

# 水生植物水质净化国内研究现状及发展趋势的知识图谱可视化分析

谢 珺<sup>1</sup>, 詹然成<sup>1</sup>, 曾华军<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>2\*</sup>, 韩培锋<sup>2</sup>, 李 谦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国水利水电第七工程局有限公司南方分公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

<sup>3</sup>四川靓固科技集团有限公司, 四川 绵阳

收稿日期: 2021年10月23日; 录用日期: 2021年11月25日; 发布日期: 2021年12月1日

## 摘 要

水生植物水质净化是解决城市河道水污染的重要手段, 随着我国对生态环境的重视及污水治理投入的增加, 越来越多的学者投入水生植物水质净化机理研究, 为探讨该领域的研究热点及发展趋势, 以CNKI收录的相关文献为研究对象, 利用CiteSpace软件, 分别对论文作者、发文机构、关键词、关键词聚类图谱等进行矢量化图谱分析。分析结果表明发文量逐年增加, 受政策影响较大; 发文作者之间的联系较弱, 基本没有形成稳定的合作团队; 发文机构主要在北方和沿海或者资源较多的区域, 缺乏学术合作; 研究内容涵盖不同水生植物水质净化与水生植物结合不同手段水质净化2个方面。从研究内容上看, 研究更加精细化、多元化、实践研究演进; “水质净化作用”、“衡水湖”、“富营养化”、“净化效果”、“组合”一直是研究的热点。

## 关键词

水生植物, 水质净化, CiteSpace, 知识图谱, 可视化分析

# Visual Analysis of Knowledge Map of Domestic Research Status and Development Trend of Water Purification by Aquatic Plants

Jun Xie<sup>1</sup>, Rancheng Zhan<sup>1</sup>, Huajun Zeng<sup>1</sup>, Peng Li<sup>2\*</sup>, Peifeng Han<sup>2</sup>, Qian Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>South Branch of China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

\*通讯作者。

文章引用: 谢珺, 詹然成, 曾华军, 李鹏, 韩培锋, 李谦. 水生植物水质净化国内研究现状及发展趋势的知识图谱可视化分析[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1104-1117. DOI: 10.12677/aep.2021.116133

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan  
<sup>3</sup>Sichuan Lianggu Technology Group Co., Ltd., Mianyang Sichuan

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 1<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

Aquatic plant water purification is an important means to solve urban river water pollution. With China's attention to the ecological environment and the increase of investment in sewage treatment, more and more scholars have invested in the research on the mechanism of aquatic plant water purification. In order to explore the research hotspot and development trend in this field, taking the relevant literature included in CNKI as the research object and using CiteSpace software, the author Vectorization atlas analysis is carried out for document issuing organization, keyword and keyword clustering atlas. The results show that the number of documents is increasing year by year, which is greatly affected by the policy. The relationship between the authors is weak, and there is basically no stable cooperation team. Lack of academic cooperation between the main sending institutions and coastal areas or areas with more resources. The research content covers two aspects: water purification by different aquatic plants and water purification by different means combined with aquatic plants. From the perspective of research content, the research is more refined, diversified and practical. "Water purification", "Hengshui Lake", "eutrophication", "purification effect" and "combination" have always been the research hotspots.

## Keywords

Aquatic Plants, Water Purification, CiteSpace, Knowledge Graph, Visual Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国是一个人口大国, 随着我国经济的高速发展, 生活污水、工业废料、农药化肥等有害废水的排放将造成河道水质恶化, 成为了河道水质污染恶化的致命因素, 给人们的日常生活带来了许多消极影响, 严重影响了当地居民的身体健康和景观。污染水体大多存在着有机污染、营养盐污染、重金属污染以及底泥对河水污染等问题, 极易成为人民和舆论轰动的社会热点事件, 也因影响城市的发展而备受社会的关注。自 1960 年后, 德国和一些其他发达国家学者相继开始采用植物进行污水处理的研究[1]。虽说我国在该领域的研究滞后 10 余年, 但有关污水治理的政策到科学研究都取得了较大的发展。植物水质净化这一特性是植物联系环境之间的桥梁, 适应外部环境变化或对生态系统功能有一定的影响。水生植物作为水生态环境的物质循环和能量转化的桥梁, 不仅为城市居民提供了相对清洁、美观的生活环境, 而且具有成本低、效率高、可持续的优点, 在水质净化这方面有着重要的贡献, 近 20 多年来, 水生植物的发展使得相关学者越来越重视其水质净化的特质, 目前已经被证明是改善环境问题的重要手段。所以涌现出较多的水生植物水质净化相关的文章, 如水生植物在城市河道中的应用、水质净化的机理、水生植物与微生物水质净化的研究、沉水植物网床净化河道水质、水生经济植物水质净化研究等。这些文章对该领

域具体方向的研究发挥着重要作用,但也需要从宏观视角全面了解水生植物水质净化研究进展,研究热点以及发展方向。

面对水生植物水质净化的海量文献,采用人为方式处理数据非常麻烦,所以采用系统和精准的文献计量方法是非常重要的[2]。基于文献计量的知识图谱可视化分析为综述研究带来了新的方式:朱立傲团队利用知识图谱对生态恢复进行研究并且指出生态恢复和重建问题成为环境科学的研究热点[3];胡文等人利用 CiteSpace 梳理了近年来生态模型在水体富营养化领域的研究进展[4]。国内外学者对水质净化做出了诸多研究,但未对水质研究的现状和趋势进行可视化图谱分析。为了阶段性分析目前水生植物水质净化的研究成果,从而更好的了解目前该领域的研究热点以及未来趋势的发展,给未来学者提供参考依据。鉴于此,本文利用 CiteSpace 软件对一系列文献进行知识图谱分析,对 1998~2021 年国内期刊中关于水生植物水质净化的相关研究进行整理分析,分析我国目前水生植物研究的现状、热点以及发展趋势,为美化环境和净化水资源的规划提供理论参考。

