绿色城市发展领域多主题路径识别及其演化趋势分析*

汝绪伟[1,2,3]　薛春丽[1,2]　郑心如[1,2]　王艳英[1,2,3]　纪宗华[1,2,3]
（1. 齐鲁工业大学（山东省科学院），济南 250014；2. 山东省科技发展战略研究所，济南 250014；
3. 山东省高等学校科技创新治理与智能决策文科实验室，济南 250014）

摘要：目前主题演化路径分析大多对主题和路径分别进行研究。尝试利用一种改进的主路径分析方法，围绕绿色城市发展领域，依托引文网络结构提取领域发展多主题路径及趋势，实现主题和演化路径的同步识别，直观展现主题间发展融合趋势。通过基于Pathfinder算法进行多路径主题识别，依据文献耦合原理对主题路径进行截尾处理并聚类，从引用和被引视角分析绿色城市发展领域主题路径的演化进程及发展趋势。研究结果表明，基于Pathfinder算法的多主题路径识别方法能够有效且清晰地展示领域主题之间的发展联系，揭示知识内容间的交互转移。绿色城市发展研究集中于低影响开发对城市水文的实践影响，国内研究包括有效性验证、成本效益评估两个主题路径，国外研究包括有效性验证、作用多样性分析及多目标优化3个主题路径。国内外绿色城市发展领域研究趋势集中于单一主题集群的拓展融合，跨主题路径融合发展研究较少，对融合城市背景条件及不确定因素下低影响开发实践展开研究是该领域主要发展趋势。

关键词：多主题路径；Pathfinder算法；绿色城市发展；路径识别；文献耦合
中图分类号：G350　DOI：10.3772/j.issn.1673-2286.2024.09.003
引文格式：汝绪伟，薛春丽，郑心如，等. 绿色城市发展领域多主题路径识别及其演化趋势分析[J]. 数字图书馆论坛，2024，20（9）：27-37.

伴随科学文献数量的海量增长，越来越多学者选择利用文献计量的方式揭示领域知识发展演变规律和趋势[1]。与生物进化的路径呈现为干支清晰的“进化树”不同，知识主题的演化路径表现出协同演化的特征，在演化过程中相互影响、相互作用、协同发展，呈现为相互交错的“演化网”[2]。科学领域的多主题路径识别分析可以依据原始引文结构描述主题如何随时间变化，包括主题的发展演化周期及主题间转移、汇聚等趋势[3-4]，有助于研究人员更好地跟踪主题的发展过程、识别主题间的关系以及掌握科学前沿和研究趋势[5]。绿色城市发展研究属于城市科学研究的一部分，因而也涉及城市规划与设计、工程建设与管理以及城市社会、经济、政治、文化、生态全面发展等诸多方面，呈现出综合性和交叉性的研究特点[6]。通过多主题路径识别分析，能够呈现绿色城市发展领域知识发展融合的情况特征及学科交叉的发展趋势，有助于在现有知识的基础上催生新的研究分支，从而推动整个领域知识体系的发展。此外，对比分析国内外绿色城市发展领域研究主题发展及趋势特征对于我国绿色城市未来发展实践具有良好的指导意义。

收稿日期：2024-05-07
*本研究得到山东省重点研发计划（软科学）项目“山东省科技成果高质量转化机制与实现路径研究”（编号：2024RZB0403）、齐鲁工业大学（山东省科学院）科教产融合试点工程社科专项“新型工业化背景下数字经济驱动区域工业绿色发展研究”（编号：2024XKY08）资助。

1　相关研究

主题演化分析包括结构主题演化分析、内容主题演化分析和结构-内容融合主题演化分析。结构主题演化分析基于文献之间的直接引用、共被引、耦合等关系构造关联网络，以社团发现、谱聚类等聚类算法为主[7]，通过引入时序特征阐述领域主题演化发展趋势。由于结构主题演化分析以共词分析为基础，存在主题识别颗粒度过大、对学科领域主题发展揭示不够全面等局限性[8]。早期结构主题演化分析相对较多，后续与内容主题演化分析相结合，成为结构-内容融合主题演化分析的基础。内容主题演化分析基于文档、主题、词语3个层次进行概率建模，利用主题模型算法挖掘文本数据潜在的主题信息，通过相似度关联算法进行主题演化研究[9]，提升了主题识别的准确度，但一定程度上忽视了引文间天然的引文关系结构信息。结构-内容融合主题演化分析综合了两者的优势，既能利用直接引文网络丰富主题词义、消除歧义、提升主题演化趋势辨识准确性[10]，也能基于文献内容从更加微观的层面挖掘领域知识内部各实体之间的关系特征，但仍存在由主路径搜索算法限制导致的识别出的主题路径数量受限等问题。

主题演化分析的具体方法包括主题关联法、主题网络法、主路径集成法3类，方法流程如表1所示。主题关联法根据时间窗口划分对引文网络进行横向分割，同时对各时间区间主题进行提取分析，通过主题相似度进行主题关联，对引文网络整体结构的依赖程度较低，侧重于对引文网络中文献内容的关联分析。主题网络法和主路径集成法则综合利用引文网络结构特征和节点内容信息，两者的主要区别在于主题识别在研究流程中的位置关系，分析思路分别是“先主题后路径”和“先路径后主题”。

表1　主题演化分析方法

<table>
<tr><th>类别</th><th>研究方法</th><th>研究流程及分析工具</th><th>研究拓展</th></tr>
<tr><td>内容主题演化分析</td><td>主题关联法</td><td>①时间窗口划分（固定时间窗口法[10-11]、分段线性表示法[12-13]、重叠时间窗口[14]）
②主题识别（PLDA模型、社区探测算法[13,15]、LDA模型[14]）
③主题关联（点积余弦相似度、余弦相似度[11,15]、矩阵相似度[12]、统计语义的主题关联方法[14]）</td><td rowspan="3">主题特征（热度、状态、新颖度、流行度、核心度和成熟度[12]等）、演化特征（主题演化生命周期[19]、演化类型[14]等）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">结构-内容融合主题演化分析</td><td>主题网络法</td><td>①主题识别（LDA模型[16]）
②网络构建（主题间引用关系[16]）
③路径提取（最大路径搜索算法[16]）</td></tr>
<tr><td>主路径集成法</td><td>①主路径识别（搜索路径数[17]、全局主路径[18]）
②文献主题关联（关键文献对共被引[17]、文献-关键词相似度矩阵[18]）
③主题识别（C-Value术语抽取[17]、LDA模型[18]）</td></tr>
</table>

