

基于文献计量分析的投影寻踪法 在水问题中应用的研究进展

周戎星¹, 陈梦璐¹, 金菊良^{1,2}, 崔毅^{1,2*}, 周玉良^{1,2}, 宁少尉^{1,2}

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;

2.合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009)

摘要: 投影寻踪法因其良好的高维数据处理能力和灵活的问题导向性而得到广泛应用。【目的】系统分析投影寻踪的研究现状、探索其未来发展趋势。【方法】以中国知网数据库收录的投影寻踪中文文献为基础进行了文献计量分析, 借助 VOSviewer 可视化分析功能进行了研究热点聚类分析。从理论研究、水质评价、水资源承载力、水安全、水资源系统脆弱性 5 个方面综述了投影寻踪在水问题中的研究进展, 在此基础上指出了投影寻踪研究未来发展趋势。【结果】水利工程、环境、数量经济是投影寻踪法应用较多的学科领域; 研究热点主要有投影寻踪评价、投影寻踪回归模型、投影寻踪方案优选和投影寻踪动态聚类; 相对其他学科, 投影寻踪在水问题中的应用较多。【结论】在理论研究方面, 需要继续深化投影寻踪思想, 进一步探讨投影指标函数和窗宽半径的确定方法, 深化投影寻踪与其他方法的耦合; 在应用研究方面, 需在预测、动态评价、诊断识别、预警、决策等方面继续深化研究。

关键词: 投影寻踪; 研究进展; 水问题; 文献计量方法; 可视化分析; VOSviewer

中图分类号: TV213

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020143

OSID:



周戎星, 陈梦璐, 金菊良, 等. 基于文献计量分析的投影寻踪法在水问题中应用的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 137-146.

ZHOU Rongxing, CHEN Menglu, JIN Juliang, et al. Bibliometric Analysis of the Application of Projection Pursuit Regression Method in Water Research in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 137-146.

0 引言

【研究意义】由于自然界和人类社会的复杂性和多样性, 实际问题往往受许多因素影响, 经常遇到非正态、非线性高维数据问题, 而用传统数据分析方法处理时往往很难取得满意效果^[1], 难以满足现实的需要, 投影寻踪 (Projection Pursuit, PP) 方法正是在这种背景下提出的。投影寻踪是一种分析、处理高维数据的探索性统计方法, 其运用奥卡姆剃刀原理、通过寻找反映数据结构特征的最优投影方向把实际问题中高维数据降维到低维空间, 再对低维空间中的投影值构建定量分析模型, 以达到分析研究原实际高维数据问题的目的, 可避免高维数据点稀疏分布所造成的“维数祸根”, 适用于非正态、非线性高维数据问题的处理, 其基本原理是将高维数据投影到低维空间上, 寻找能反映高维数据空间规律特征的投影^[2],

达到通过分析、识别低维空间投影特征研究高维数据的目的^[3]。

【研究进展】投影寻踪方法自 20 世纪 60 年代末出现、1974 年被 Friedman 等^[4]正式命名以来得到了迅速发展。20 世纪 80 年代以来, 中国学者也开始了投影寻踪研究: 李国英^[5]对投影寻踪估计的相关参数及收敛性进行了研究; 郑祖国^[6]、杨力行^[7]等构造了投影寻踪自回归模型, 并将其用于春早期降水趋势的长期预测, 预测结果稳健且预见期较长; 吴超存等^[8]将投影寻踪回归模型用于水质模拟, 并对影响水质的主要因素进行了分析; 李祚泳等^[9-12]将投影寻踪回归模型分别应用于污染物浓度预测、台风登陆频次预测、降水预测、大气颗粒物污染源解析等方面; 张欣莉等^[13]用遗传算法求解投影方向, 并用于水质评价; 王春峰等^[14]通过定义分离度建立投影寻踪判别分析模型, 并将其用于信用风险评估问题; 金菊良等^[15]应用投影寻踪方法建立洪水灾情等级评估模型, 提高了模型的分辨率; 王顺久等^[16]应用投影寻踪方法充分挖掘数据本身的特征和规律, 对水资源承载力的评价指标进行赋权, 有效避免了人为确定权重的主观性和任意性; 万中英^[17]将投影寻踪与 K-近邻算法结合应用于中文网页分类问题, 提高了检索效率和准确率。【切入点】

收稿日期: 2020-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0407206); 国家自然科学基金项目 (51779067, 51709071); 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2019A0880)

作者简介: 周戎星 (1990-), 女, 安徽合肥人。博士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: zhourx11@163.com

通信作者: 崔毅 (1990-), 男, 安徽铜陵人。博士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: cuiyi9007@163.com

目前,投影寻踪方法已广泛应用于资源、环境、经济、管理等学科领域,非常有必要对现有投影寻踪理论和应用研究进行系统梳理和归纳总结,以进一步推动投影寻踪研究的深入发展。【拟解决的关键问题】为此,本文拟采用文献计量分析方法对中国知网数据库收录的投影寻踪中文文献进行统计分析,系统梳理现有研究成果,分析当前研究中的热点、难点及存在的主要问题,展望未来研究的主要方向,以进一步推进投影寻踪的持续蓬勃发展。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

在中国知网(CNKI)全文数据库中以“投影寻踪”为主题词进行检索,共检索到2 580篇文献(1984—2019),通过逐条研读判别,剔除重复文献、新闻报道、会议论文以及英文文献后,最终共选定研究文献2 130篇。

