

# 中国环境工程科技 2035 技术预见研究

但智钢<sup>1</sup>, 史菲菲<sup>1</sup>, 王志增<sup>2</sup>, 王辉锋<sup>1</sup>, 张裴雷<sup>1,3</sup>, 郝吉明<sup>3</sup>, 段宁<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院重金属清洁生产工程技术中心, 北京 100012; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 技术预见是制定科技发展战略和科技政策的重要基础, 德尔菲调查是技术预见中最常用的方法。本研究通过文献分析、专家建议、会议讨论等方法, 从大气污染防治、水污染防治、固体废弃物污染防治与资源化、土壤污染防治、生态保护与恢复、环境监测预警与风险控制、资源利用与清洁生产 7 个子领域提出我国环境工程领域的 45 项备选技术。根据德尔菲法的调查结果, 初步筛选出 2035 年我国环境工程科技发展的关键技术、共性技术以及颠覆性技术, 分析了技术实现时间、发展水平与制约因素, 为未来 20 年我国环境工程科技发展战略和目标的制定提供参考。

**关键词:** 环境工程科技; 技术预见; 德尔菲调查; 关键技术; 共性技术; 颠覆性技术

**中图分类号:** X32 **文献标识码:** A

## Technology Foresight Research on China's Environmental Engineering Science and Technology to 2035

Dan Zhigang<sup>1</sup>, Shi Feifei<sup>1</sup>, Wang Zhizeng<sup>2</sup>, Wang Huifeng<sup>1</sup>, Zhang Peilei<sup>1,3</sup>,  
Hao Jiming<sup>3</sup>, Duan Ning<sup>1</sup>

(1. Technology Center for Heavy Metal Cleaner Production Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The Delphi method is the most common method of technology foresight, which is a significant basis for establishing development strategies and policies of science and technology. This study proposes 45 alternative technologies in the field of environmental engineering science and technology through a literature survey, experts' advice, and discussion meetings. These technologies relate to air pollution prevention and control; water pollution prevention and control; soil pollution prevention and control; solid waste pollution prevention, control, and utilization; ecological protection and restoration; environmental monitoring, early warning, and risk control; resource utilization and cleaner production. Based on results that were obtained according to the Delphi method, this research analyzes the realization time, R&D level, and restriction factors for the key technologies, common technologies, and disruptive technologies that were determined for 2035. This study provides a reference for establishing development strategies and objectives for China's environmental engineering science and technology over the next 20 years.

**Keywords:** environmental engineering science and technology; technology foresight; Delphi method; key technology; common technology; disruptive technology

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2016-12-20

通讯作者: 但智钢, 中国环境科学研究院重金属清洁生产工程技术中心, 副研究员, 研究领域为清洁生产理论、方法与政策;

E-mail: dash\_2001@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国工程科技 2035 发展战略研究”(2015-ZD-14)

本刊网址: www.enginsci.cn

## 一、前言

技术预见是通过科学方法和分析过程,对未来科技发展的战略重点、重点领域和重要技术进行的研判和预测 [1~3]。20世纪90年代以来,科学技术在经济发展中的作用日益增强,世界各国纷纷把技术预见作为制定政策、规划和科技发展战略的重要环节。技术预见方法包括德尔菲法、专家会议法、趋势分析法、情景分析法等研究方法 [4]。德尔菲法又称专家规定程序调查法,是一种非见面形式的专家意见收集方法,是一种高效的、通过群体交流与沟通来解决复杂问题的方法 [5],该方法广泛应用于各国科技中长期发展战略的研究领域。

随着我国经济的快速增长,环境问题日益成为制约我国经济发展的关键短板。环境工程科技是解决环境问题的核心抓手,未来20年是我国经济社会发展的关键时期,准确、科学地把握环境工程科技至关重要。本研究依托“中国工程科技2035发展战略研究”项目,基于德尔菲法,筛选出环境工程科技发展的关键技术、共性技术及颠覆性技术,分析技术实现时间、发展水平和制约因素,为我国环境工程科技的发展思路和未来技术选择提供支撑。