现有主题演化分析方法主要存在以下有待改进之处：①结构-内容融合主题演化分析受主路径分析方法限制，识别出的主题路径数量较少；②当前的主题路径识别方法均围绕主题识别和路径提取两个步骤进行分析拓展，而相关研究表明直接引用网络结构往往整体呈现稀疏性，局部结构更密集[7]，在呈现出清晰的主题结构的同时也表现出主题发展路径的交错融合，主题路径识别过程中可以依据引文网络的特征属性，尝试进行主题和路径的同步分析；③当前多数研究识别出的主题路径不能同时直观体现出主题内部和主题之间的发展演进状态，若将主题内部特征和主题间的发展路径分开阐述，则存在主题路径演进过程分析不全面的问题。

鉴于此，本文尝试以绿色城市发展领域为例，利用基于Pathfinder算法改进的主路径分析方法同步识别出引文网络中的多个主题及其演化路径，直观展现单个主题和主题之间的发展演进过程。同时，对识别出的演化路径进行截尾处理，从引用和被引双重视角揭示主题演进过程和主题间发展融合趋势。一方面利用改进的主路径分析方法能够在增加主题路径识别数量的同时实现主题和演化路径的同步识别分析，另一方面能够在全面直观展现领域主题发展、消逝及融合等协同演化特征的同时体现出各主题路径的演进内容及发展趋势。

2　研究设计与数据采集

2.1　研究设计

构建基于引文网络的领域多主题路径识别与趋势分析研究框架，具体分为以下3个步骤。

（1）原始引文网络的构建，包括文献数据采集与

处理、节点筛选及分类。

（2）多主题路径识别，包括遍历权重计算、遍历权重不相似化处理以及Pathfinder网络剪切。

（3）汇点文献截取与聚类，包括汇点文献截尾处理、尾部链接信息统计。

将上述分析研究框架应用至绿色城市发展领域，结合领域主题发展的时序分布，从引用视角对绿色城市发展领域进行时序-主题演进分析，从被引视角依据汇点文献的共被引文献关系进行趋势-聚类分析；从引用和被引的双重视角对国内外绿色城市发展主题发展演进过程及融合趋势进行对比分析。

2.2　数据采集

以Web of Science核心合集数据库为文献来源，文献检索式为TS=（“Green urban development”），检索时间跨度为2000年1月1日—2023年11月12日，对检索到的文献进行人工筛选。在搜索结果中剔除新闻报道、会讯、书讯等文献类型，选取研究型论文及综述为主要分析对象，同时去除重复文献及主题不相关文献数据条目，最终得到国内研究873篇，国外研究926篇，并选择“全记录和引用的参考文献”导出全部文献题录信息。

3　研究方法与过程

3.1　节点筛选及分类

Goffman[20]、Jahn[21]认为领域的发展取决于关键文献，组件作为系统的独立组成部分，同样大量存在于引文网络系统中，而引文网络中的组件是引文网络的各个孤立部分，最大组件是其中包含最多引文链接关系的文献所构成的引文网络。文献通过引用某些重要文献或被某些重要文献引用，出现在最大组件中，大量的引用关系也必然使这些文献处于最大组件的中心位置[22]。因此需要对引文网络的部分组件进行删除，仅分析引文网络的最大组件，具体筛选过程如图1所示。

图1　节点筛选及分类过程

（1）去除HistCite中游离节点。HistCite是一款引文网络分析工具，采用图示的方式展示某一领域不同文献之间的关系，根据时间生成文献间的引证关系网络图，可以快速定位该领域的重要文献[23]。在使用HistCite进行引文网络分析时有四大关键性指标，分别是：本地数据库中被引频次（Local Citation Score，LCS）、数据库中总被引频次（Global Citation Score，GCS）、本地数据库中引用文献数量（Local Cited References，LCR）、数据库中引用文献数量（Cited References，CR）。因为本地数据库中的文章与检索词密切相关，所以LCS常被用来表征该文章在研究领域内的认可程度[24]。LCS和LCR值均为0，表明该节点在本地数据库中的施引和引用文献数量均为0，该节点与引文网络之间不存在任何关联关系，对于网络简化无影响，故将该类节点称为游离节点，在分析过程中进行删减。

（2）去除引文网络中的离散拓扑。利用Pajek软件对余下节点进行引文网络呈现，引文网络图分为主聚类簇和游离状态的小聚类簇，主聚类簇代表领域核心文献集。尽管游离状态的小聚类簇也是一定规模的知识群的体现[25]，但未形成子领域研究规模，处在已经消亡或待发展状态，故在领域主题路径分析过程中也不再纳入考虑范围。

（3）去除途经节点数不超过3个的汇点，并进行节点分类。在路径搜索过程中，Liu等[26]指出前向搜索就像寻找重要贡献的后代，而后向搜索类似于追寻当前作品的根源。单一主路径分析方法中汇点和源点过于集中，多主路径既要呈现多个重要贡献的后代，也要保留多重要源点。汇点路径途经节点数即路径的长度，与路径重要性成正比，故采用后向搜索对途经节点数不大于3个的汇点进行删除，对保留下的重要节点进行分类，包括源点、汇点和中介点。

3.2　多主题路径识别分析

基于Pathfinder算法，在主路径分析方法的基础

上做进一步改进，开展多主题路径识别分析。主路径分析有三大核心要素：重要节点、最大信息承载量和关键关系。马瑞敏等[27]构建了基于Pathfinder算法的领域知识交流主路径发现的技术路线，比较了与其他两种主流主路径发现方法——搜寻路径次数（Search Path Count，SPC）和全局关键路线（Global Key-Route，GK-R）的区别，结果证明Pathfinder相较其他发现方法在路径信息识别方面更具全面性，是一种探测领域知识交流主路径的有效方法。然而，其未能针对主路径分析在路径搜索时存在的路径数量和路径区分度方面的不足进行改进，本研究尝试通过节点筛选及分类操作对原始引文网络进行初步简化处理，在此基础上利用Pathfinder剪切处理算法进行主路径分析，从而提取出数量较多且区分度较高的路径发展枝干，并针对提取路径进行主题分析。具体实现过程如下。