1.2 研究方法

本研究主要采用文献计量分析方法对选定文献的相关信息进行分析。分析对象包括对文献以篇为单位的简单计量和对文献内部蕴含的相关信息结构的计量分析^[18]。本研究主要从文献发表的时间分布、学科分布、期刊分布和关键词共现4方面进行分析。在分析关键词共现时,采用了VOSviewer软件^[19]进行科学知识图谱绘制。

2 数据分析

2.1 文献发表时间分布

对2 130篇文献进行发表年度统计,得到自1984年至今投影寻踪研究的发展历程,如图1所示。根据图1,可将我国投影寻踪研究大致可分为4个发展阶段:①1984—1992年早期研究阶段,这期间的研究主要集中于投影寻踪理论方面,每年的发文量均不超过5篇。②1993—1999年缓慢发展阶段,每年的发文量整体呈缓慢增长趋势。1992年底,自杨力行等^[7]关于投影寻踪时序及投影寻踪回归软件包的研制和推广后,投影寻踪的相关应用研究开始逐渐增多,这期间的成果主要以投影寻踪预测为主。③2000—2010年快速发展阶段,这与张欣莉等^[13]将遗传算法与投影寻踪结合、显著简化了投影寻踪的计算过程密切相关。④2011年后稳定发展阶段,年发文量较2010年有所减少,总体波动处于高位状态,年均发文量保持在130篇左右。可见投影寻踪研究仍是当前学术界关注的热点和前沿,投影寻踪的关键技术突破(例如1992年投影寻踪回归软件包研制、2000年遗传算法引入)是推动研究发展的重要动力。

2.2 发表文献的学科分布和期刊分布

解析投影寻踪相关文献的学科分布规律有助于从宏观上反映投影寻踪方法在不同学科的应用发展

及交叉融合情况,揭示不同学科对推动投影寻踪发展所作的贡献。据统计,投影寻踪研究在水利工程、环境、数量经济、农业经济、控制工程这5个学科中的发文量占总发文量的比例较高,分别为13.71%、13.22%、7.45%、4.68%、4.50%。可见,投影寻踪在这5个学科中应用较多。此外,投影寻踪的研究领域还涉及工商管理、计算机、工业经济等众多学科。可见,高维非线性数据挖掘是众多学科的前沿问题,投影寻踪适用性强、应用范围广。

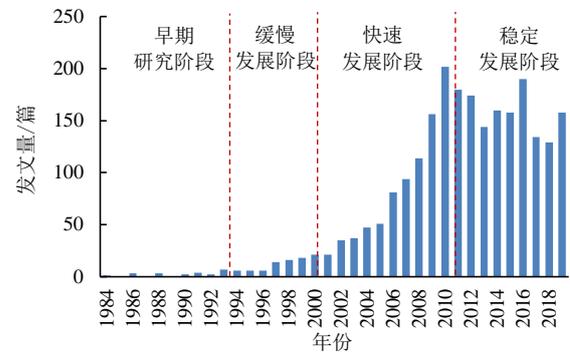


图1 1984—2019年以“投影寻踪”为主题词检索的文献量
Fig.1 Literature retrieved from 1984 to 2019 with the theme word “projection pursuit”

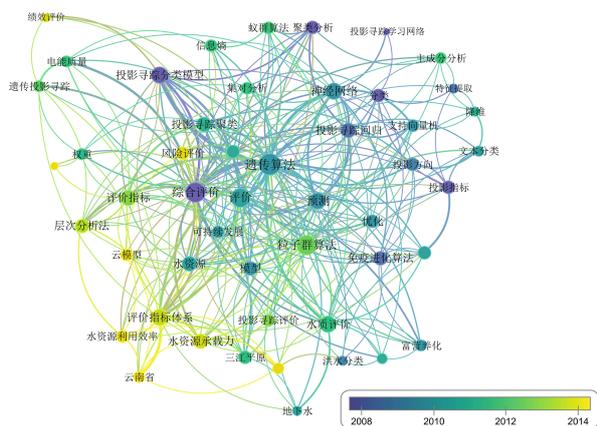
学术期刊是记录学术成果、传达学术观点、交流学术思想的核心载体,分析投影寻踪相关文献的期刊分布规律既有助于识别投影寻踪研究成果的分布特征,也有助于了解该研究领域的主要期刊^[20]。统计发现,在载文量前5名的期刊中,有4个来自水科学领域,这说明投影寻踪法非常适用于解决水科学领域的复杂性问题,也从另一方面反映了投影寻踪在水科学中应用广泛。

2.3 关键词共现分析

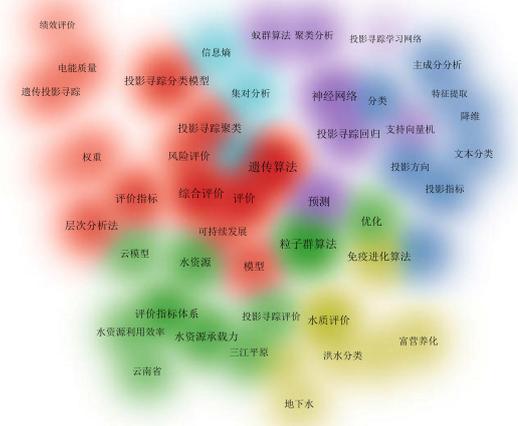
关键词是作者选择用以表征文献主题信息内容的单词和术语^[21],是对文献研究内容的高度概括^[22]。通过研究一个领域较长时间内大量学术研究成果的关键词,可揭示某一研究方向所取得成果的总特征、研究内容之间的联系、学术研究的发展方向等^[23]。为使分析结果更加直观清晰,对所选定的文献使用VOSviewer软件进行关键词共现分析。将阈值设置为11(即关键词出现次数不低于11次),共得到52个关键词,通过聚类分析生成关键词共现图谱,如图2所示。由于“投影寻踪”一词权重较大,会严重影响图的呈现效果,故未在图2显示。由图2(a)关键词共现年代标签图可看出,“遗传算法”“综合评价”“粒子群算法”“水质评价”“预测”等关键词节点相对较大,这说明它们出现的频次较高,属于研究热点。图2(b)中不同颜色代表不同聚类,共分6种聚类:①红色,投影寻踪聚类评价;②浅蓝色,投影寻踪方案优选;③紫色,投影寻踪回归预测;④深蓝色,投影寻踪动态聚类;⑤黄色,投影寻踪等级评价;⑥绿色,水资源承载力投影寻踪评价。其中①

