势相对较低的绿地内，通过滞留净化后排入雨水管道；



下凹式绿地



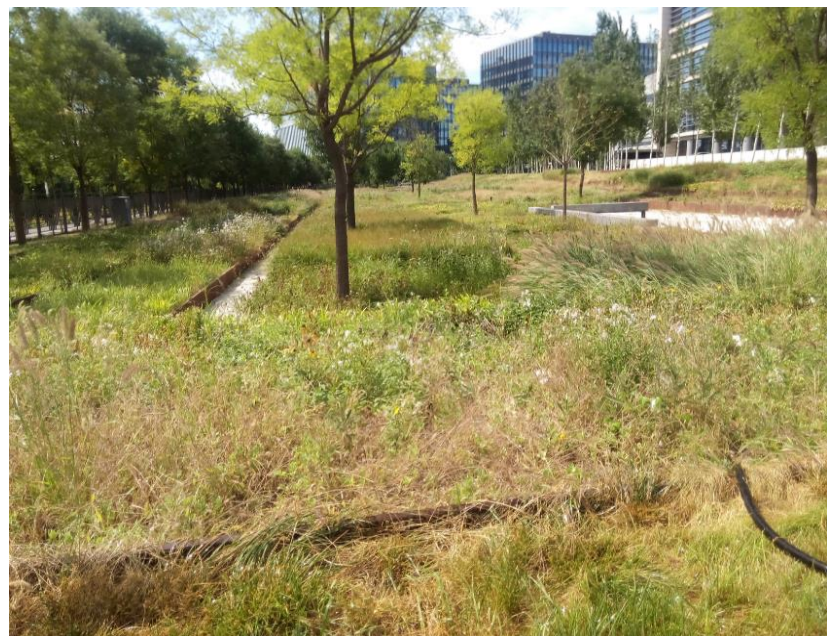
生物滞留槽

(4) 雨水净化湿地：将洼地改造成多级湿地，使部分雨水由植草沟引至湿地内，进行水质净化；

(5) 植被浅沟工程；下凹式植被浅沟，道路雨水经植被浅沟滞留净化后进入绿地内雨水口和蓄渗设施，超渗雨水溢流到市政管道。



植草沟



下凹式植被浅沟

专家权重的确定

邀请5位专家填写打分表，分别构造两两比较判断矩阵，并计算各矩阵的特征向量。

以社会效益为例：5位专家给出的判断矩阵如下：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 3 \\ 5 & 1 & 7 \\ 1/3 & 1/7 & 1 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵，计算得到5位专家的特征向量 $W^{(k)}$ 和特征值 $\lambda_{\max}^{(k)}$ 分别为：