（1）遍历权重计算。引文网络中的遍历权重既可以认为是节点的遍历权重，也能够指代链接的遍历权重。De Nooy等[28]将遍历权重定义为“起点到终点的所有路径中包含某条线或者某个点的路径所占的比例”。重要链接在某种程度上与节点的中介中心性存在关联，考察节点或者连线在引文网络中的连通能力。引文网络中节点与链接的遍历权重计算方法如下：①确定源点到汇点之间的所有路径，将路径数量定义为K，统计各节点的出现频次N，则节点的遍历权重值为N/K；②将某两个节点之间链接的出现频次定义为L，则该链接的遍历权重值为L/K。遍历权重的计算过程如图2所示，其中括号内数值与箭头旁数值为节点与链接对应的权重。图2是由4个节点构成的有向无环图，其中节点A为源点，节点D为汇点，源点A到汇点D有4条路径，分别是：A→D，A→B→D，A→B→C→D，A→C→D。源点A和汇点D在4条路径中出现4次，故节点权重为1.00；而节点B和节点C各出现两次，节点权重为0.50。A→B链接在所有路径中共出现两次，故其链接权重为0.50。主路径考察知识的传递作用，采用遍历权重衡量节点与链接的重要程度可以准确区分重要节点与链接。

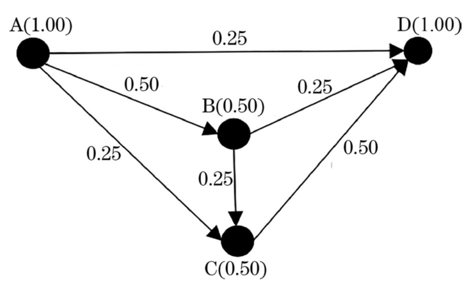


图2　遍历权重计算示例

（2）遍历权重不相似化处理。Pathfinder算法是Schvaneveldt[29]提出的一种网络剪裁算法，适用于有向或无向加权网络。Pathfinder算法的计算前提是网络矩阵为非相似矩阵，采用对遍历权重值取相反数的方法衡量节点之间的不相似性，遍历权重的相反数越大（绝对值越小），说明节点之间越不相似。

（3）Pathfinder网络剪切。Pathfinder算法由两个基本的参数决定——r和q。r决定两个不直接相连节点之间的距离测度方法，q表示一个节点可遍历的最大节点数，通常取值为n−1（n为网络中的节点数），其得到的结果图称为PFNET（r，q）[30]。Pathfinder创建的结果图中所有节点都相连并且只保留节点间最显著的关系。Pathfinder算法的网络剪切原理为三角形不等式原理，即比较两节点之间的距离D_{ij}和两点间闵可夫斯基距离W_{ij}的大小，若$W_{ij} > D_{ij}$，违反了三角不等式原理，需要删除两节点之间的直接链接线路。闵可夫斯基距离W_{ij}测度公式如式（1）所示。

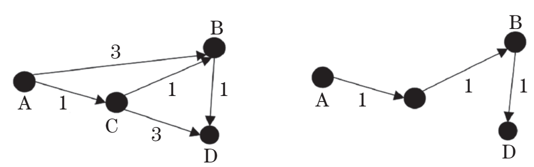
$$W_{ij} = \left(\sum_{m=1}^{k} w_m^r \right)^{1/r} \tag{1}$$

式中：r取1或∞，在计算过程中常取值为1；k表示节点i和j之间存在的路径数量；w_m表示节点i和j之间第m条路径的权重值。此时两点间闵可夫斯基距离为$\sum_{m=1}^{k} w_m$，两节点之间的距离D_{ij}计算公式如式（2）所示。

$$D_{ij} = \min\left(w\left(P_{ij1}\right), w\left(P_{ij2}\right), \cdots, w\left(P_{ijk}\right) \right) \tag{2}$$

式中：P表示节点i和j之间的路径；$w\left(P_{ij1}\right)$表示节点i和j之间的第一条路径的权重值。

Pathfinder算法示例如图3所示，其中箭头旁数值为途经节点数。源点A与节点B之间有两条路径，分别是A→B和A→C→B，途经节点数分别是3个和2个，3>2，所以A→B连线删除，同理删除C→D这条连线。



(a)简化前引文网络　　(b)简化后引文网络

图3　Pathfinder算法示例

3.3 汇点文献截取与聚类

基于Pathfinder算法进行的引文网络简化侧重于全网络中的知识演化，而聚类算法衍生的子路径侧重于局部主题的知识演化。通过聚类算法和多条主路径的结合，从局部和整体角度检测一个领域的知识结构的研究较少[31]。前述利用Pathfinder算法得出的引文网络的主题发展路径中，源点和中介点表示各子主题路径过去的发展轨迹，而汇点表明现阶段主题的发展重点和发展趋势，汇点之间的耦合特征进一步表明汇点文献之间的相似性以及潜在主题路径之间的发展演变趋势。

文献耦合的概念最早是由美国学者Kessler[32]提出的，耦合强度是指单篇文献被两篇目标文献引用的次数，耦合强度越高表示两篇目标文献共享的引用次数越多。例如：若两篇文献引证了相同的参考文献，则他们之间构成耦合关系，他们所包含的相同参考文献的数量称为耦合强度，耦合强度通常被视为文档-文档（语义）相似性的指标。利用汇点本身以及汇点与上级节点的链接关系，将所有汇点链接进行截断并记录所链接上级中介点信息。根据文献耦合原理依据节点间链接关系对汇点进行聚类分析，并联系主题演化网络，可以进一步分析各主题及主题路径之间的演化现状及发展趋势。

4 绿色城市发展领域实证分析

4.1 节点信息统计

首先，将获取到的数据导入HistCite 2.0软件进行节点筛选，删除LCS和LCR值均为0的节点后得到国内文献节点201个，国外文献节点333个。其次，将筛选后的数据导入Pajek软件进行引文网络作图，标记引文网络中较小离散拓扑节点信息，并通过Pajek软件的Remove操作进行删除。最后，对引文网络结构保留的最大组件进行后向路径搜索，去除途经节点数不超过3个的汇点，导出.mat引文网络矩阵数据并进行节点分类。将统计矩阵数据中出度为0的节点作为汇点，入度为0的节点作为源点，并分类统计现有矩阵中源点、中介点及汇点数量，具体信息如表2所示。