至④偏向投影寻踪理论研究，⑤、⑥偏向投影寻踪在水问题中的应用研究，可见相对于其他学科中的应用情况，目前投影寻踪在水问题中的应用较多。另外，结合图 2 (a) 和图 2 (b) 可知，图 2 (a) 中黄色的

关键词多属于图 2 (b) 中的绿色聚类，说明水资源承载力投影寻踪评价是近年来的研究热点。因此，下面对投影寻踪法在水问题中的应用研究进展做进一步分析。



(a) 关键词共现年代标签图



(b) 关键词共现聚类密度图

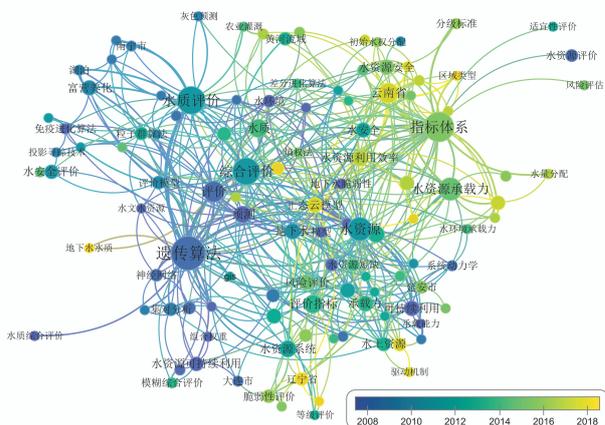
图 2 CNKI 中以“投影寻踪”为主题词检索的文献关键词共现年代标签图和聚类密度图

Fig.2 Key words age label and cluster density maps with the theme word “projection pursuit” in CNKI

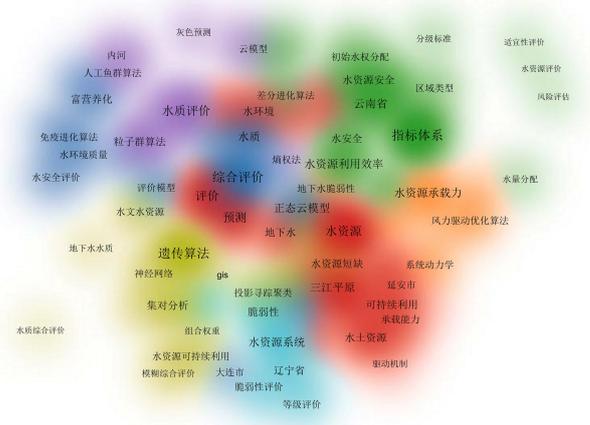
3 投影寻踪法在水问题中的应用研究进展

投影寻踪法主要在水问题研究领域得到了广泛应用。下面分别以“投影寻踪+水资源”、“投影寻踪+水环境”、“投影寻踪+水生态”、“投影寻踪+水安全”、“投影寻踪+水质”和“投影寻踪+水灾害”为主题词在中国知网进行检索，剔除重复文献、新闻报道、会议论文以及英文文献后，共得到有效文献

421 篇。使用 VOSviewer 软件对其进行关键词共现分析，将阈值设置为 3 (关键词出现次数不低于 3 次)，共得到关键词 117 个，热点聚类 7 个，如图 3 所示(为更清晰显示，省略关键词“投影寻踪”)。由图 3 可知，各相邻聚类之间存在着较多的混叠、交叉部分，这正是学术研究中普遍存在的现象，也正是由于这种不同研究方向之间的交叉、融合，更利于投影寻踪理论和应用研究的深入发展。



(a) 关键词共现年代标签图



(b) 关键词共现聚类密度图

图 3 投影寻踪法在水问题中的应用研究文献关键词共现年代标签图和聚类密度图

Fig.3 Key words age label and cluster density maps about the application of projection pursuit in water problems

通过对图 3 进行分析并进行人工二次聚类，投影寻踪法在水问题中的研究热点可归纳为以下 5 类：“理论方法研究” (黄色)、“水质评价” (蓝色+紫色)、“水资源承载力” (红色+橙色)、“水安全” (绿色)、“水资源系统脆弱性” (浅蓝色)。

3.1 投影寻踪理论方法研究

投影寻踪法最早由李国英^[1]、成平等^[24]引入中国。

早期的研究集中于投影寻踪回归预测，采用 SMART 计算模型进行回归逼近，用于预测和仿真研究。例如，郑祖国等^[25]利用投影寻踪回归模型进行水文预测，并提出投影寻踪自回归和投影寻踪多维混合回归模型。然而，由于投影寻踪模型求解困难，相关研究较少。