## 2. 数据来源和分析方法

### 2.1. 数据来源

使用始建于 1999 年 6 月由清华大学、清华同方发起的检索平台中国知网(CNKI),以主题词为“水生植物水质净化”为检索词,对数据库中所有的文献进行检索,检索时间为 2021 年 8 月 22 日。由于本文针对的是水生植物水质净化领域的研究,且检索结果有期刊申明、专利、报纸、成果等不相关的文献,通过人工筛选方法剔除不合格文献,最终在 724 篇文献中筛选出 291 篇有效文献,其中硕博学位论文 75 篇,会议论文 13 篇,期刊论文 203 篇,并基于筛选出来的有效文献,利用 CiteSpace 软件对这些文献开展知识图谱可视化分析。

### 2.2. 分析方法

CiteSpace 是一款以引文分析理论为基础,使用计算机编程代码将大量的文献数据转化为知识图谱的一款文献分析软件,能够将大量复杂的知识网络清晰化显示出来,并能显示出该研究领域的热点、发展动态和发展趋势。目前大部分学者使用 CiteSpace 主要是探索各个知识领域的发展及其研究热点、前沿和趋势[5]。CiteSpace 的开发者是美国德雷塞尔大学陈超美教授,是一款基于 java 语言开发用于计量和分析文献数据的可视化软件。该软件可通过导入的文献对关键词、主题、机构、作者、被引文献、被引作者、被引期刊等进行提取和分析,直接生成可视化图谱,呈现相关信息和信息实体间的相互关联,供使用者挖掘其隐含信息并对其进行分析。具体操作过程为:首先将 CNKI 中的有效文献以 Refwork 格式导出并重新命名放在 CiteSpace 的 Input 文件夹内,再打开 CiteSpace.5.7.R2 中的 CNKI 数据分析转码系统,新建项目并设置时间跨度为“1998~2021”年,时间切片为 1 年,分别选择“作者”“发文机构”和“关键词”为网络节点类型,并根据具体的情况对不同类型的节点设置不同的阈值,根据生成的可视化图谱进行调整优化,最终以数据和图表的方式展现水生植物水质净化在我国的发展历程和现状,从而发现其中还潜在的研究方向。

## 3. 结果分析

### 3.1. 历年文献发文量统计

利用植物净化污染水质这个概念被单独提出的时间较早,在中国知网(CNKI)数据库检索到最早的一篇植物水质净化的文章是 1985 年苏洪山,刘永福在《环境科学》发表的“水生植物净化故黄河段水质效果的观察”,这篇文章的发表揭开了研究植物水质净化的序幕。以筛选的 291 篇文献为基础,从而对水生植物水质净化这一领域历年来的发文趋势进行研究,由于最先发表的文献时间在 1985 年,直到 1998

年这十三年的时间发表文献只有 6 篇，因此，发文数量分析图只显示 1998~2021 年的分析结果，具体历年文献发表统计见下图 1 所示。

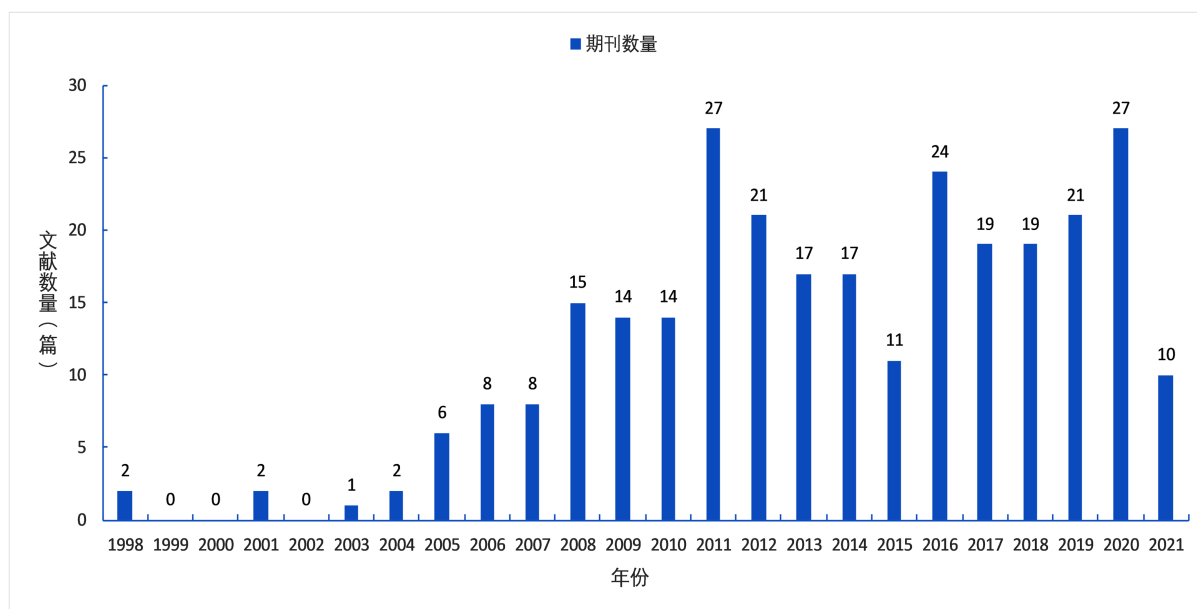


Figure 1. Statistical chart of “Water Purification of Aquatic Plants” in China from 1998 to 2021