## 二、技术预见方法与过程

### (一) 德尔菲法

#### 1. 调查项设置

“中国工程科技2035发展战略研究”德尔菲调

查问卷共设9栏53个选项,包括对技术的熟悉程度、技术本身重要性、技术应用重要性、我国当前该技术研发水平、目前国际领先国家、该技术的技术实现时间(世界)、该技术的技术实现时间(中国)、该技术的社会实现时间(中国)、该技术的制约因素(多选)。其中技术本身重要性包括核心性、通用性、带动性和非连续性4个单因素指标;技术应用重要性包括经济发展、社会发展、国防与国家安全3个单因素指标。调查问卷见表1。

问卷调查设置了专家对该技术的熟悉程度,包括很熟悉、熟悉、较熟悉、不熟悉。数据计算时,根据熟悉程度赋予不同的权重。

#### 2. 分析指标设置

为最终筛选出关键技术、共性技术和颠覆性技术,根据7个单因素指数、技术本身重要性、技术应用重要性,分别构建了对应的关键技术指数、共性技术指数和颠覆性技术指数,各指数关系见图1。

这三个指标均考虑技术对经济、社会、国家国防安全是否产生重要影响,侧重点略有不同。关键技术侧重于技术的核心性与带动性,共性技术着重于技术广泛的应用范围,颠覆性技术强调对现有主流技术的替代作用。

### (二) 备选技术确定

#### 1. 划分子领域

环境工程科技涉及面广,专业差异大。本研究在“中国环境工程科技2030发展战略研究”的基础上,参考日本第十次技术预见、中华人民共和国科学技术部“中国未来二十年技术预见”的技术分

表1 技术预见研究德尔菲调查问卷

对技术的熟悉程度	技术本身重要性				技术应用重要性		
	核心性	通用性	带动性	非连续性	经济发展	社会发展	国防与国家安全
很熟悉 熟悉 较熟悉 不熟悉	高 较高 中 低	高 较高 中 低	高 较高 中 低	高 较高 中 低	高 较高 中 低	非常有利 有利 比较有利 影响不大	高 较高 中 低
我国当前该技术研发水平	目前国际领先国家	该技术的技术实现时间(世界)	该技术的技术实现时间(中国)	该技术的技术实现时间(中国)	该技术的社会实现时间(中国)	该技术发展的制约因素(多选)	
国际领先 接近国际水平 落后国际水平	美国 欧盟 日本 俄罗斯 中国 其他	2040年前某年不能实现	2040年前某年不能实现	2040年前某年不能实现	2040年前某年不能实现	人才与科技资源 法律法规政策 标准规范 研发投入 工业基础能力 协调与合作	

类，在环境工程科技领域设置大气污染防治、水污染防治、固体废弃物污染防治与资源化、土壤污染防治、生态保护与恢复、环境监测预警与风险控制、资源利用与清洁生产 7 个子领域。

### 2. 确定备选技术清单

结合国家经济社会发展对环境工程科技的需求以及对未来工程的愿景，通过专家研讨与建议共提出备选技术 45 项，各子领域技术项分布见图 2。

### (三) 德尔菲调查情况分析

为保障技术预见的科学性和准确性，本研究对备选技术进行了两轮德尔菲调查，第二轮调查基本情况见表 2。从数量上看，各技术平均回收问卷数

为 30 份，调查具有统计意义。从图 3 (a) 调查专家分布情况看，高等院校和科研院所共占 71.4 %；而企业的参与度较低，填报人数仅占企业受邀请人数的 10.4 %。从图 3 (b) 专家对技术的熟悉程度看，56.2 % 的专家对所填报技术项选择“很熟悉”或“熟悉”，42.8 % 的专家选择“较熟悉”。总体来看，调查结果具有较好的专业性和统计分析价值。