表2　国内外绿色城市发展领域主题路径节点分类

单位：个

类别	源点数量	中介点数量	汇点数量	总计
国内	4	20	41	65
国外	4	25	22	51

4.2 主题演化及趋势分析

4.2.1 国内研究多主题路径分析

（1）国内主题演进路径。国内绿色城市发展领域主题演进路径如图4所示，以源点2、3、5、8为起点，发展出两条主要的主题研究路径。其中分支较少的集群为主题路径①，节点数较多的集群为主题路径②。主题路径节点信息如表3所示。

主题路径①：城市水文管理中低影响开发的有效性验证。主要探究低影响开发和绿色基础设施对于城市内部水文管理的有效性和性能作用。节点2为源点，节点4、9、17构成主要路径基础，探究以绿色基础设施为代表的低影响开发技术对于城市水文管理的作用情况及实践成本。从节点21开始，将研究的作用对象从绿色基础设施大类逐步细化具体至低影响开发设施，探究

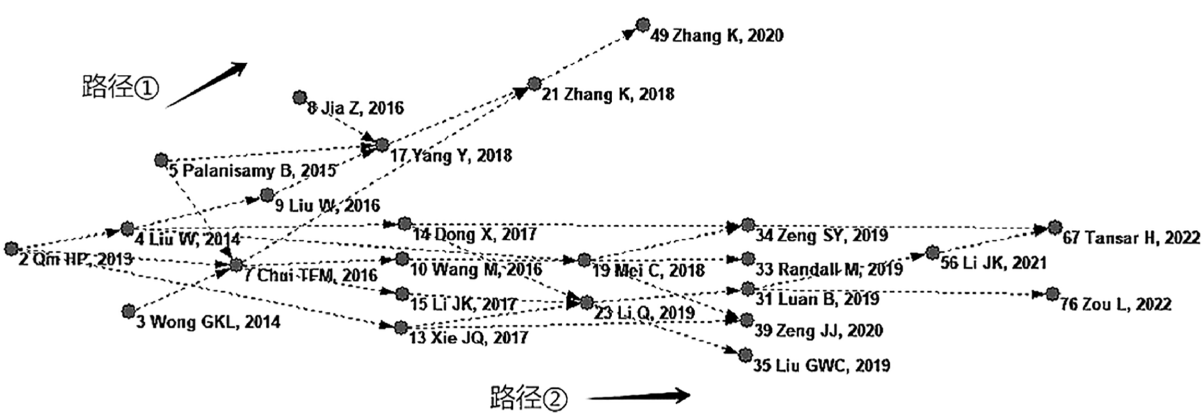


图4　国内绿色城市发展领域主题演进路径

表3　国内绿色城市发展领域主题路径节点信息（部分）

节点编号	类别	题录信息	说明
2	源点	不同降雨特征下低影响开发对城市内涝的影响	主题词：低影响开发、绿色基础设施、城市水文
3		热带湿润降雨条件下大面积绿化屋顶的定量水文性能	
5		低影响开发技术修复城市集水区的混凝土运河	
8		小规模绿色基础设施设计满足不同城市水文标准	
4	中介点	评估绿色基础设施对城市内涝减排的有效性	路径①：城市水文管理中低影响开发的有效性验证（关键词：模拟、设计、有效性、性能分析）
9		绿色基础设施对社区雨水减排的成本效益分析	
17		设计风暴下低影响开发实践水文性能的快速评估	
21		通过SWMM模拟浅层地下水低影响开发的水文性能	
49		设计减轻浅层地下水对透水路面水文性能的影响	
7		评估特定低影响开发设计应对大型风暴事件的成本效益	路径②：低影响开发管理城市水文的成本效益评估（关键词：成本效益、策略评估、综合效益及效率评估、SWMM动态模型、TOPSIS综合评价法、概率分析法）
10		评估雨水生物滞留对气候变化和城市化成本效益	
13		城市洪涝缓解策略的综合评估	
14		增强城市排水系统未来韧性-绿色基础设施与灰色基础设施	
15		城市雨水管理措施低影响发展综合效益评价体系	
19		对绿色减洪基础设施进行综合评估以支持城市化流域海绵城市建设的稳健决策	
23		海绵城市建设低影响开发实践的综合绩效评价	
31		基于SWMM的TOPSIS评估快速城市化集水区的绿色雨水基础设施策略效率	
33		使用SWMM评估集水区尺度海绵城市	
34		了解低影响开发设施排水管网间的协同效应：综合视角	
35		一种快速而强大的雨水水质管理模拟优化方法	
39		使用分析概率法优化低影响开发实践的成本效益	

其在改善浅层地下水水文性能方面的作用。

主题路径②：低影响开发管理城市水文的成本效益评估。主要利用动态模型和评价分析方法在建模分析的基础上探究一系列低影响开发措施在城市水文管理中的效益和成本。该主题路径分别沿着节点4和节点7展开：一方面，在验证低影响开发对城市水文管理有效性的基础上（节点4）研究低影响开发在城市水文管理实践中的作用；另一方面，从评估低影响开发措施实践设计的成本效益（节点7）开始，对低影响开发对城市水文管理的作用效果进行评价分析。随着研究的逐步深入，对于低影响开发措施系统应用的评估逐渐细化，通过将其应用至不同区域尺度和城市类型，探究不同系统作用环境下低影响开发措施在水文管理方面的有效性。

（2）国内主题演进趋势。通过对引文网络节点分类，根据其所处位置探讨其发挥作用。汇总主题演进过程中尾部节点与上一节点链接信息，并对尾部节点分类，以此代表各主题路径未来发展趋势。国内绿色城市发展领域部分主题演进趋势如图5所示。按照关联层