图 1. 1998~2021 年中国“水生植物水质净化”历年发文数量统计图

从上图 1 可知，国内学者在水生植物水质净化领域的研究自 1998 年开始，发文数量整体上在前期呈现缓慢增长的趋势，后期逐渐保持稳定状态。其中 2011 年与 2020 年最多为 27 篇，从图上整体分析可以大致分为四个阶段：1998~2004 年为发展停滞期，发文量极少，个别年份有 2 篇文献，说明此阶段开展水生植物水质净化的学者较少，分析其原因可能是我国刚处于经济快速发展初期阶段，该阶段对生态环境的重视程度还不足，而利用水生植物进行水质净化则处于初步的探索阶段。2005~2011 年为快速增长阶段，该阶段文献数量急剧增长，短短几年时间文献的数量从 6 篇增长到 27 篇，说明该阶段随着我国经济的快速发展，河道水质污染问题日益突出，在此阶段朱镕基总理 2002 年提出了“把环境保护摆到同发展生产力同样重要的位置上”的口号，2005 年中央发表了《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》，胡锦涛总书记提出落实科学发展观，坚持环境优先，把环保纳入领导班子考核内容，并作为选拔奖惩的依据。为此各大城市开始重视生态环保问题，其中以城市河道生态治理为例，国内外学者开始重视污水净化，尤其是通过植物生态进行水质净化，并开展了深入的研究工作，该领域学科的发展也因此处在快速发展阶段。从 2011~2015 年为缓慢下降阶段，该阶段水生植物水质净化相关文献数量逐年减少，分析其原因是在经历了快速发展或，水生植物水质净化方面的研究遇到了瓶颈期，传统的水生植物水质净化研究多集中于水质富营养化等方面，研究方向亟待突破。2016-2021 年为稳步恢复期，该领域的文献数量再次增长并保持基本稳定，越来越多的学者开始关注城市湿地公园、城市生态护坡、海绵城市等方面的研究，研究范围逐渐扩展。

### 3.2. 文献作者分析

1) 发文数量分析。利用 CiteSpace 软件对 291 篇文献的作者进行统计分析，相关作者累积发文数量统计表如下表 1 所示，从中国知网(CNKI)中公开发表水生植物水质净化的文献共 458 个作者，发表 2 篇及以上 63 人，占作者总数的 13.8%。大部分作者(占 86.2%)仅发表 1 篇与“水生植物水质净化”相关的文章。

**Table 1.** Statistical table of author's publications  
**表 1.** 作者发文数量统计表

累计发文数量(篇)	作者数量统计(个)	比例	累计比例
1	395	86.2%	86.2%
2	53	11.6%	97.8%
3	7	1.5%	99.3%
4	3	0.7%	100%

2) 作者关系网。共现分析可以反映出作者之间的合作关系，每一个节点代表一个作者，节点越大则表示该作者在水生植物水质净化领域发表的文章数量越多，节点之间连线的数量表示学者与学者之间的研究合作关系。本文利用 CiteSpace 可视化分析软件将作者之间的合作关系网生成可视化网络图谱，将 Nodetype 设置为 author (作者)，如下图 2 所示，Node (节点)共有 458 个，links (连线) 549 条，density (密度)为 0.0052，在水生植物水质净化研究领域，作者合作关系呈现“个别学者一家独大”的局面。由图 2、表 2 分析可知，以胡伟平为中心的合作学者出现较大的网络结构，且明显多于其他学者之间的合作关系，在作者发文量统计中可以看出，相关学者该研究领域的文献数量普遍较少，最多的是以李燕、尹俊岭、周金波等学者，发文量为 4 篇，另外发文章数量排名 4~10 的学者该领域的文献数量都是 3 篇。其他绝大部分学者在该领域的发文章数量基本只有 1 篇，该类型的作者占总数的 86.2%。由于部分作者的发文章数量只有 1 篇，作者之间的节点分散，整体密度很低，故下图 2 中只显示出了部分核心作者相关信息，其他大部分作者的信息没有被显示。在水生植物水质净化研究领域的研究过程中，部分核心作者通过相互合作形成密集的网络，各主要核心作者团队内部合作紧密，形成各自鼎立的局面，但是核心作者团队之间的合作较少，各核心团队之间相对分散。而在“局部”部分中部分学者有存在单方面的合作关系，或者独自研究这一学科领域，尚未与其他学者建立合作关系。不论是单独的团体还是个人独立的研究，从整体上看相关作者的发文量都比较少，由此可见，水生植物水质净化领域学者的合作关系网络还会进一步加强，只有这样该领域的学科才会进一步的深入发展。



**Figure 2.** Authors' publications on "Water Purification of Aquatic Plants" in China, 1998 to 2021  
**图 2.** 中国 1998~2021 年“水生植物水质净化”作者发文量



**Table 2.** Author statistics of “Water Purification of Aquatic Plants” in China from 1998 to 2021**表 2.** 1998~2021 年中国“水生植物水质净化”作者发文统计

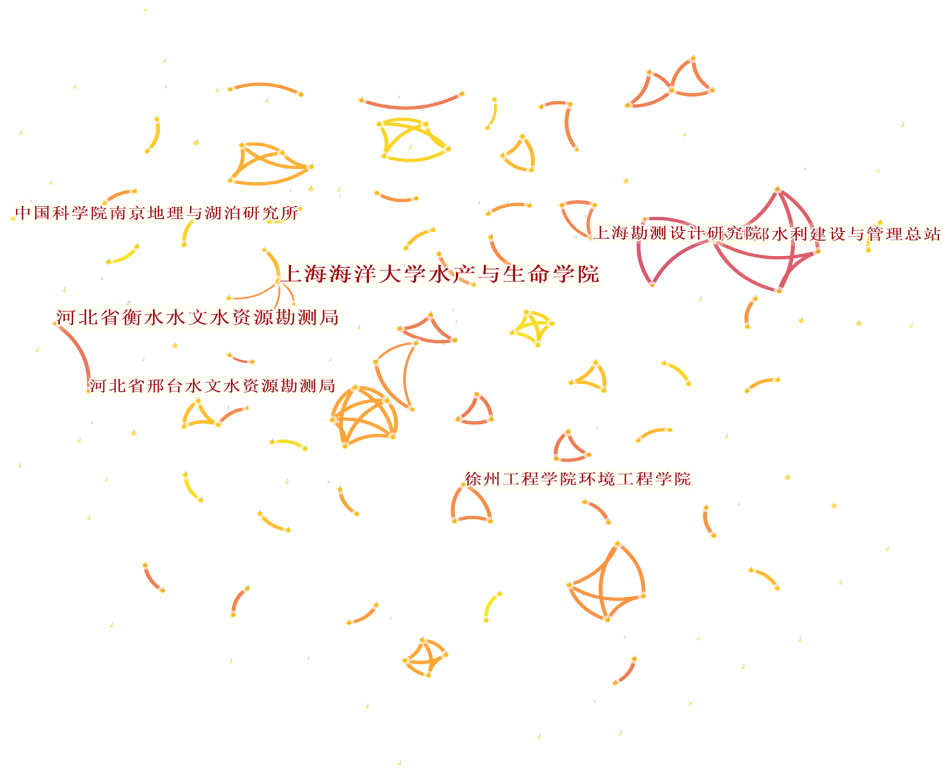
序号	发文数量	作者
1	4	李燕
2	4	尹俊岭
3	4	周金波
4	3	姜银光
5	3	郭萧
6	3	崔希东
7	3	乔光建
8	3	邱信蛟
9	3	胡维平
10	3	李云开