## 三、环境工程科技技术预见结果分析

### (一) 总体情况

环境工程科技备选技术的重要指数得分情况见图 4。备选技术的关键技术指数、共性技术指数、

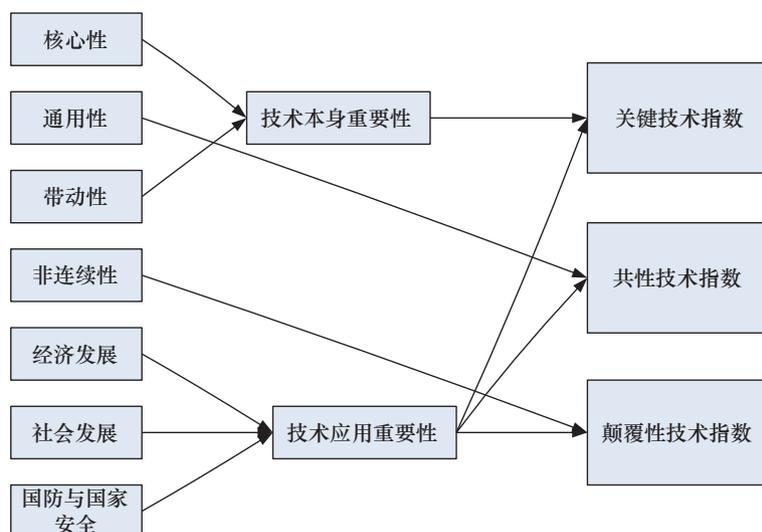


图 1 各重要性指数关系图

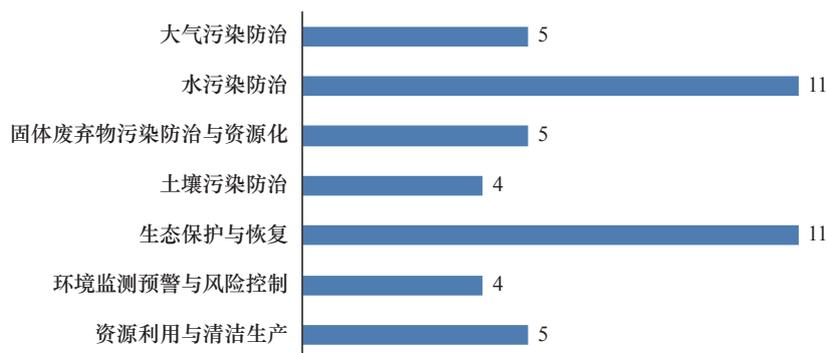


图 2 各子领域技术项分布

表 2 环境工程科技第二轮德尔菲调查基本情况

子领域 / 个	技术项 / 项	邀请人数 / 人	填报人数 / 人	问卷数 / 份	平均问卷数 / 份
7	45	921	220	1 350	30

颠覆性技术指数均值分别为 71.0、51.5 和 37.8。从重要性指数看，备选技术总体均值较好，显示筛选的技术具有较好的代表性，能反映环境工程科技的重点方向。

### (二) 环境工程科技的关键技术、共性技术和颠覆性技术

根据德尔菲调查结果，环境工程科技关键技术、共性技术和颠覆性技术指数排名前十的技术见表 3。排名前十的关键技术指数均在 74 以上，其中“地下水、饮用水微污染防治与安全利用技术”最高为 79.85；共性技术指数最高的是“流域污染控制的系统管理技术”，为 62.97；颠覆性技术指数最高的是“化学品生产过程中有毒有害原料与催化剂替代”，为 47.55。

### (三) 技术发展水平与约束条件

环境工程领域技术总体的研发水平较低（见图 5），95.6% 的技术处于较落后或落后阶段，与世界水平差距较大。研发水平指数最高的“节能高效的高分子产品短流程制备与成型技术”为 47.5，而最低的“环境应急监测、处理处置技术与装备”仅为 7.14。欧盟和美国是本领域的技术领先国家，总体的技术研发水平指数相对较高。大气污染防治、土壤污染防治、生态保护与恢复、环境监测预警与风险控制 4 个子领域美国占有绝对优势；水污染防治、固体废弃物污染防治与资源化、资源利用与清洁生产 3 个子领域欧盟处于领先地位。技术领先国家的分布情况见图 6（图 6 中横坐标分别对应图 2 中从上至下的 7 个子领域）。