张欣莉等^[13]引入遗传算法进行投影寻踪模型求解，使投影寻踪模型的求解得以简化，从而使投影寻

踪的应用更加广泛。此后,更多的智能算法被引入,用于求解投影寻踪模型的优化问题。由图 3(b)可看出,在黄色聚类中,遗传算法占有相当大的比重,可见利用遗传算法解决投影寻踪模型中的问题在现有研究中应用广泛。例如,刘延明等^[26]利用粒子群优化算法,求解南宁市内河水水质评价的投影寻踪模型;姜林等^[27]应用免疫算法对投影寻踪地下水水质评价模型进行优化;侯景伟等^[28]应用蚁群算法求解投影寻踪需水预测模型。

此外,投影寻踪法也常被用来与其他方法进行组合创新。文俊等^[29]用投影寻踪法与最小信息熵原理结合研究区域水资源可持续利用情况;钱龙霞等^[30]将投影结果代入“S”型曲线计算研究对象的脆弱性;黄显峰等^[31]结合 RVA 法与投影寻踪法,建立变异度与其投影值的函数关系,评价河流水文情势。

现有理论研究中,多集中于模型求解方法的选择和方法的组合创新,也有少数文献从投影寻踪建模机理上进行改进:倪长健等^[32]将动态聚类思想引入投影寻踪模型,利用投影分散度和类内聚集度构造投影指标函数;金菊良等^[33]提出根据问题要求构造投影指标函数;王顺久等^[34]、熊聘等^[35]研究了投影寻踪模型的窗宽半径取值问题。

3.2 投影寻踪在水质评价中的应用

水质评价是水环境研究领域重要的研究内容,也是投影寻踪在国内较早的应用方向。据统计,目前已发表的有关投影寻踪在水问题中应用的文献,约 20%是关于水质评价的。现有研究的创新点主要集中于以下几个方面:

1) 研究对象。现有的投影寻踪水质评价研究中的研究对象涉及河流水质、地下水水质、湖泊富营养化、灌溉水质等水质评价问题。例如,康明等^[36]采用动态投影寻踪法建立水质评价模型,并以深圳市 5 个水库为研究对象进行了水质评价;于嘉骥等^[37]将投影寻踪法和云模型结合,对太湖流域的农业灌溉水质进行了评价。

2) 投影寻踪求解方法选择。通过选用不同的智能算法求解投影寻踪模型,力求求得的最佳投影方向接近实际最优解。例如,张欣莉等^[13]首次提出用遗传算法优化求解投影方向,并建立了基于投影寻踪的水质分类模型,大大简化了投影寻踪的求解过程;方崇等^[38]采用基于人工鱼群算法的投影寻踪评价模型,对我国 8 个湖泊的富营养化情况进行等级评价;邵磊等^[39]采用自由搜索算法寻找最佳投影方向,对山西汾河流域水质状况进行了综合评价;巩奕成等^[40]采用萤火虫算法来处理投影寻踪法的最优化问题,并以北京市朝阳区为研究对象,对其 19 个监测点的地下水水质进行了综合评价。

3) 水质评价等级的确定方法。根据投影值的大小,只能对不同样本的水质进行简单的排序,无法确

定其水质等级。如何根据投影值确定水质等级,是应用投影寻踪法进行水质评价的关键问题之一。金菊良等^[33]以水样投影值为自变量、经验水质等级为因变量绘制散点图,引入 Logistic 曲线,建立了水质等级与投影值之间的函数关系;杨晓华等^[41]根据投影值与经验水质等级的散点图,用插值曲线建立投影寻踪与水质等级间的插值模型,对包括西湖在内的湖泊富营养化水平进行了综合评价。

4) 投影目标(指标)函数的选取。在进行水质评价时,往往需要建立水样投影值与经验水质等级之间的对应关系,因此,投影值与水质等级之间的相关性越高,越有助于二者之间关系的建立。基于此,金菊良等^[33]提出将投影值与水质等级之间的相关系数作为投影目标函数的组成部分。

研究发现,现有文献中与投影寻踪求解方法选择相关的研究较多,而对于根据投影值确定水质等级和投影目标函数的研究相对较少,在后续的研究中仍需继续深入。

3.3 投影寻踪在水资源承载力中的应用

统计结果显示目前已发表文献中基于投影寻踪的水资源承载力研究约占投影寻踪在水问题的研究中文献总数的 15%,近年来成为投影寻踪在水问题方面仅次于水质评价的研究热点。王顺久等^[16]将投影寻踪法应用于淮河流域水资源承载能力评价;王淑娟^[42]根据投影值对石羊河流域 5 个地区的水资源承载力进行排序;陈亮亮等^[43]采用基于实码的加速遗传算法估计最佳投影方向,对广东东江流域水资源承载力进行评价;姜秋香等^[44]从资源、社会、经济、环境 4 个方面选取代表性指标并制定指标分级标准,采用粒子群算法,通过对比研究对象与不同等级阈值的最佳投影值进行区域水资源承载力等级划分;任守德等^[45]将农业水土资源作为一个系统,从宏观角度,结合投影寻踪与主成分分析,对建三江地区各农场农业水土资源承载力相对等级进行划分;崔东文等^[46]采用多种智能优化算法求解投影寻踪模型,并开展实证研究;郭倩等^[48]将模拟退火算法与投影寻踪法耦合,开展云南省水资源承载力综合评价研究;雍志勤等^[49]利用粒子群优化算法求解投影寻踪模型,对榆林市水资源承载力进行等级划分,并计算不同指标的贡献值,选取贡献值较大的指标作为水资源调控对象。

在现有文献中对水资源承载力的投影寻踪研究集中在承载力评价,文献间的差异多体现在承载力评价指标体系的差别和优化算法的不同,仅有少数文献在评价的基础上,应用投影寻踪法,对区域水资源承载力开展诊断、预测、调控研究,目前尚无承载力预警、承载力空间均衡方面更深层次的研究报道。