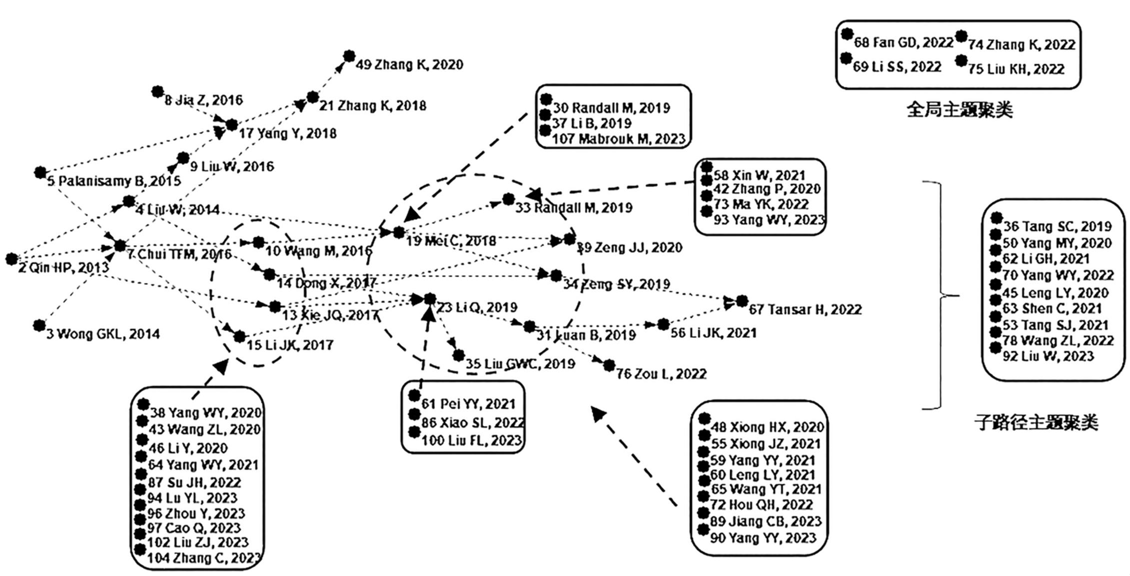


图5　国内绿色城市发展领域部分主题演进趋势

次，主要发现一个全局发展趋势、一个路径主题融合趋势和两个区域主题融合趋势，以及3个节点路径深入拓展趋势，图5中以圆角矩形框标识。由于全局层面主题融合发展趋势相关文献仅包括4篇文章，文章数量较少且主要集中在2022年，下文不做具体阐述，主要介绍3个方面的主题演进趋势。

第一，海绵城市背景下城市集水区实践效果评估。该主题研究主要以海绵城市为研究对象，以节点19、23、33等为主要引用对象，探究在海绵城市的基础上进行低影响开发的绩效评价以及低影响开发对于海绵城市建设的支持作用，此外还涉及低影响开发措施具体应用在城市集水区管理方面的作用效果评估。

第二，多因素考虑下低影响开发设计与布局。以节点10、13、14、15为代表的文献围绕低影响开发对于城市水文系统管理的有效性及评估深入展开研究，并进一步考虑城市环境与城市需求，展开低影响开发系统的设计和区域选址布局，同时就极端天气条件对低影响开发实践绩效的影响进行深入分析。

第三，城市背景下低影响开发设施的作用策略分析。节点33和节点19尽管通过海绵城市构成引文关系，但在研究重点上并非以海绵城市为主要研究对象，而是侧重于评估低影响开发对于城市化流域水文管理的效益。当前研究重点关注不同城市规划背景下低影响开发在缓解城市洪水以及城市径流方面的作用表现。此外，节点107还研究了低影响开发设施在城市抗洪方面的有效性。

4.2.2　国外研究多主题路径分析

（1）国外主题演进路径。国外绿色城市发展领域主要有3条主题演进路径，如图6所示，主题路径节点信息如表4所示。

节点16、17、19、34为研究起点，围绕低影响开发、雨水管理和土壤生物对城市水文径流的影响展开研究。相较于国内绿色城市发展领域的研究起点而言，其不仅面向城市水文，还涵盖了城市流域范围的应用分析，此外探究了土壤生物在城市水文管理方面的作用，具体内容如下。

主题路径①：低影响开发城市水文管理系统设计有效性分析。该主题路径强调利用系统建模分析方法对设计的各种形式的低影响开发工具系统的表现进行评估。以城市化流域低影响开发实践的有效性评价分析（节点19）及流域尺度雨水管理模型设计研究（节点16）为主要研究起点，以各种低影响开发实践为主要研究对象进行建模，分析验证低影响开发工具在城市流域尺度水文管理方面的作用表现，并通过多种建模分析方法及情景模拟分析低影响开发实践在城市水文管理方面的效果差异。

主题路径②：绿色基础设施作用多样性验证分析。该主题路径落脚于绿色基础设施建设方面，以节点55为代表，围绕绿色基础设施对于城市水文的各方面影响展开研究。其中包括绿色基础设施对城市雨水管理的有效性分析、对恢复地区水预算潜力等的作用分析，