整体来看，研发投入是环境工程科技发展最主

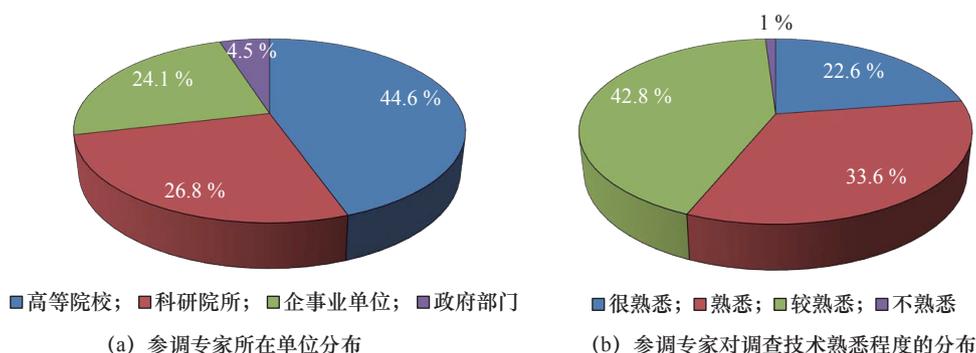


图 3 环境工程科技德尔菲调查情况分析

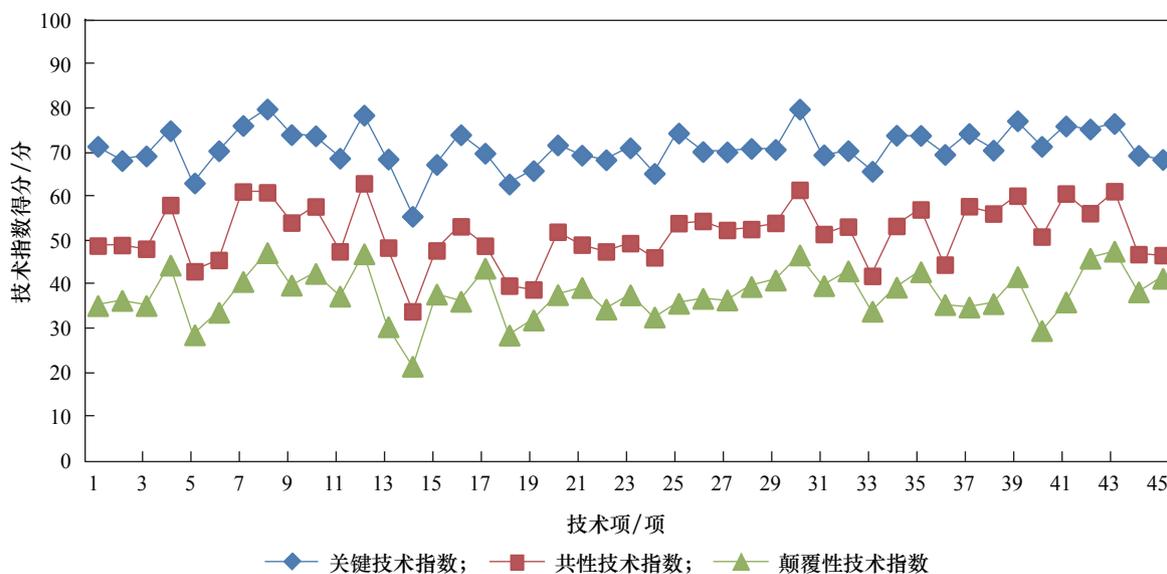


图 4 环境工程科技备选技术的重要指数得分情况

表 3 环境工程科技关键技术、共性技术、颠覆性技术指数前十技术

序号	关键技术	共性技术	颠覆性技术
1	地下水、饮用水微污染防治与安全利用技术	流域污染控制的系统管理技术	化学品生产过程中有毒有害原料与催化剂替代
2	生态脆弱区生态系统功能恢复与提升技术	生态脆弱区生态系统功能恢复与提升技术	地下水、饮用水微污染防治与安全利用技术
3	流域污染控制的系统管理技术	化学品生产过程中有毒有害原料与催化剂替代	流域污染控制的系统管理技术
4	环境质量综合立体监测 / 遥测技术	从源头到龙头保障饮用水水质安全及风险控制技术	生态脆弱区生态系统功能恢复与提升技术
5	化学品生产过程中有毒有害原料与催化剂替代	地下水、饮用水微污染防治与安全利用技术	含重金属湿法冶炼废渣无害化处理及资源化利用技术