3.4 投影寻踪在水安全中的应用

水安全问题是 21 世纪人类生存发展所面临的严峻挑战之一,涵盖了水资源匮乏、水污染严重、水生

态恶化、水旱灾害频发等问题^[50]。现有文献中，投影寻踪在水安全中的应用主要是用于区域水安全综合评价问题，通过构造评价指标体系，构建投影寻踪评价模型，评价不同区域的水安全。例如：邱德华^[51]建立了基于投影寻踪的区域水安全等级评价模型；王顺久等^[52]从供需矛盾、生态环境、饮水安全等方面，用投影寻踪法建立了水安全综合评价模型，对黑龙江、江苏、陕西等 7 省的水安全问题进行了综合评价；吴开亚等^[53]结合层次分析法、信息熵和投影寻踪法建立了巢湖流域水资源安全现状评价模型。此外，也有少数文献针对水安全中的某一具体问题或某一特定水安全事件进行研究。例如，周玉良^[54]将投影寻踪与样条函数结合，对湖泊富营养化和洪水灾情等级等水安全具体问题进行了评价；王绍玉等^[55]将投影寻踪动态聚类模型应用于地震堰塞湖地区的水安全综合评价。

水安全问题包含了水资源、水环境、水生态和水灾害 4 方面，目前对其进行测度的主要途径分别是水环境承载力、水资源承载力和防洪抗旱体系承载力^[54]。通过前面的阐述可知，目前基于水环境和水资源承载力的研究较多，而针对水旱灾害的研究却相对较少。现有投影寻踪在水安全中的应用中，往往忽略水灾害在水安全中的重要作用，今后应加强对水灾害方面的研究。此外，现有的研究局限于水安全评价，如何将投影寻踪法结合 RS、AI 等技术，建立智能水安全模拟、预警、调控系统，值得继续深入研究。

3.5 投影寻踪在水资源系统脆弱性中的应用

脆弱性的概念源于自然灾害研究领域^[56]，20 世纪 90 年代以来，脆弱性的研究逐渐兴起，并扩展到气候变化、生态学、可持续性科学等诸多领域^[57]。目前，关于水资源系统脆弱性的定义尚无统一定论，现有的研究多针对水资源系统中某一具体对象，例如地下水脆弱性、旱灾脆弱性、防洪系统脆弱性等。国内基于投影寻踪的水资源脆弱性研究最早针对地下水开展。刘卫林等^[58]采用蒙特卡罗方法随机产生评价样本，利用投影寻踪法确定最佳投影方向和最佳投影值，根据投影值的散点分布图、用插值法建立地下水环境脆弱性评价模型，并采用宁陵县的大样本数据开展实证研究；刘仁涛等^[59]发挥投影寻踪客观定权的优势，构造基于遗传算法的地下水脆弱性评价模型，并在三江平原开展实证研究。随后，基于投影寻踪的水旱灾害脆弱性研究也开始出现，例如曹永强等^[60]选取水田密度、蒸发量、降水量等 7 个指标，建立投影寻踪农业旱灾脆弱性评价模型，并将其应用于衡阳市 7 个县域。近年来，随着对脆弱性研究的逐渐深化，逐渐开始出现针对水资源系统脆弱性的研究，例如钱龙霞等^[30]结合投影寻踪法和“S”型函数建立了水资源脆弱性评价模型，对泉州市 2000—2012 年水资源脆弱性进行评价。

通过对现有的文献分析发现，基于投影寻踪的水

资源脆弱性研究，在研究对象上经历了从局部到整体的发展过程，在研究尺度上，也从最初的某一地区某一时间的脆弱性评价发展为区域水资源脆弱性的时空分布特征评价和预测。但目前仍处于起步阶段，利用投影寻踪处理高维数据的优点结合遥感获取的大量数据进行脆弱性空间分布研究以及对水资源脆弱性开展动态评价是未来研究的重要方向。

综上所述，水质评价、水资源承载力、水安全、水资源系统脆弱性等水问题均是涉及影响因素比较多的典型高维数据问题，非常适合用投影寻踪法处理，有助于揭示这些水问题的高维数据结构特征，计算结果稳健、容错性强、可靠性高。但应用投影寻踪法进行水资源复杂系统的研究从开始到现在仅有 30 余年的时间，仍有很多理论和应用研究问题值得进一步探索。

4 投影寻踪研究趋势及展望

投影寻踪法是一种处理高维、非线性数据的探索性分析方法，其通过求解目标函数最优化问题来寻找能够反映高维数据特征的投影方向，从而实现高维数据的降维处理。投影寻踪法自 20 世纪 80 年代被引入中国，经过近 40 年的发展，取得了丰富成果。分析发现，现有研究在其理论方法方面相对较少，而应用多集中在评价问题上。为进一步完善投影寻踪理论方法体系，扩大投影寻踪的应用范围，下面从理论和应用二方面对投影寻踪今后亟待继续深入研究的主要问题展开展望。

4.1 在投影寻踪理论研究方面

1) 投影寻踪思想的深化。投影寻踪的基本思想是把高维数据投影到 1 至 3 维的低维子空间上，寻找能够反映高维数据特征结构的投影^[1]。现有的有关投影寻踪的研究大都是研究高维数据的一维投影，其基本思路是选定一个反映投影优劣程度的投影指标函数，通过求解投影指标函数的最优解寻找最合适的投影方向。然而由于实际问题的复杂性，一个一维投影可能无法完全反映高维数据的特征，此时需要进一步找出第 2 个、第 3 个投影或是将高维数据投影在二维空间中，以此来更全面地反映高维数据的特征。在接下来的研究中，有必要根据实际数据特点利用投影寻踪思想构建适合其数据特征的投影方法，而不是简单地套用现有的建模方法。