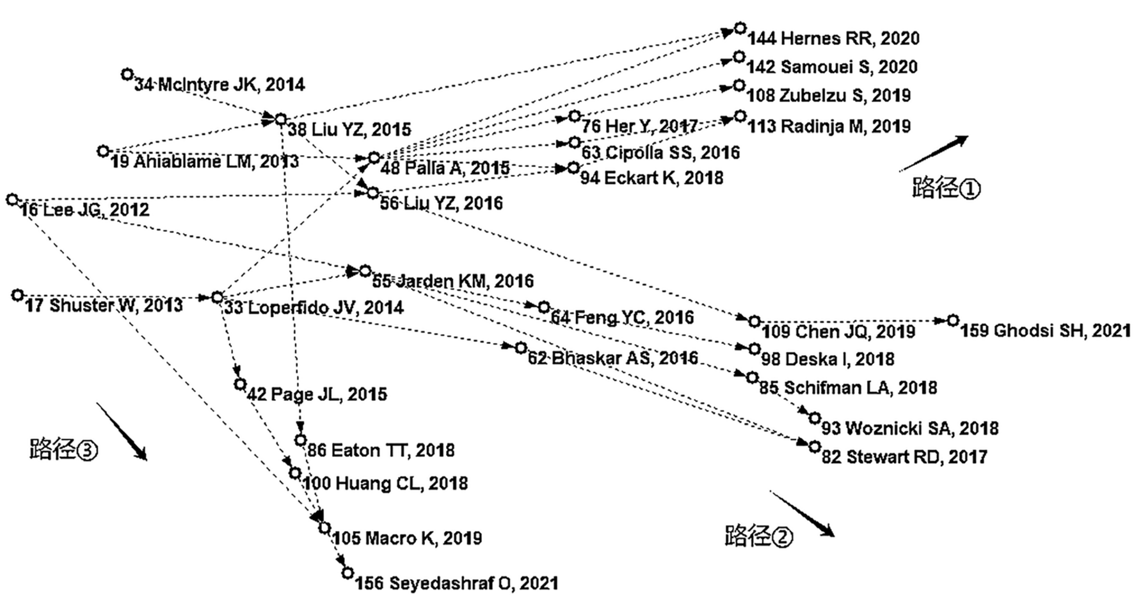


图6　国外绿色城市发展领域主题演进路径

表4 国外绿色城市发展领域主题路径节点信息（部分）

节点编号	类别	题录信息	说明
16	源点	雨水最佳管理实践的流域尺度设计优化模型	主题词：低影响开发、雨水管理、城市水文、城市径流
17		宗地级雨水管理对流域规模水文的影响	
19		城市化流域低影响开发实践的有效性	
34		评估土壤生物保持对有毒城市径流的保护性处理	
38	中介点	基于降雨径流模型流域尺度水文水质管理实践有效性分析	路径①：低影响开发城市水文管理系统设计有效性分析（关键词：流域尺度、分散式低影响开发措施、系统水文建模、影响表现、优化设计）
48		城市流域尺度低影响开发系统的水文建模	
63		SWMM对大面积绿化屋顶进行长期水文建模	
76		使用水土评估工具对分散式低影响开发项目建模	
144		评估SUDS情景下低影响开发对合流下水道溢流影响	
55		流域规模城市绿色基础设施改造对水文影响评估	路径②：绿色基础设施作用多样性验证分析（关键词：绿色基础设施、水文影响、有效性）
56		绿色基础设施的最佳选择放置减少土地利用和气候变化对水文水质的影响	
64		绿色基础设施恢复城市集水区开发前水预算潜力	
82		对城市生物滞留单元的水文响应进行建模	
93		绿色基础设施在郊区集水区雨水管理中有效性	
109		绿色基础设施对合流下水道溢流社区水文水质有效性评价	
33		分布式和集中式雨水最佳管理实践和土地覆盖对流域尺度城市河流水文的影响	路径③：绿色基础设施的多目标优化研究（关键词：治理措施、设计规划、多目标优化雨水治理、城市）
42		采用创新的雨水控制措施进行改造：对市政通行权中的不透水覆盖物进行水文缓解	
86		城市雨水治理绿色基础设施筛选分析方法	
100		优化特大城市防洪的低影响开发布局设计	
105		多目标优化工具用于SWMM绿色基础设施规划	
156		不同地表坡度城市可持续排水系统的多目标优化	

以及绿色基础设施自身的位置选择和使用装置等对于城市水文管理的效果探究。

主题路径③：绿色基础设施的多目标优化研究。该主题路径通过使用多目标优化工具对各种绿色基础设施进行改造、设计及创新，进一步提升低影响开发在城市水文中的实践价值。以节点33、42为代表，对绿色基础设施开展分布式和集中式的创新改造，以探究其应用效果为研究起点，逐步将研究重点放在绿色基础设施在应用规划方面存在的问题上，并采用多目标优化、SWMM模型建模等对其进行改进。

（2）国外主题演进趋势。国外绿色城市发展领域部分主题演进趋势如图7所示，主要包含一个全局发展趋势和4个建立在节点上的研究趋势。现阶段研究主要处于全局趋势的内容框架之中，主要关注不确定条件下

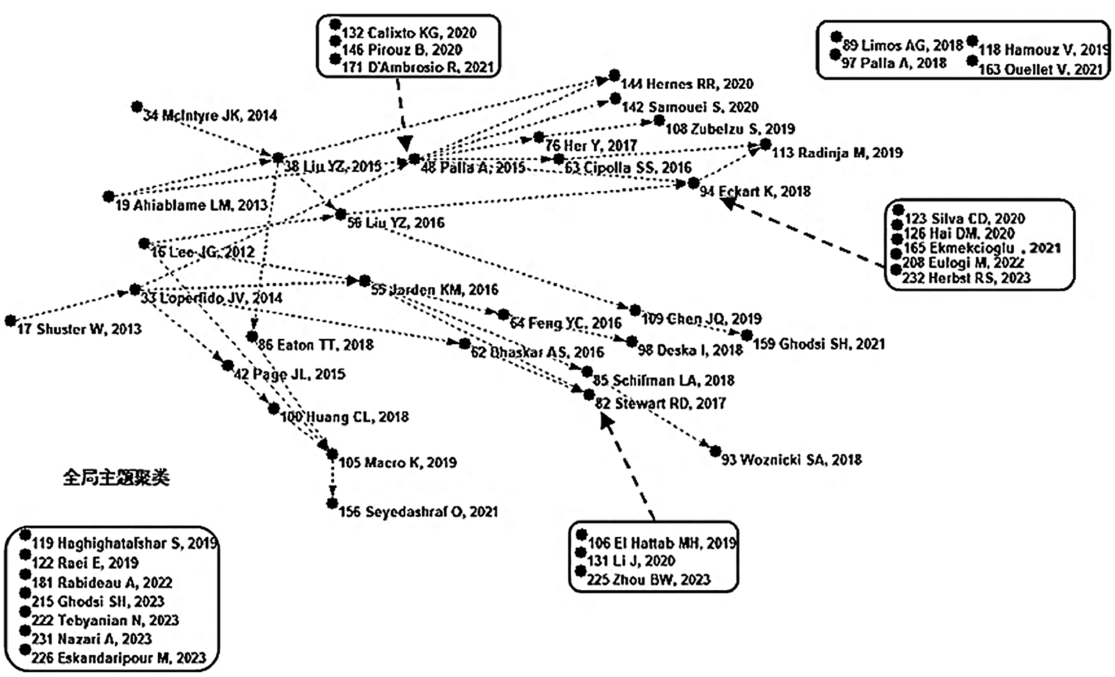


图7 国外绿色城市发展领域部分主题演进趋势

城市低影响开发实践的最佳选择与决策问题。

第一，不确定条件下城市低影响开发实践的最佳选择与决策问题。全局层面，研究主要涉及低影响开发在城市水文管理中的有效性验证及目标优化分析。不同于先前研究（如节点56、86、105、109等）在确定的外部条件下开展系统优化分析，现阶段研究更多考虑的是不确定环境因素下低影响开发设施的规划及部署问题。

第二，多种因素条件下低影响开发的多目标优化。以节点76和48为基础的后续研究发展较为缓慢，与节点94有关的后续研究更多且研究时间更近、趋势性更加明显。节点94主要关注低影响开发在雨水管理过程中的优化问题，现阶段研究在其基础上进一步细化城市区域，例如关注上游地区和高度城市化地区低影响开发优化规划等。此外，节点232还将社会公平等相关因素纳入低影响开发的多目标优化过程。