### 3.3. 科研机构合作分析

首先从知网检索筛选的 291 条文献中进行可视化分析，操作主界面选取节点类型为“Node Types = institution”，检索区间“timeslicing”取 1998~2021 年，时间切片取 1 年，阈值取 TOP = 50 (每个时间切片的排名只显示前 50 个机构，经软件可视化分析以后，调节图谱并将发文量低于 2 篇的机构选择性隐藏得到图 3 所示并整理出发文机构的数量排名前十的机构如下表 3 所示。由下图 3 中该领域的文献机构可视化图谱可知，Node (节点)为 303，Links (连线)为 187，Density (紧密度)为 0.0041；节点之间的连线代表机构间的合作关系，数量与密度呈正相关关系，节点的圆圈大小则反映该机构发文数量，节点越大则发文量越多，由于机构发文量相差不大且发文量较少，在图中显示不明显，但可以通过字体大小比较各个机构发文量的数量。例如上海海洋大学生产与生命学院与河北省衡水水文水资源勘测局分别有着 5 篇与 4 篇的发文量，其他机构则都是在 4 篇以下，其中发表 1 篇的机构比例占据了绝大部分。从发文频次上看，我国对水生植物水质净化的研究还不够深入，绝大多数机构之间的联系还有待提升。从长远的角度分析，目前排名前七的机构是国内对水生植物水质净化相对较深入的机构，在研究领域中有着核心的地位，对以后研究发展起着引领的作用。通过机构的可视化图谱分析能反映机构之间的联系和变化，也能反映出所属机构的作者研究方向，例如上海海洋大学海洋生态与环境学院副教授，何文辉学者沉水植物有着突出的贡献，何文辉团队着重研究不同沉水植物对水质净化的效能；常州大学环境与安全工程学院赵元教授着重研究藻类沉水植物水质净化的效能。

CiteSpace 不仅可以分析机构之间的联系，也可以分析各个机构首次研究水生植物水质净化的起始时间。在生成机构的可视化图谱的基础上，在 Layout 界面的 Visualizations 中切换 Timezone View 可以得出图 4，图中可以清楚的看到我国最早的机构是 1998 年的中国科学院南京地理与湖泊研究所，随后的 1999~2008 年基本没有新的机构对这一领域的研究进行文章的发表，在 2009 年以后，越来越多的研究机构参与其中。由此可以推断：水生植物水质净化方面的研究在初期主要集中在几个少数的机构，其他机构对本领域的研究尚属空白，随着我国对生态环境的重视，越来越多的机构中的相关学者开展水生植物水质净化研究工作，并发表了一定数量的文章。通过图 3、图 4 可以发现大多数机构是位于北方区域和沿海或者资源较多的区域，这也能够推断出大多数学者也集中在这些区域。特别是在河北周围的区域，

由于北京、天津的特殊政治地位，北京及其周围打造的生态环保圈，对城市河道水质要求较高，为此开展了大量的生态环境治理、水质工程提升等行动，从而投入较多的资金、技术等开展相关研究工作，进而体现在研究机构文献数量上。



**Figure 3.** Atlas of “Water Purification of Aquatic Plants” in China from 1998 to 2021  
**图 3.** 1998~2021 年中国 “水生植物水质净化” 发文机构图谱

**Table 3.** Ranking of “Water Purification of Aquatic Plants” in China, 1998 to 2021  
**表 3.** 1998~2021 年中国 “水生植物水质净化” 发文机构排名

序号	频次	科研机构
1	5	上海海洋大学水产与生命学院
2	4	河北省衡水水文水资源勘测局
3	3	中国科学院南京地理与湖泊研究所
4	3	河北省邢台水文水资源勘测局
5	3	上海勘测设计研究院
6	3	徐州工程学院环境工程学院
7	3	水利部水利建设与管理总站
8	2	宁夏大学资源环境学院
9	2	沈阳农业大学水利学院
10	2	中国农业大学水利与土木工程学院