2) 投影指标函数的确定。投影指标函数的确定是为了寻找最佳投影方向，理论上投影指标函数的构造虽然没有统一的标准和形式，但是必须根据实际问题的具体要求和特点来确定。只有构造符合实际问题需求、有效反映实际数据结构特征的投影指标函数才能得到投影寻踪法的可信结果^[33]，例如在没有系统输出信息的投影寻踪分类模型中，如何把样本投影值整体上的散布程度和局部凝聚程度结合起来、构建合适

的投影指标。目前通常以投影值的标准差和局部密度的乘积作为投影指标函数,通过求解符合约束条件的投影指标函数最优解,确定使局部投影点尽可能密集、投影点团之间尽可能分散的最佳投影方向。而在具有系统输出信息的投影寻踪等级评价、预测模型中,理论上投影指标函数的构造无疑应考虑系统输入、输出之间的相关性信息,因此金菊良等^[33]提出根据实际问题要求来修改投影指标函数,使求解出的最佳投影方向能更好地适用于实际问题。目前已提出的投影指标函数主要有:投影值的标准差^[61],投影值的标准差和投影值与等级间相关系数绝对值的乘积^[33],投影值的标准差、局部密度和投影方向信息熵的乘积^[53],样本与聚类中心间加权广义欧式距离平方和与投影值标准差的比值^[62],样本投影值的离散程度与类内聚集度之差^[31]等。目前,根据实际问题修改投影指标函数的研究仍尚少。在今后的研究中,有必要继续深入研究如何科学合理地构造能充分反映实际问题特性的投影指标函数,这将是投影寻踪未来发展的主要动力,也将是投影寻踪理论研究的重要发展趋势。

3) 窗宽半径 R 值的确定。 R 是在传统的投影寻踪模型中,计算投影值局部密度时涉及一个重要参数。 R 值的选取直接影响到最优投影方向的求解结果。目前, R 值采用较多的主要有以下 3 种: Friedman 等^[4]提出的 $R=0.1S$ (S 为投影值的标准差); 王顺久等^[34]提出的 $r_{\max}+m/2 < R < 2m$ (r_{\max} 为投影值之间的最大距离, m 为数据维度); 熊聘等^[35]提出的 $r_{\max}/5 < R < r_{\max}/3$ (r_{\max} 为投影值之间的最大距离)。此外,倪长健等^[32]于 2006 年提出的投影寻踪动态聚类,该方法的优点是无需人为给定参数,避免了窗宽半径选择这一问题。 R 值的选取目前仍尚存争议,窗宽半径取值是否合理直接关系到投影寻踪模型的最终计算结果是否可靠准确,非常重要,是当前投影寻踪研究的难点,在今后的研究中仍需继续深入。

4) 投影寻踪法与其他方法耦合。实际问题一般是复杂的、综合性的,单一的方法往往不能很好地解释其内在规律,因此不同方法之间的耦合成为有效解决实际的重要途径之一。现有文献中,投影寻踪与其他方法的耦合,大致可分为以下几种:与优化算法的耦合,采用优化算法求解投影寻踪模型中的最优化问题;将投影寻踪确定的客观权重与其他定权方法确定的权重进行组合定权;根据计算所得投影值,采用 K -近邻法等分类方法对研究对象进行分类。可见现有的投影寻踪研究,多是简单组合几种方法,缺乏耦合的物理解析。如何根据实际问题的特点,实现投影寻踪法与其他方法的有机耦合,仍需进一步深入探索。

4.2 在投影寻踪应用研究方面

1) 投影寻踪预测。现有的投影寻踪预测大多采用投影寻踪回归模型,通过采取一系列岭函数的和来逼近目标函数的方法^[6],利用 SMART 软件或智能

算法求解模型参数。然而,相对投影寻踪评价而言,投影寻踪预测虽起步较早,却未能得到广泛应用,这可能与投影寻踪回归预测模型求解过程比较复杂有关。因此迫切需要建立简便有效的投影寻踪预测模型,拓宽投影寻踪法在预测中的应用范围,建立投影寻踪法与其他方法的耦合预测模型,提高预测精度、简化模型求解过程。

2) 投影寻踪动态评价。投影寻踪评价是目前投影寻踪法应用的主要领域。据统计,目前已发表的投影寻踪文献中,投影寻踪评价约占 60%。现有的投影寻踪评价往往局限于对截面数据的静态评价,而在实际中往往需要分析研究同时具有 2 个维度的面板数据。近年来,涌现了很多以面板数据为研究对象的研究成果。在中国知网上以“面板数据+评价”为主题词检索,共有文献 1 672 篇,其中 2014—2019 年的文献数量占总数的 55%,可见,基于面板数据开展动态评价已成近年来的研究趋势。动态评价的核心问题是如何科学确定评价样本的时间权重和指标权重,投影寻踪法作为一种常用的客观定权方法,可用于确定评价样本的时间权重和指标权重,以后需加强投影寻踪动态评价的深入研究。

3) 投影寻踪诊断识别。关键因子的诊断识别,对系统调控预警具有重要意义,然而目前应用投影寻踪法进行诊断识别的研究尚不多见。类似根据最优投影方向^[33]、最佳投影特征值在各指标上的分量值大小^[16],定量描述各指标与评价结果之间的相互关系,进而诊断识别影响评价结果的主要因子,将是投影寻踪今后研究的重要应用领域。