6	从源头到龙头保障饮用水水质安全及风险控制技术	节能高效的高分子产品短流程制备与成型技术	机动车污染控制技术与装备
7	节能高效的高分子产品短流程制备与成型技术	环境质量综合立体监测 / 遥测技术	放射性废物的处理和处置技术
8	含重金属湿法冶炼废渣无害化处理及资源化利用技术	机动车污染控制技术与装备	水生态修复 + 互联网平台的基础信息系统
9	机动车污染控制技术与装备	高质量 / 多功能 / 集成化 / 智能化 / 网络化环境监测传感器	重大交通基础设施建设的生态保护与恢复技术
10	污染场地修复治理的成套技术和装备	工业废水脱盐与水回用关键技术	工业废水脱盐与水回用关键技术

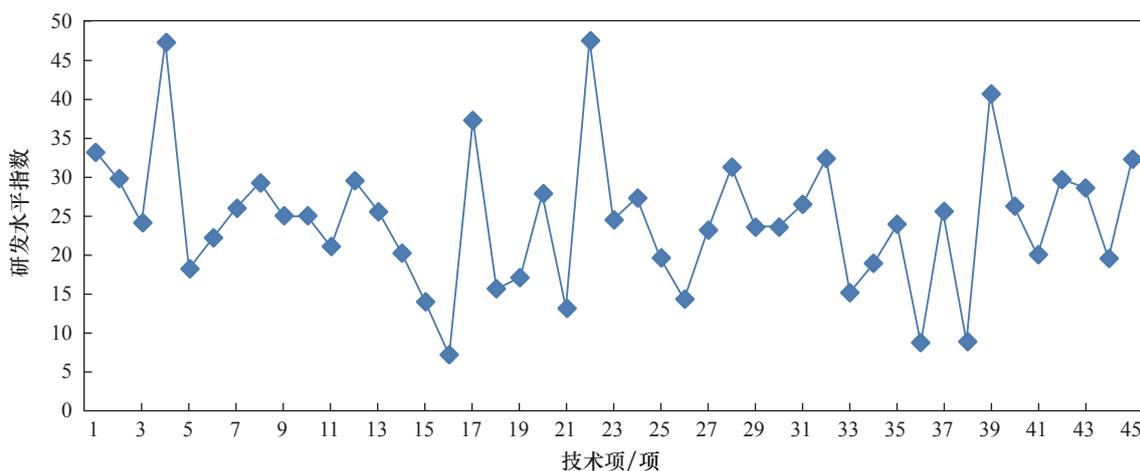


图 5 技术研发水平指数

要的制约因素，其次是人才队伍及科技资源，而协调与合作对技术发展影响不大。大气污染防治、水污染防治、环境监测预警与风险控制、土壤污染防治、资源利用与清洁生产 5 个子领域受研发投入的影响最大；固体废弃物污染防治与资源化、生态保护与恢复受人才队伍及科技资源影响较大。各子领域的技术制约情况见图 7。