第三，生物滞留设施水文建模及效果评估。节点82主要考虑生物滞留设施对于城市水文的影响，其中城市生物滞留单元是指在地势较低的区域，通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化径流雨水的设施。现阶段的研究主要集中在路边生物滞留设施的水文建模方法创新，以及三角堰设计优化和全面性能评估等方面。

4.2.3 国内外对比分析

对比国内外绿色城市发展领域多主题路径演进分析结果，发现以下异同点。从研究范围尺度上看，国内绿色城市发展研究不仅涉及不同城市类型，还从流域以及块状集水区尺度分别展开研究，而国外仅侧重于城市流域尺度规模上的低影响开发实践。从主题演进内容上看，国内外均自2013年左右形成领域内主题发展的研究基础，起步时间相当。低影响开发和绿色基础设施是绿色城市发展领域的关注重点，国内倾向于评价利用低影响开发解决城市内涝和雨水等一系列水文问题的实践的成本绩效，国外则注重探究雨水管理以及水文水质改善方面低影响开发的系统建模及设计优化。从主题演进趋势上看，国内外均考虑城市背景及各种不确定因素条件下低影响开发的设计与布局问题，即在经过前期的作用验证和评估后转向实际应用层面，进一步考虑低影响设施的实践适用性。不同点主要包括3个方面：①国外研究将视角转向生物滞留设施对于城市内部水文水质改善的作用效果，不局限于低影响开发和绿色基础设施，选择通过自然改造的方式进行绿色城市建设；②国内研究将视角转向海绵城市的建设，对海绵城市中海绵设施的城市水文改善效果进行分析，更加注重城市整体功能性改造；③国内研究除了探究低影响开发对城市水文的改善效果，还进一步探究了低影响开发等一系列基础设施建设对于气候变化以及城市抗洪能力的影响。

5 结论及展望

本文围绕绿色城市发展领域，利用改进的主路径分析方法实现多主题路径呈现，并依据引文网络结构，通过对尾节点进行耦合处理，分析各子路径发展现状及发展趋势，得出以下结论。①研究方法层面，通过Pathfinder算法得到的多主题路径有效且清晰地展示了国内外绿色城市发展领域在研究走向上的联系与差异，揭示领域知识的交互转移。②主题演进路径层面，国内绿色城市发展主题演进路径包括城市水文管理中低影响开发的有效性验证、低影响开发管理城市水文的成本效益评估；国外主题演进路径包括低影响开发城市水文管理系统设计有效性分析、绿色基础设施作用多样性验证分析、绿色基础设施的多目标优化研究。③主题演进趋势层面，国内主题演进趋势主要包括海绵城市背景下城市集水区实践效果评估、多因素考虑下低影响开发设计与布局、城市背景下低影响开发设施的作用策略分析；国外主题演进趋势主要包括城市低影响开发实践的最佳选择与决策问题、多种因素条件下低影响开发的多目标优化、生物滞留设施水文建模及效果评估。④国内针对绿色城市发展的研究在范围尺度上更加全面，但缺少对于低影响开发系统的设计和优化，相关研究主要集中在成本绩效评估方面。当前，国内外相关研究均将不同城市背景纳入研究体系，国外更倾向于通过原始环境条件下的绿色基础设施改善城市水文环境，而国内将研究重点放在海绵城市的建设上，更主张通过城市整体建设解决城市水文问题。

基于上述研究，对国内绿色城市发展研究提出以下展望。①进一步拓展主题之间的融合发展研究。通过主题演进趋势结构特征发现，国内外研究趋势主要为单一主题集群的拓展融合，跨路径的融合发展研究较少。②增加关于低影响开发实践系统的多目标优化设计等研究。国内绿色城市发展研究大多集中在低影响开发实践成本绩效评估分析方面，较少有研究关注不同

城市背景条件下低影响开发系统多目标优化改进等内容。③进一步拓展低影响开发等相关绿色基础设施研究范围，考虑到国内各城市发展背景的差异性，可以借鉴国外视角考虑生物滞留设施对于城市水文的管理和改善作用。

当前主题演化路径分析在识别主题路径过程中对主题路径发展演化及交叉融合趋势的直观展现存在不足，本研究基于原始引文网络自身的结构特征优势，利用Pathfinder算法改进主路径分析方法，实现主题与路径的同步识别，既增加了主题路径同步识别数量也挖掘出主题发展、融合历程及未来演进趋势。但仍存在可改进空间，有待今后进一步探索和深化：①除期刊论文以外，还可以进一步拓展研究内容，包括融合作者机构等信息或不局限于文献研究成果，拓展至更加广泛的文本类研究内容；②考虑到引用行为产生的动机、引用类型等实际引用情况的多变性，依据引用情况调整链接权重，挖掘深层次引文联系，进一步提高分析准确性。

参考文献

[1] 黄严严，赵海涛，张立，等. 引文视角下国际学术出版研究的知识基础及演进路径探析[J]. 编辑学报，2023，35（S1）：6-13.

[2] 刘自强，王效岳，白如江. 多维主题演化分析模型构建与实证研究[J]. 情报理论与实践，2017，40（3）：92-98.

[3] BATAGELJ V，MRVAR A. Pajek：analysis and visualization of large networks[M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin：Springer Berlin Heidelberg，2002：477-478.

[4] 李湘东，张娇，袁满. 基于LDA模型的科技期刊主题演化研究[J]. 情报杂志，2014，33（7）：115-121.

[5] HUANG L，CHEN X，ZHANG Y，et al. Identification of topic evolution：network analytics with piecewise linear representation and word embedding[J]. Scientometrics，2022，127（9）：5353-5383.

[6] 石忆邵，刘丹璇. 城市概念的蔓生与规范刍议[J]. 现代城市研究，2021，36（9）：97-102.

[7] 高楠，高嘉骐，陈洪璞. 新兴技术识别与演化路径分析方法研究：以集成电路领域为例[J]. 情报科学，2023，41（3）：127-135，172.

[8] 金心怡. 基于LDA和word2vec的主题演化研究：以科学计量学领域为例[D]. 南京：南京航空航天大学，2020.