4) 投影寻踪预警。预警的过程包括预警指标的识别、警戒阈值的确定、系统变化趋势的预测、危害程度的评价等。投影寻踪作为预测和评价的常用方法,显然也可用于预警研究中。然而现有文献中采用投影寻踪法进行预警的研究并不多。采用投影寻踪法进行预警研究,将是未来投影寻踪应用的又一重要发展趋势。现有文献中,投影寻踪在预警体系中的应用主要是利用投影寻踪法确定预警指标权重或根据投影值的大小判断警度。在今后的研究中,可进一步发挥投影寻踪在预警体系中的作用,例如可利用投影寻踪法进行预警指标的筛选、警素预测模型的建立等。

5) 投影寻踪决策。现有的投影寻踪决策仍属于以不同方案为评价对象的系统综合评价范畴,多数文献仅是根据投影值的大小对待选方案进行简单的排序,缺乏对决策问题的系统分析和深入挖掘探讨。如何利用投影寻踪法处理多属性决策问题的优势,结合其他决策方法,构建具有物理解析意义的决策方法,将是投影寻踪决策的重要发展趋势。此外,利用投影寻踪法解决包括决策时间、决策方案、决策指标多个维度的动态决策问题^[63]也仍是当前投影寻踪研究的重要发展趋势。

参考文献：

- [1] 李国英. 什么是投影寻踪[J]. 数理统计与管理, 1986, 5(4): 21-23, 36.
LI Guoying. What is projection pursuit[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 1986, 5(4): 21-23, 36.
- [2] 李祚泳. 投影寻踪技术及其应用进展[J]. 自然杂志, 1997, 19(4): 224-227.
LI Zuoyong. Progress of projection pursuit and its application[J]. Chinese Journal of Nature, 1997, 19(4): 224-227.
- [3] 倪长健, 崔鹏. 投影寻踪动态聚类模型[J]. 系统工程学报, 2007, 22(6): 634-638.
NI Changjian, CUI Peng. Projection pursuit dynamic cluster model[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(6): 634-638.
- [4] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, 23(9): 881-890.
- [5] 李国英. 散布阵及主成分的投影寻踪估计依概率收敛的速度[J]. 应用数学学报, 1986, 9(1): 42-49.
LI Guoying. Convergence rate of projection pursuit estimators for dispersion matrices[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1986, 9(1): 42-49.
- [6] 郑祖国. 投影寻踪自回归模型及其在新疆春旱早期降水量长期预测中的应用[J]. 八一农学院学报, 1993, 16(2): 1-7.
ZHENG Zuguo. Principle of projection pursuit auto-regressive model and application on long-range forecast of spring precipitation in Xinjiang[J]. Journal of August 1st Agri. College, 1993, 16(2): 1-7.
- [7] 杨力行, 刘金清. 投影寻踪应用技术在水文领域中喜获丰收[J]. 水文, 1993(2): 57-53.
YANG Lixing, LIU Jinqing. Progress in the application of projection pursuit in hydrology[J]. Journal of China Hydrology, 1993(2): 57-53.
- [8] 吴超存, 李香云. 基于投影寻踪回归技术的塔里木河水水质模拟分析[J]. 干旱区地理, 1997, 20(2): 61-66.
WU Chaocun, LI Xiangyun. Projection pursuit regression technique based modelling and analyzing on the water quality of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 1997, 20(2): 61-66.
- [9] 李祚泳. 污染物浓度预测的 PPR 模型[J]. 环境科学, 1997, 18(4): 38-40, 45, 94.
LI Zuoyong. Projection pursuit regressive model on concentration forecast of pollutant[J]. Environmental Science, 1997, 18(4): 38-40, 45, 94.
- [10] 李祚泳, 邓新民, 桑华民. 台风登陆华南年频次的投影寻踪回归预测模型[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 181-185.
LI Zuoyong, DENG Xinmin, SANG Huamin. Forecasting model of numbers of landed typhoon based on projection pursuit regression[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1998, 14(2): 181-185.
- [11] 李祚泳, 邓新民, 桑华民, 等. 投影寻踪回归模型及其在降水预测中的应用[J]. 新疆气象, 1998(3): 9-11.
LI Zuoyong, DENG Xinmin, SANG Huamin, et al. Projection pursuit regression model and its application in precipitation prediction[J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 1998(3): 9-11.
- [12] 李作泳. 用投影寻踪回归进行大气颗粒物的污染源解析[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 270-272.
LI Zuoyong. Sources Apportionment of atmospheric particulates by projection pursuit regression[J]. China Environmental Science, 1999, 19(3): 270-272.
- [13] 张欣莉, 丁晶, 李祚泳, 等. 投影寻踪新算法在水质评价模型中的应用[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2): 187-189.
ZHANG Xinli, DING Jing, LI Zuoyong, et al. Application of new projection pursuit algorithm in assessing water quality[J]. China Environmental Science, 2000, 20(2): 187-189.
- [14] 王春峰, 李文华. 商业银行信用风险评估: 投影寻踪判别分析模型[J]. 管理工程学报, 2000, 14(2): 43-46.
WANG Chunfeng, LI Wenhua. Credit risk assessment in commercial banks projection pursuit discriminant model[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2000, 14(2): 43-46.
- [15] 金菊良, 张欣莉, 丁晶. 评估洪水灾情等级的投影寻踪模型[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(2): 140-144.
JIN Juliang, ZHANG Xinli, DING Jing. Projection pursuit model for evaluating grade of flood disaster loss[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2002, 22(2): 140-144.
- [16] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等. 流域水资源承载能力的综合评价方法[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 88-92.
WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Comprehensive evaluation method for water resources carrying capacity in river basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 88-92.
- [17] 万中英. 基于投影寻踪中文网页自动分类[D]. 南昌: 江西师范大学, 2004.
WAN Zhongying. Automatic Chinese webpages classification based on projection pursuit[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2004.
- [18] 邱均平. 文献计量学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1988.
QIU Junping. Bibliometrics[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1988.
- [19] 高凯. 文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究[J]. 科技情报开发与经济, 2015, 25(12): 95-98.
GAO Kai. Research on the application of bibliometric analysis software VOSviewer Software[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2015, 25(12): 95-98.
- [20] 张洋, 庞进京, 赵旭峰. 基于排序空间的学术期刊综合评价指标体系研究[J]. 情报杂志, 2019, 38(12): 184-190.
ZHANG Yang, PANG Jinjing, ZHAO Xufeng. Research on the index system of comprehensive evaluation of academic journals based on ranking space[J]. Journal of Intelligence, 2019, 38(12): 184-190.
- [21] 魏瑞斌. 基于关键词的情报学研究主题分析[J]. 情报科学, 2006, 24(9): 1 400-1 404, 1 434.
WEI Ruibin. Analysis of the research subject of information science based on the keyword[J]. Journal of Intelligence, 2006, 24(9): 1 400-1 404, 1 434.
- [22] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 基于知识图谱的自然灾害风险防控研究进展的文献计量分析[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 145-152.
JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Bibliometric analysis of research progress in natural disaster risk prevention and control based on knowledge graph[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 145-152.
- [23] 李文兰, 杨祖国. 中国情报学期刊论文关键词词频分析[J]. 情报科学, 2005, 23(1): 68-70, 143.
LI Wenlan, YANG Zuguo. Analysis on frequencies of keywords in Chinese information science journals papers[J]. Journal of Intelligence,