#### (四) 技术实现时间分析

从调查结果看，环境工程领域中国和世界技术的实现时间基本呈正态分布（见图 8），中国的技术

平均实现时间约为 2025 年，世界的技术平均实现时间约为 2022 年，中国的技术实现时间整体上落后于世界的技术实现时间。中国的技术实现时间集中在 2024—2027 年，约占全部技术的 86.7 %；而世界范围内技术实现的时间基本在 2024 年前，约占全部技术的 99.8 %。与目前我国技术研发水平较低的现状相比，技术实现时间较为乐观。

#### 四、结语

对环境工程科技领域中的大气污染防治、水

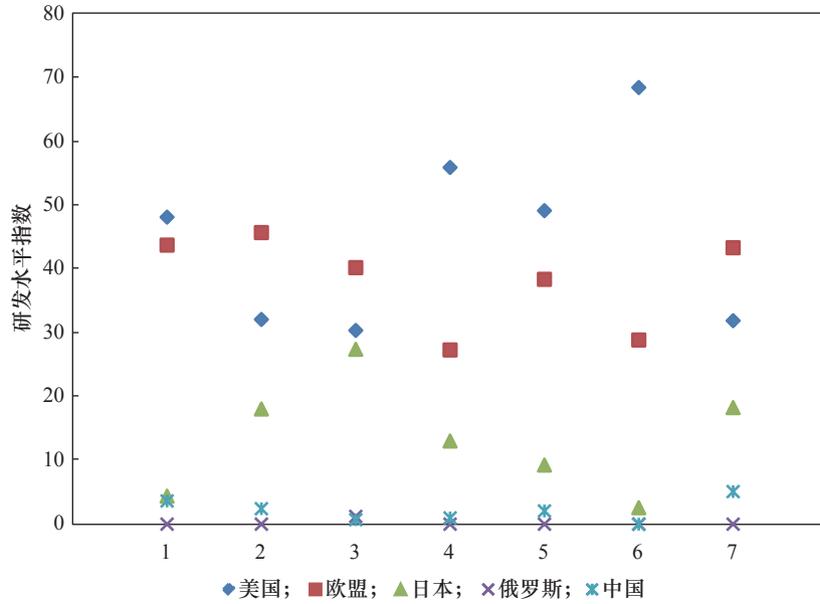


图6 技术领先国家的分布情况

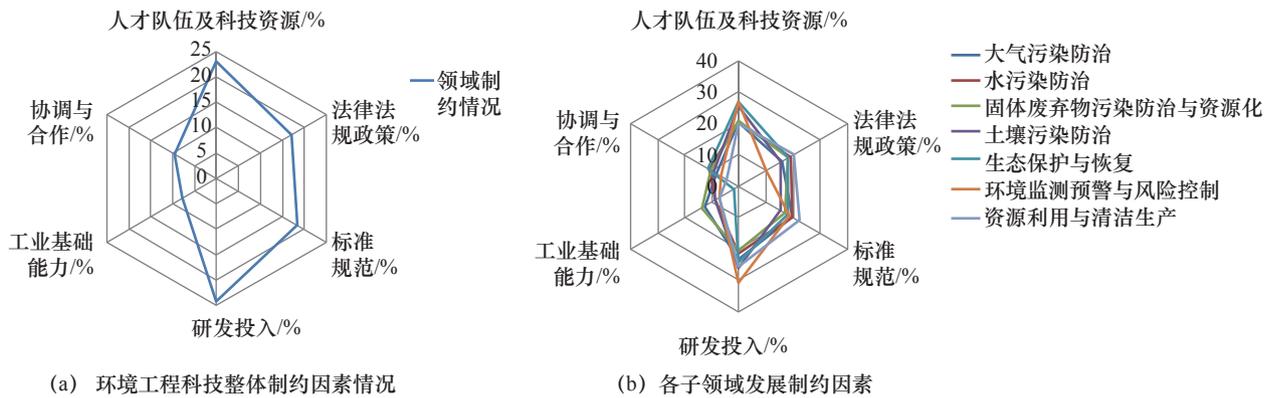


图7 各子领域制约因素指数

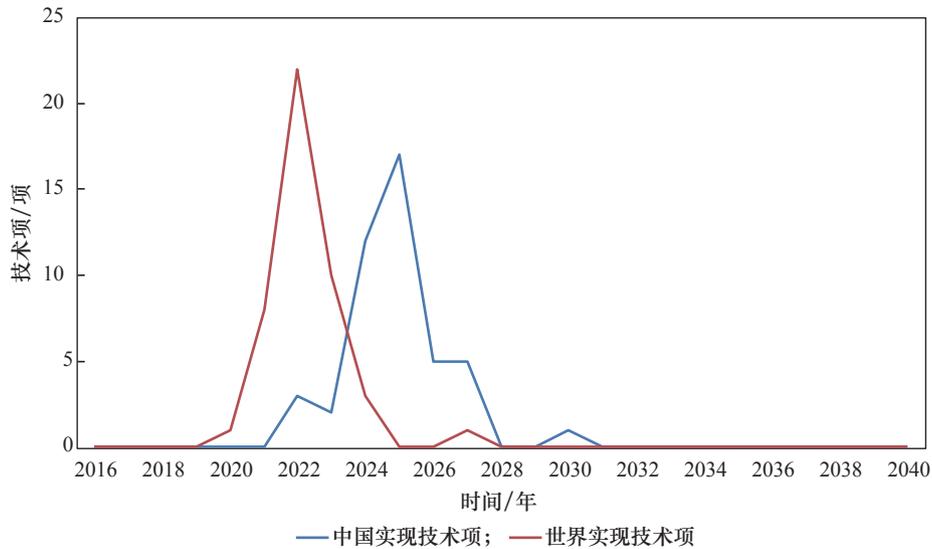


图8 中国和世界技术实现时间的比较分析

污染防治、固体废弃物污染防治与资源化、土壤污染防治、生态保护与恢复、环境监测预警与风险控制、资源利用与清洁生产 7 个子领域 45 项备选技术的德尔菲调查结果显示：(1) 环境工程科技备选技术关键技术指数、共性技术指数、颠覆性技术指数的均值分别为 71.0、51.5 和 37.8。关键技术指数排名前十的技术涉及全部 7 个子领域，具有较好的代表性，能反映环境工程科技的重点方向。(2) 环境工程科技技术平均研发水平指数仅为 24.4，总体研发水平较低，95.6% 的技术处于较落后或落后阶段，与世界水平差距较大；美国和欧盟处于本领域技术的领先地位。环境工程技术研发受研发投入的制约最大，其次是受人才队伍及科技资源的制约。

本文结果是根据德尔菲调查结果排序提出，仅反映调查数据的指向。受调查方法的局限性和技术研判的不可测性影响，环境工程科技关键技术、共性技术和颠覆性技术的确定，还需在参考德尔菲调查结果的基础上，进一步结合各领域专家的综合研判而提出。

#### 参考文献

- [1] Ben R M. Matching social needs and technological capabilities: Research foresight and the implications for social sciences (paper presented at the OECD workshop on social sciences and innovation) [Z]. Tokyo: United Nations University, 2000.
- [2] 袁志彬, 穆荣平, 陈锋. 中国未来20 年资源与环境技术预见研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18 (6): 157-161.  
Yuan Z B, Mu R P, Chen F. Foresight research on resource and environmental technology of future 20 years in China [J]. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2008, 18 (6): 157-161.
- [3] 中国未来20 年技术预见研究组. 中国未来20 年技术预见 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Research Group for Foresight Research on Technology of Future 20 Years in China. Foresight research on technology of future 20 years in China [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2008.
- [4] 陈德棉, 申期. 科学技术评估和预测引论 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1996.  
Chen D M, Shen Q. Introduction of scientific and technological assessment and prediction [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 1996.
- [5] Linstone H A, Turoff M. The Delphi method-techniques and applications [M]. New York: Addison -Wesley, 2001.