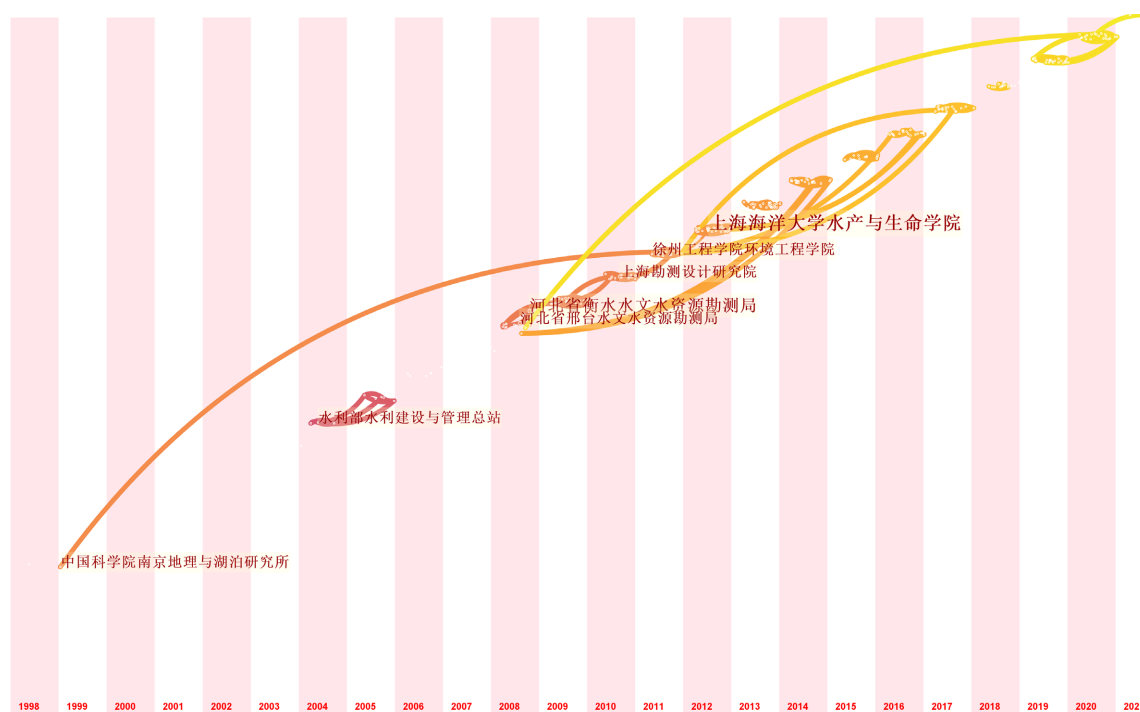


Figure 4. Time line atlas of water purification agencies of aquatic plants

图 4. 水生植物水质净化发文机构时间线图

### 3.4. 关键词分析

通常一篇文献中的关键词往往互相存在着关联性，通过关键词共现分析可以反映学科领域内研究的重要方向，同时颗粒看出逐年的学科演化和发展趋势，还可以直观体现不同时序内的热点领域、分析视角与研究方法的变化[6]。首先，在 CiteSpace 的主界面选择“Node Types = Keyword”，其次取阈值为 Top N = 50 且取时间切片为 1 年，即在每一年中选择前 50% 高频出现的节点，最后为了简化网络并突出其重要的结构特征，利用 Pathfinder 与 Pruning Sliced Network 功能使得可视化网络图谱具有完备性(唯一解)，在生成的可视化知识网络图中屏蔽出现频率不高且乱码的关键词，最后得到了下图 5 所示的水生植物水质净化研究关键词图谱。其中 Node (节点)为 383，Links (连线)为 897，Density (紧密度)为 0.0123。在图谱中每个节点代表一个关键词，节点之间的连线代表关键词在同一篇文章被引的次数，其中关键词出现的频率越高其节点越大，关键词之间的连线越粗，则代表同时出现在同一篇文献中的次数越多，因此可以根据节点的大小和连线的粗细来分析本领域的研究现状。节点之间连线的颜色可以反映学科的演化方向，为了更加清楚的了解学科发展方向，通过 CiteSpace 的“Timezoneview”功能绘制出热点时区视图图谱(如图 6 所示)，结合图 5 可知蓝色、绿色、黄色、红色分别代表学科的最新演化方向，如“污水净化”、“景观优化”、“水生态恢复”、“种植密度”为近几年较新的研究方向，由于此类方向的研究课题较新，发文量较少，在图中未能显示出来。

关键词中心度能够体现出关键词与其他关键词的共现强度，表现的是该关键词的连接作用的强度。通过 CiteSpace 对关键词中心共现强度分析，可以进一步了解在时间的变迁中，此领域研究的研究热点发展演化趋势。关键词出现的频率能够更加具体体现中心度，为此基于 CiteSpace 软件取 Top N = 8 的数据，并将研究领域中部分相似的关键词进行整理合并，从而统计出 1998~2021 年时间范围内关键词中心度的变化，具体结果见下表 4 所示。



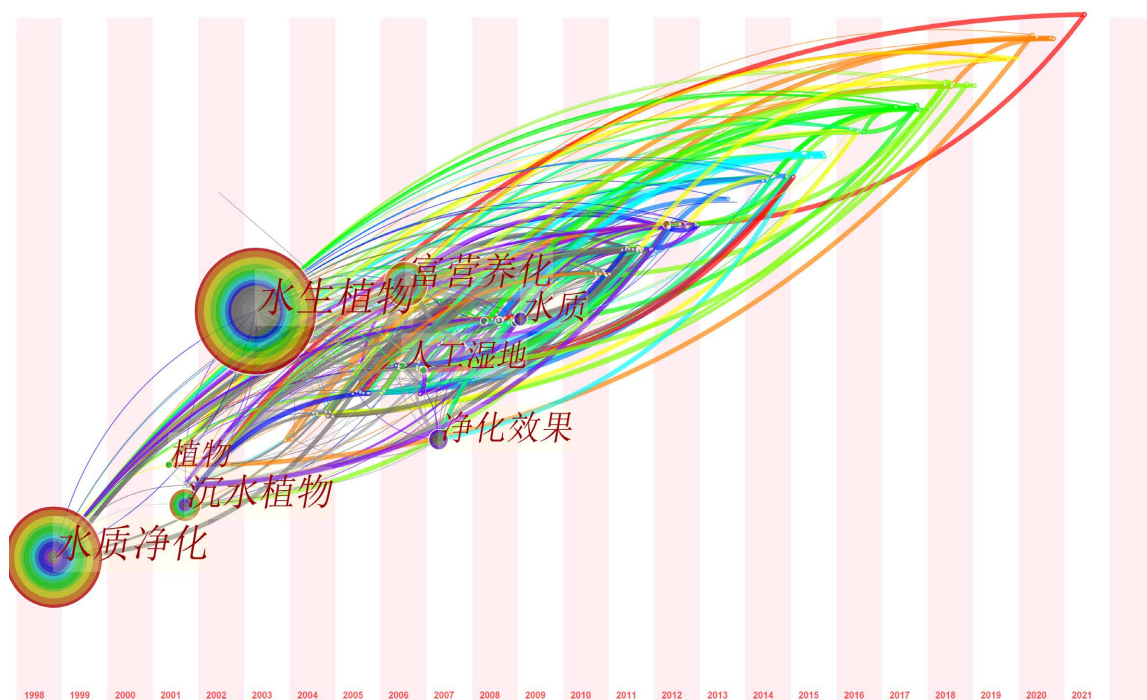


Figure 5. Time zone view atlas of hot research spots on water purification of aquatic plants