[9] 关鹏，王曰芬，傅柱. 基于LDA的主题语义演化分析方法研究：以锂离子电池领域为例[J]. 数据分析与知识发现，2019，3（7）：61-72.

[10] 王卓，王宏起，李玥. 产业联盟创新生态系统领域主题演化轨迹研究[J]. 科学学研究，2020，38（4）：723-733.

[11] 王康，高继平，潘云涛，等. 多位态研究主题识别及其演化路径方法研究[J]. 图书情报工作，2021，65（11）：113-122.

[12] 黄菡，王晓光，何静，等. 基于矩阵相似度的主题演化路径判别研究[J]. 情报学报，2023，42（11）：1265-1275.

[13] 陈翔，黄璐，倪兴兴，等. 基于动态语义网络分析的主题演化路径识别研究[J]. 情报学报，2021，40（5）：500-512.

[14] 范少萍，安新颖，单连慧，等. 基于医学文献的主题演化类型与演化路径识别方法研究[J]. 情报理论与实践，2019，42（3）：114-119.

[15] 王康，陈悦，苏成，等. 多维视角下科学主题演化分析框架[J]. 情报学报，2021，40（3）：297-307.

[16] 梁爽，刘小平，柴文越. 主题-引文融合视角下重要主题发现及知识流动路径研究[J]. 数据分析与知识发现，2024，8（2）：99-113.

[17] 祝清松，冷伏海. 基于引文主路径文献共被引的主题演化分析[J]. 情报学报，2014，33（5）：498-506.

[18] 焦红，李秀霞. 基于研究主题的学科领域知识演化路径识别：以图书情报领域粗糙集为例[J]. 情报理论与实践，2019，42（3）：101-106.

[19] 祝娜，王芳. 基于主题关联的知识演化路径识别研究：以3D打印领域为例[J]. 图书情报工作，2016，60（5）：101-109.

[20] GOFFMAN W. Mathematical approach to the spread of scientific ideas：the history of mast cell research[J]. Nature，1966，212（5061）：449-452.

[21] JAHN M J. Changes with growth in the structure of the scientific literatures of two biomedical specialties[D]. Philadephia：Drexel University Libraries，Master of Science（M.S.），1972.

[22] SHIBATA N，KAJIKAWA Y，TAKEDA Y，et al. Detecting emerging research fronts based on topological measures in citation networks of scientific publications[J]. Technovation，2008，28（11）：758-775.

[23] 张月红. HistCite：一个新的科学文献分析工具[J]. 中国科技期刊研究，2007，18（6）：1096.

[24] 崔玲宇，喻曼，乔宇颖，等. 基于Web of Science数据库的土壤质量评价及其微生物指标研究趋势分析[J]. 浙江农业学报，2023，35（11）：2688-2697.

[25] 王福生，杨洪勇. 《情报学报》作者科研合作网络及其分析[J]. 情报学报，2007，26（5）：659-663.

[26] LIU J S，LU L Y Y. An integrated approach for main path analysis：development of the Hirsch index as an example[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology，2012，63（3）：528-542.

[27] 马瑞敏，张欣. 基于Pathfinder算法的领域知识交流主路径发现研究[J]. 情报学报，2016，35（8）：856-863.

[28] DE NOOY W，MRVAR A，BATAGELJ V，et al. Exploratory social network analysis with Pajek（structural analysis in the social sciences）[J]. Psychometrika，2011，71（3）：605.

[29] SCHVANEVELDT R W. Pathfinder associative networks：studies in knowledge organization[M]. Norwood：Ablex Pub. Corp.，1990.

[30] 汤天波. Pathfinder算法优化研究[J]. 计算机应用与软件，2015，32（11）：277-280.

[31] YU D J，PAN T X. Tracing knowledge diffusion of TOPSIS：a historical perspective from citation network[J]. Expert Systems with Applications，2021，168：114238.

[32] KESSLER M M. Bibliographic coupling extended in time：ten case histories[J]. Information Storage and Retrieval，1963，1（4）：169-187.

作者简介

汝绪伟，男，博士，副研究员，研究方向：区域创新与科技成果转化、数字经济与绿色发展，E-mail：ruxuwei@163.com。
薛春丽，女，硕士研究生，研究方向：科技与创新管理。
郑心如，女，硕士研究生，研究方向：科技与创新管理。
王艳英，女，博士，助理研究员，研究方向：科技政策与区域创新。
纪宗华，男，硕士，助理研究员，研究方向：科技战略与政策。

Identification of Multi-Thematic Pathways in the Field of Green Urban Development and Analysis of Their Evolutionary Trends

RU XuWei[1,2,3] XUE ChunLi[1,2] ZHENG XinRu[1,2] WANG YanYing[1,2,3] JI ZongHua[1,2,3]
(1. Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, P. R. China; 2. Institute of Science and Technology for Development of Shandong, Jinan 250014, P. R. China; 3. Science and Technology Innovation Governance and Intelligent Decision-Making Laboratory of Higher Education Institutions in Shandong Province, Jinan 250014, P. R. China)

Abstract: Currently, most of the theme evolution path analyses study the themes and paths separately. This paper tries to use an improved main path analysis method, focusing on the field of green urban development and relying on the citation network structure, to extract the multi-thematic paths and trends in this field, to achieve the simultaneous identification of the themes and evolution paths, and to visually show the development trend of inter-thematic fusion. Through multi-path theme identification based on Pathfinder algorithm, truncation and clustering of theme paths are conducted based on the principle of literature coupling. The evolution process and development trend of theme paths in the field of green urban development are analyzed from the perspectives of citation and quotation. The results of the study show that the multi-thematic path identification method based on the Pathfinder algorithm can effectively and clearly show the developmental links between the themes in the field, and reveal the interactive transfer of knowledge content. The research on green urban development focuses on the practical impacts of low-impact development on urban hydrology. The domestic research mainly includes two major thematic paths of effectiveness verification and cost-benefit assessment, while the foreign research mainly includes effectiveness verification, role diversity analysis, and multi-objective optimization. The research on green urban development at home and abroad tends to focus on the expansion and integration of a single theme cluster, while there is relatively little research on the integration and development of cross-theme paths. The main development trend in this field is to conduct research on low-impact development practices under the background conditions and uncertain factors of integrated cities.

Keywords: Multi-Thematic Path; Pathfinder Algorithm; Green Urban Development; Path Identification; Literature Coupling

（责任编辑：王玮）