$$W^{(1)} = (0.105, 0.258, 0.637)^T, \lambda_{\max}^{(1)} = 3.039$$

$$W^{(2)} = (0.105, 0.637, 0.258)^T, \lambda_{\max}^{(2)} = 3.039$$

$$W^{(3)} = (0.200, 0.600, 0.200)^T, \lambda_{\max}^{(3)} = 3.000$$

$$W^{(4)} = (0.122, 0.320, 0.558)^T, \lambda_{\max}^{(4)} = 3.018$$

$$W^{(5)} = (0.188, 0.731, 0.081)^T, \lambda_{\max}^{(5)} = 3.065$$

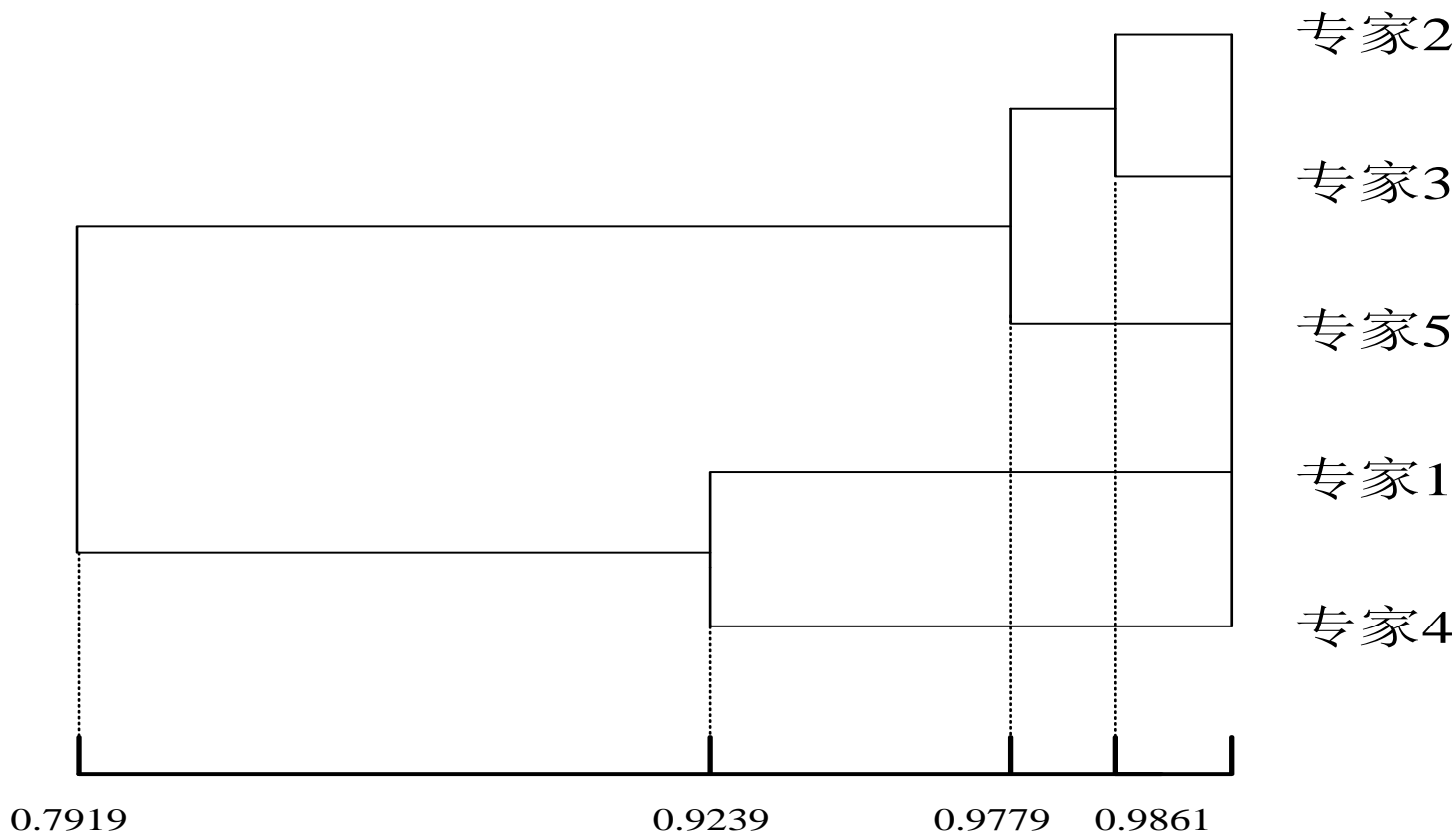
为验证上述判断矩阵的有效性，进行一致性检验。
当平均随机一致性指标 $CR = CI / RI < 0.1$ 时，判断矩阵具有满意的一致性，即专家打分是有效。

经计算，上述判断矩阵的CR分别为：

$$CR_1 = 0.037, CR_2 = 0.037, CR_3 = 0, CR_4 = 0.018, CR_5 = 0.062$$

5个CR值均小于0.1，故5个比较判断矩阵均具有满意的一致性，即5位专家的打分都是有效的。

对5位专家判别结果进行聚类分析，通过计算专家两两之间的一致性程度值，得到 $d_{\max} = d_{2,3} = 0.9861$ ，故将专家2和3合并为新类6；第二次合并时，得到 $d_{\max} = d_{5,6} = 0.9779$ ，故将专家5和6合并为新类7；依次进行合并，最后得到专家评分聚类图。



分析聚类图可知，5位专家分为2类比较合适：

第一类共3人，包括**专家2**，**3**和**5**；第二类共2人，包括**专家1**和**4**。

由于各类的专家个数为 $\psi_2 = \psi_3 = \psi_5 = 3$ ， $\psi_1 = \psi_4 = 2$ ，

由公式（2）：

$$\lambda_k = \frac{\psi_k}{\sum_{j=1}^m \psi_j}$$

则各专家的权重系数分别为：

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_5 = 3/13, \quad \lambda_1 = \lambda_4 = 2/13$$