图 5. 水生植物水质净化研究热点时区视图图谱

### Top 5 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	1998 - 2021
净化水质作用	1998	2.37	2008	2021	
衡水湖	1998	2.37	2008	2021	
富营养化	1998	3.55	2009	2021	
净化效果	1998	2.83	2010	2021	
组合	1998	2.24	2019	2021	

Figure 6. Keyword emergence map

图 6. 关键词突现图谱

Table 4. Centrality of key words “Water Purification of Aquatic Plants” in China from 1998 to 2021

表 4. 1998~2021 年中国“水生植物水质净化”关键词中心度

序号	关键词	频次	中心度
1	水生植物	178	0.7
2	水质净化	136	0.62
3	富营养化	38	0.23
4	净化效果	22	0.18
5	人工湿地	16	0.09
6	生态浮床	9	0.03

Continued

7	微生物	8	0.07
8	污水处理	7	0.01

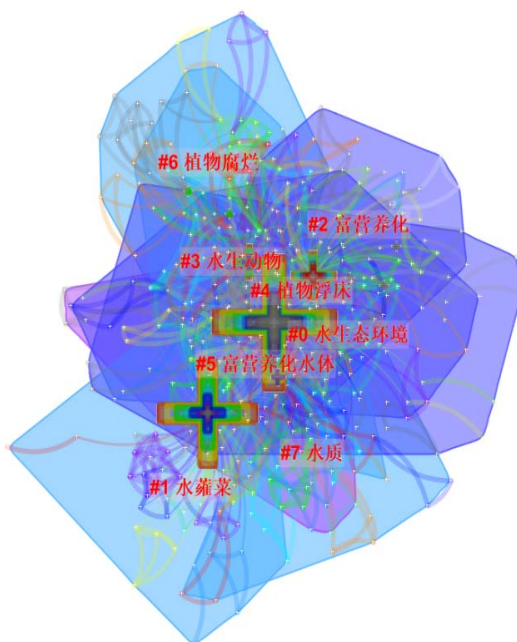
结合表 4 可知,“水质净化”、“水生植物”、“富营养化”、“净化效果”分别为中心度较高的前 4 位关键词,说明在水生植物水质净化研究领域中,较多的学者将研究的重点聚焦在这 4 个方向,也反映出本领域的研究热点问题。水生植物水质净化研究热点的演化趋势如图 5 所示,自 1998 年以来,研究者重点关注的是水质净化机理研究,但是随着研究的深入,水生植物本身的研究也越来越受到重视并呈现出多元化的发展趋势。1998~2003 年,研究较单一:相关学者重点围绕“水质净化”、“水生植物”开展研究,而与其相关的研究及拓展则较少,说明改时间阶段的研究还较单一,研究内容及方向较少;2004~2015,研究方向扩展其:该阶段的研究中,植物水质净化在已有的研究基础上开始出现植物类型的比较,对污水治理的模式及经验的借鉴研究,如五大湖流域、太湖、长江三角流域河道水质治理研究开始凸显,基于国内主要河道水质提升工程的同时对于水生植物水质净化的研究更为细化,“人工湿地”“生态浮床”等开始应用在研究领域。2016~2021 年,关键词激增,呈现多元化发展趋势,研究聚焦我国水体治理的问题,如澜沧江、汉江、粤港澳大湾区等。

在趋势分析的基础上,对不同阶段突显关键词进行分析,有助于了解不同时期研究热点的内容。本文选取 1998~2021 年的文献进行 Burstness (突显词)分析,将凸显值设置为 0.6,共获得 5 个突显词。图中的“Strength (强度)”代表关键词的突变率,指的是某一研究领域在某个年份之间突然增多的关键词,表明此研究领域的阶段研究前沿。在 1998~2007 年没有突显词出现,研究正在稳步发展;2008~2021 年,突显性关键词分别为“水质净化作用”、“衡水湖”、“富营养化”、“净化效果”、“组合”,突显性最强的是“富营养化”,持续时间最长的是水质净化作用与衡水湖分别都为 13 年,这两个关键词的研究热度持续至今,其重要程度不言而喻。

### 3.5. 关键词聚类分析

为更清晰反映水生植物水质净化研究的主要内容,利用 CiteSpace 对关键词进行聚类分析,结果见下图 7 所示,#代表聚类,其中 Modularity Q (模块值) = 0.683 > 0.3 说明聚类结果显著,Mean (平均轮廓值)  $S = 0.88 > 0.7$ ,说明聚类是令人信服的[7]。“关键词聚类”将相似度或者相关联度较高的关键词进行聚合分析,用于区分和辨别该领域研究过程中相似词汇重复的问题,从而可以更加真实的反应本研究领域主要关键词的研究热点。基于软件进行关键词聚类分析后可以得出,1998~2021 年之间的水生植物水质净化领域研究主要围绕图 7 中的 8 大关键词聚类模块展开研究工作。利用 LLR 算法可以得到各个研究聚类包含的关键词,通过图 7 可以看出,聚类分析的 8 个关键词排名顺序依次是水生态环境、水蔬菜、富营养化、水生动物、植物浮床、富营养化水体、植物腐烂和水质,聚类文字前的数字为编号,编号值越小,则代表此关键词出现在文献中的次数越多。结合表 5 可以看出,聚类最大的是#0 水生态环境,说明在水生植物水质净化研究过程中,相关学者都会关注水生态环境的影响,该关键词是本研究领域的核心问题。#0、#02、#05、#07 是研究水体污染的主要污染状况、现状及水体污染导致的后果和危害等;#1、#3、#4、#6 主要是在水质净化的过程中水生植物净化的机理、方法和路径。从下图中的关键词出现的时间可以发现,大部分聚类词出现的年份较都在第七次全国环保大会的前后,说明水生植物水质净化的研究的主要核心问题很早就被相关学者关注并开始展开研究工作,随着时间的推移,水体污染的情况有所改善,相关的研究持续稳定推进并不断发展,逐渐表现出多元化的特点,后期相关学者需要加强新方向的发展,不断扩展本研究领域的范围和方向,从而为水生植物水质净化研究向深度和广度推进。结合图

7 和表 5 进行分析可以看出，未来水生植物水质净化的研究主要涵盖两个方面：不同种类植物水质净化的效果、植物与其他手段相结合从而水质净化。



**Figure 7.** Clustering knowledge map of water purification of aquatic plants from 1998 to 2021  
**图 7.** 1998~2021 水生植物水质净化聚类知识图谱

**Table 5.** Detailed table of water purification cluster analysis of aquatic plants from 1998 to 2021  
**表 5.** 1998~2021 水生植物水质净化聚类分析详表

聚类号	节点数	紧密程度	平均年份	Topterms (重要关键词)
#0 水生态环境	57	0.953	2013	水生态环境(13.59); 水质净化作用(13.59)
#1 水薹菜	52	0.972	2013	水薹菜(8.88); 水质净化(8.17)
#2 富营养化	52	0.837	2011	富营养化(17.12); 挺水植物(4.35)
#3 水生动物	50	0.807	2013	水生动物(9.26); 组合(9.26)
#4 植物浮床	44	0.82	2010	植物浮床(13.99); 污水处理(9.26)
#5 富营养化水体	43	0.825	2010	富营养化水体(9.54); 苦草(9.54)
#6 植物腐烂	41	0.883	2013	植物腐烂(5.71); 藻类植物(5.71)
#7 水质	40	0.911	2013	水质(7.4); 洪泽湖(5.49)

## 4. 水生植物水质净化研究未来发展趋势分析

### 4.1. 不同种类植物水质净化的效果对比分析及植物品种优化

20 世纪 70 年代改革开放以来，我国经济快速发展，尤其是长江三角和珠三角地区，依靠政府的扶持和自身的地理位置，其经济飞速发展。但是随着时间的推进，经济高速发展导致大量的工业废水及生活废水排放，各流域的支流水质受到了不同程度的污染，由于领域内的各地方政府之间缺乏相关的合作

机制,不同地方的政府大多采用“关门治理”区域内的河道,水污染治理效果不明显,水质恶化事件层出不穷[8]。在此背景下,安徽省阜阳市环保部门通过对阜阳城水体污染和水生植物现状调查,提出了开发利用水生植物,促进水体生态平衡、防治水体污染,并拉开了水生植物水质净化研究的序幕[9]。早期对水污染的研究大多停留在初级阶段,大多是对一个项目的具体研究,且在核心期刊的发文量很少,缺乏实践操作。在2013年朱秀红团队基于郑州市贾鲁河水质净化工程,对四种水生植物搭配的净化效果进行对比研究,发现对污染水体中TN(总氮)去除率最高的是旱伞草+鸢尾,达到了58.24%,对TP的去除率最高的是旱伞草+红掌,达到了62.08%;旱伞草和红掌的组合综合效果最好,最差的是春菜与鸢尾[10]。2015年王锦旗团队对生长有凤眼莲、浮萍及槐叶萍的静止水体进行长期监测发现凤眼莲及浮萍在生长初期可以改善水体透明度,但覆盖率较高的时候就会使透明度降低[11]。随后的两年里以曹倩倩为首的科研团队对轮叶黑藻、苦草、金鱼藻和狐尾藻四种沉水植物进行复养试验,团队认为沉水植物具有一定的复氧和净化污水的效果,可以作为城市污染河道复氧的优选方案[12];2018年至2020年在先前研究成果的基础上,中科院的杨东团队对12种水生植物进行研究,结果表明12种水生植物对河污染水体TN和COD的去除率显著,对TP和NH<sub>3</sub>-N去除率差异不显著,12种植物净化效果的综合评价排名顺序为:紫芋 > 水生美人蕉 > 水葱 > 水龙 > 节节草 > 芦苇 > 风车草 > 梭鱼草 > 蕹菜 > 伊乐藻 > 苦草 > 篦齿眼子菜[13]。通过对水生植物水质净化能力的分析,为后续设计水生植物进行组合配置的最优化提供了参考,在取得环境效益的同时,也可以获得经济效益[14]。

#### 4.2. 植物与其他手段相结合水质净化

除了单纯利用植物水质净化之外,其他学者还发现利用其他手段不仅可以提高净化效率,还可以提高经济效益。在2016年以上海交通大学为首的科研团队对生物膜与水生植物的水质净化机制做了研究,研究表明生态坝微生物对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果高于水生植物空心菜,在TP去除方面,空心菜的贡献大于微生物[15];同年胡凯泉发现除了传统的水生植物可以净化富营养的水质外,水生动物对水质的净化也有一定的帮助,比如罗非鱼对TN、NO<sub>3</sub>-N、COD的去除效果较好[16];朱术超发现构建香根草、黄菖蒲、西芹浮床系统能够抑制水体种浮游植物的生长,在浮床系统的基础上加入斑马鱼,不仅可以促进浮床系统对水体的净化能力,还能增加生物的多样性[17];杨文焕则利用包头南海湿地水质条件,进行人工浮岛试验,发现混合植物人工浮岛比单一型人工浮岛去除氮磷等有机物的效果要好[18]。闫滨通过设计室内水质净化装置模拟自然水环境并运用多孔混凝土作为水生动物繁殖空间,结果表明香蒲、荷花以及螺蛳的组合水质净化的技术是可行的,多孔混凝土的孔隙结构为水体生物提供附着生长的空间,通过物理吸附作用、植物吸收作用、微生物生化降解和水生动物滤食去除水体中的污染物,并提出多孔混凝土可作为生态护坡材料[19]。通过植物结合各种手段的方法试验,不仅提高了水质净化的能力,也增加了生物的多样性,为更深层次的研究奠定了基础。