指标综合权重的确定

由公式（3）：

$$w_i = \sum_{k=1}^m (\lambda_k \cdot w_i^{(k)})$$

可得**社会效益**的综合权重向量 $W = (0.149, 0.543, 0.308)^T$ ，即社会效益中的三个指标：减轻市政废水处理压力、缓解城市内涝、回补地下水的权重值分别为：

$$w_1 = 0.149, w_2 = 0.543, w_3 = 0.308$$

同样方法可计算得到其余评级指标的综合权重。

再由公式（4）计算得到各指标总权重，结果如下表所示。

表 15 城市低影响开发技术各评价指标权重值

一级指标	一级权重	二级指标	二级权重	三级指标	三级权重	总权重
技术性能	0.244	可靠性	0.436	技术成熟度	0.510	0.054
				运行稳定性	0.490	0.052
		可操作性	0.425	占地面积	0.25	0.026
				施工难易度	0.75	0.078
		时效性	0.139	使用寿命	0.615	0.021
				维护频次	0.385	0.013
经济性能	0.111	技术成本	1	单位建设成本	0.458	0.051
				运行维护成本	0.338	0.038
				人员工资费	0.204	0.023
管理性能	0.064	人员管理	0.365	人员数量	0.279	0.007
		技术管理	0.635	专业要求	0.721	0.017
效益性能	0.582	环境效益	0.237	总氮削减率	0.056	0.008
				总磷削减率	0.056	0.008
				COD削减率	0.058	0.008
				TSS削减率	0.063	0.009
				径流总量削减率	0.314	0.043
				径流峰值削减率	0.167	0.023
				雨水资源化利用	0.286	0.039
		经济效益	0.147	出水再利用的节水费用	0.635	0.054
				节省市政废水处理费用	0.365	0.031
		社会效益	0.617	减轻市政废水处理压力	0.149	0.054
				缓解城市内涝	0.543	0.195
		回补地下水	0.308	0.111		

综合评价指数 (TAI) 的计算

基于24个评价指标对上述5个工程示范区内的7种低影响开发技术进行了调查，调查结果如下表。

技术名称		技术适用条件		技术性能		技术可靠性		技术时效性		技术可操作性		经济性		技术成本		管理性能		人员管理		技术管理		效益性能	
雨水湿地		适用于城市道路、广场		运行稳定、技术成熟		运行稳定性、技术成熟度		使用周期、维护频次/年		占地面积、施工难度		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		人员数量、专业要求		运行管理难度		TN削减率、TP削减率、COD削减率、TSS削减率、径流总量削减率、径流峰值削减率、雨水资源化利用		出水再利用的节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水压力、缓解城市内涝、回补地下水	
透水混凝土铺装		用于小区、公园、轻载道路、步行道、停车场等路面		运行稳定性、技术成熟度		运行稳定性、技术成熟度		使用周期、维护频次/年		占地面积、施工难度		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		人员数量、专业要求		运行管理难度		TN削减率、TP削减率、COD削减率、TSS削减率、径流总量削减率、径流峰值削减率、雨水资源化利用		出水再利用的节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水压力、缓解城市内涝、回补地下水	
雨水湿地		适用于城市不同住宅区、停车场		运行稳定性、技术成熟度		运行稳定性、技术成熟度		使用周期、维护频次/年		占地面积、施工难度		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		人员数量、专业要求		运行管理难度		TN削减率、TP削减率、COD削减率、TSS削减率、径流总量削减率、径流峰值削减率、雨水资源化利用		出水再利用的节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水压力、缓解城市内涝、回补地下水	
雨水湿地		适用于城市不同住宅区、停车场		运行稳定性、技术成熟度		运行稳定性、技术成熟度		使用周期、维护频次/年		占地面积、施工难度		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		人员数量、专业要求		运行管理难度		TN削减率、TP削减率、COD削减率、TSS削减率、径流总量削减率、径流峰值削减率、雨水资源化利用		出水再利用的节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水压力、缓解城市内涝、回补地下水	
雨水湿地		适用于城市不同住宅区、停车场		运行稳定性、技术成熟度		运行稳定性、技术成熟度		使用周期、维护频次/年		占地面积、施工难度		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		单位建造成本/m ² 、运行维护成本/m ² 、人工工资/年		人员数量、专业要求		运行管理难度		TN削减率、TP削减率、COD削减率、TSS削减率、径流总量削减率、径流峰值削减率、雨水资源化利用		出水再利用的节水费用、节省市政废水处理费用、减轻市政废水压力、缓解城市内涝、回补地下水	