### 5. 结论

本文利用CiteSpace软件对收录在数据库中1998~2021年的国内学者对水生植物水质净化进行研究,并对发文数量、发文作者、发文机构、关键词、关键词聚类进行了系统的分析,得出以下结论:从文献年度分析来看,水生植物水质净化的研究较早出现在1985年,但持续到1998年的发文量可以忽略不计,自1998年之后发文量逐年增长并体现出明显的政策导向。从发文作者来看,极少的作者形成了团体,大部分学者间的联系较弱且发文量普遍偏少,从发文机构来看,大多数机构是位于北方区域和沿海或者水源较多的区域,且缺乏紧密的学术合作,其中上海海洋大学水产与生命学院发文最多,影响力最大,以上两方面也侧面突出了研究力量的不均匀,不同地区的研究水平也有差异,出现两极分化的局面,建议



各个机构和学者加强学术交流。从研究内容来看,对关键词聚类图谱和高频关键词及相关文献进行分析,梳理出水生植物水质净化的研究内容主要涵盖不同水生植物水质净化与水生植物结合不同手段水质净化2个方面。

国内水生植物水质净化研究内容比较成熟,包含了理论到实践的内容。研究视角、主题逐渐出现多元化趋势,研究逐渐走向深入[8]。水质净化的治理研究反映了从单一到多元、理论到实践、宏观到微观、理论到实证研究的发展趋势。研究从探索性的研究逐渐转向了描述性、解释性研究发展,关键词和研究方向也越发多元化,出现“污水净化”、“景观优化”、“水生态恢复”、“种植密度”等前沿词汇,表明扩展性不断增强。由此表明水生植物水质净化的研究会随着社会的发展,新发展理念指引下发展模式的转型,相关研究会得到进一步的重视,在未来依然有进步的空间。

然而,本文的观点也存在一些薄弱之处:文章是基于“国内学者”的研究水生植物水质净化的中文论文,因此具有一定的局限性。此外,CiteSpace 软件的参数设置具有相对可调性[20],不能排除一些低频关键词的研究意义。本文观点受数据取样、处理方式、图谱解读深度的影响,所以可能漏掉了一些具有探讨意义的关键词和领域展望。

## 基金项目

中国水利水电第七工程局有限公司科技项目经费资助;住房和城乡建设部科技计划(2018-K9-049; 2018-K9-059),西南科技大学高教研究专项课题(20GJZX02);西南科技大学2019年度本科教育教学改革与研究项目(19xn0063)。

## 参考文献

- [1] 王艳英,王晓磊,郜爱玲,董建华,应苗苗,戎建涛,朱相成.水生植物净化水质功能研究进展[J].中国城市林业,2017,15(4):6-10.
- [2] 张增可,王齐,吴雅华,刘兴诏,黄柳菁.基于CiteSpace植物功能性状的研究进展[J].生态学报,2020,40(3):1101-1112.
- [3] 朱立傲,刘森,刘福智,高凤,王叁.基于科学知识图谱的湿地生态恢复研究[J].城市建筑,2021,18(4):15-19.
- [4] 胡文,李春华,叶春,王济,魏伟伟,邓勇.生态模型在水体富营养化研究领域的应用进展[J].环境科学研究,2020,33(2):349-362.
- [5] 刘民坤,魏乾梅.中国乡村建设中的旅游研究综述——基于CiteSpace的可视化分析[J].湖北农业科学,2021,60(17):5-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.17.001>
- [6] 李杰,陈超美.CiteSpace:科技文本挖掘及可视化[M].北京:首都经济贸易大学出版社,2016.
- [7] 陈悦,陈超美,刘则渊,胡志刚,王贤文.CiteSpace知识图谱的方法论功能[J].科学学研究,2015,33(2):242-253.
- [8] 陈文理,何玮,龚建周.国内跨界水污染治理研究进展与展望[J].广东行政学院学报,2020,32(4):35-43.
- [9] 徐光辉,胡万士,高卫东,时春.开发利用水生植物促进水体生态平衡[J].水资源保护,1987(2):60-61.
- [10] 朱秀红,夏丹,杨阳,卢妍妍,徐萌,曹永奕.4种水生植物对污染水体净化效果的研究[J].河南农业大学学报,2013,47(1):87-91.
- [11] 王锦旗,郑建伟,薛艳,王国祥.三种漂浮植物对水体净化效果比较研究[J].中国农村水利水电,2015(3):54-58+63.
- [12] 曹欠欠,于鲁冀,吕翠美,范铮,李廷梅.四种沉水植物对城市污染水体的净化效果研究[J].人民黄河,2017,39(5):76-80.
- [13] 李斌,李慧,吴基昌,杨东,谭文禄,张安弘,刘泽峰,徐浩,易升泽.12种水生植物对茅洲河污染水体的净化研究[J].环境科学与技术,2020,43(S1):151-158.
- [14] 胡绵好,袁菊红,杨肖娥.水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用[J].湖泊科学,2010,22(3):416-420.
- [15] 倪志凡,黎岭芳,陆嘉麒,蒋一林,李春杰,张振家,郝爱民,吴唯民.生态坝微生物与水生植物的水质净化机制研究[J].中国给水排水,2016,32(5):32-37.



- 
- [16] 胡凯泉, 许振成, 曾东. 8种水生生物对富营养化水体的净化效果[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 328-332.
- [17] 朱术超, 刘毅, 李善, 关易云, 徐建区, 蒋海龙, 刘蔚秋. 几种植物浮床的水质净化及水华防治效率[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(6): 140-147.
- [18] 杨文焕, 缪晨霄, 王智超, 张明钰, 菅广林, 李卫平. 人工浮岛种植水生植物对包头南海湿地水质净化效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 122-128.
- [19] 闫滨, 李成林, 王玥. 多孔混凝土与水生植物综合水质净化效应的试验研究[J]. 环境工程, 2017, 35(11): 33-36+81.
- [20] 王萍, 刘涛, 杜萍, 杨国林. 2000-2017年中国灾害风险研究的知识图谱分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 169-177.