表16 7种低影响开发技术调查结果得分表

评价指标/技术名称	透水混凝土铺装	透水砖铺装	植草砖铺装	下凹式绿地	生物滞留槽	雨水湿地	植被浅沟
技术成熟度	7	7	7	9	6	7	9
运行稳定性	6	6	6	7	7	8	7
占地面积	7	7	7	5	6	3	7
施工难易度	3	3	5	5	5	3	3
使用寿命	5	5	5	8	4	5	8
维护频次	7	7	6	2	7	7	1
单位建设成本	6	6	7	9	6	6	7
运行维护成本	7	7	7	5	6	7	8
人员工资费	8	7	7	5	7	6	7
人员数量	8	8	8	7	9	7	8
专业要求	7	7	7	7	5	5	5
运行管理难易度	5	7	5	7	5	7	5
TN去除率	4	4	4	3	4	4	4
TP去除率	6	6	6	5	4	5	6
COD去除率	4	4	4	5	6	8	4
TSS去除率	8	8	8	8	8	7	7
径流总量削减率	6	6	6	7	4	6	5
径流峰值削减率	5	5	5	6	5	3	2
雨水资源化利用	5	5	5	7	5	3	7
出水再利用节水费用	6	6	6	5	8	3	3
节省废水处理费用	6	6	6	5	7	7	5
减轻废水处理压力	6	6	6	5	7	7	5
缓解城市内涝	6	6	6	7	7	7	7
回补地下水	5	5	5	7	9	7	5

综合评价指数 (TAI) 的计算

根据表15中各项指标的总权重以及表16中各技术评价指标的调查得分情况，由公示 (5)

$$\begin{cases} TAI = \sum_i^n w_i' \cdot C_i \\ \sum_i^n w_i' = 1 \end{cases}$$

计算得出各技术的综合评价指数 *TAI*，如下表所示。

表 7种典型城市低影响开发技术的综合评价指数 (TAI)

	透水混凝土铺装	透水砖铺装	植草砖铺装	下凹式绿地	生物滞留槽	雨水湿地	植被浅沟
技术性能	1.3031	1.3031	1.4455	1.5647	1.4097	1.3036	1.4479
经济性能	0.7488	0.7262	0.7770	0.7584	0.6886	0.7035	0.8145
管理性能	0.3732	0.4545	0.3732	0.4480	0.3461	0.4143	0.3396
效益性能	3.3083	3.3083	3.3083	3.7233	4.0530	3.5369	3.2134
综合评价指数 (TAI)	5.7334	5.7921	5.9041	6.4943	6.4975	5.9583	5.8154

由上表可知，透水混凝土铺装、透水砖铺装、植草砖铺装、雨水湿地、植被浅沟、下凹式绿地和生物滞留槽都属于第三等级“良”，即这几项技术整体上的应用都较好，这也比较符合实际应用的情况。

但各技术还是有少许差别，7种典型技术的优先顺序为：
生物滞留槽>下凹式绿地>雨水湿地>植草砖铺装>植被浅沟>
透水砖铺装>透水混凝土铺装；

应用最好的是生物滞留槽，较差的是透水混凝土铺装。

结 论

- ◆ 本研究从技术、经济、管理和效益四方面考虑，建立了“四+九+20+”三级评价指标体系，即4个准则层、9个评价要素、20+个具体评价指标；
- ◆ 示范工程中7种城市低影响开发技术综合评价的优先顺序为：生物滞留槽、下凹式绿地、雨水湿地、植草砖铺装、植被浅沟、透水砖铺装、透水混凝土铺装，且这7种技术的综合应用都较好；
- ◆ 综合评价表明，单一技术并不能完全满足技术、经济、管理和效益的全部要求。工程中应根据实际情况，选择几种技术组合运用，以期取得良好的综合效益。



北京林业大学
BEIJING FORESTRY UNIVERSITY



谢 谢!