- 2005, 23(1): 68-70, 143
- [24] 成平, 李国英. 投影寻踪——一类新兴的统计方法[J]. 应用概率统计, 1986, 2(3): 77-86.
CHENG Ping, LI Guoying. Projection Pursuit—A Class of New Statistical Methods[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1983, 2(3): 77-86.
- [25] 郑祖国, 刘大秀. 投影寻踪自回归和多维混合回归模型及其在大河长河段洪水预报中的应用[J]. 水文, 1994, 4(2): 6-10.
ZHENG Zuguo, LIU Daxiu. Application of the PPAR and PPMR in flood forecasting for long reaches of large rivers[J]. Journal of China Hydrology, 1994, 4(2): 6-10.
- [26] 刘延明, 陆克芬, 方崇. 基于投影寻踪和粒子群优化算法的南宁市内河水质综合评价研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(26): 12 670-12 672, 12 775.
LIU Yanming, LU Kefen, FANG Chong. Study on water quality evaluation of Nanning inland river based on projection pursuit and particle swarm optimization[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(26): 12 670-12 672, 12 775.
- [27] 姜林, 李梦龙. 基于免疫算法优化的投影寻踪水质评价模型[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2004, 41(4): 816-819.
JIANG Lin, LI Menglong. Model of Projection pursuit water quality evaluation based on immune evolutionary algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2004, 41(4): 816-819.
- [28] 侯景伟, 孔云峰, 孙九林. 蚁群算法在需水预测模型参数优化中的应用[J]. 计算机应用, 2012, 32(10): 2 952-2 955, 2 959.
HOU Jingwei, KONG Yunfeng, SUN Jiulin. Application of ant colony algorithm for parameter optimization of water demand prediction model[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(10): 2 952-2 955, 2 959.
- [29] 文俊, 李靖, 金菊良. 基于熵组合权重的区域水资源可持续利用预警模型[J]. 水电能源科学, 2006(3): 6-10, 97.
WEN Jun, LI Jing, JIN Juliang. Forewarning model of regional water resources sustainable utilization based on combined weights and entropy principles[J]. Water Resources and Power, 2006(3): 6-10, 97.
- [30] 钱龙霞, 王红瑞, 张韧, 等. 基于投影寻踪的水资源脆弱性 S 型函数模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(1): 185-196.
QIAN Longxia, WANG Hongrui, ZHANG Ren, et al. An S type function model for water resources vulnerability based on projection pursuit[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 185-196.
- [31] 黄显峰, 贾永乐, 方国华, 等. 基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 479-485.
HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 479-485.
- [32] 倪长健, 王顺久, 崔鹏. 投影寻踪动态聚类模型及其在地下水分类中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(6): 29-33.
NI Changjian, WANG Shunjiu, CUI Peng. Projection pursuit dynamic cluster model and its application in groundwater classification[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(6): 29-33.
- [33] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 431-434.
JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of water quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 431-434.
- [34] 王顺久, 张欣莉, 丁晶, 等. 投影寻踪聚类模型及其应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(6): 53-55, 61.
WANG Shunjiu, ZHANG Xinli, DING Jing, et al. Projection pursuit cluster model and its application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(6): 53-55, 61.
- [35] 熊聘, 楼文高. 投影寻踪建模中关键参数合理值的确定与分析[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(9): 50-55.
XIONG Pin, LOU Wengao. Determination and analysis of reasonable value of key parameter in projection pursuit clustering modelling[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(9): 50-55.
- [36] 康明, 王丽萍, 赵璧奎, 等. 基于投影寻踪动态聚类法的水库水质评价模型[J]. 水力发电, 2013, 39(1): 16-19.
KANG Ming, WANG Liping, ZHAO Bikui, et al. Reservoir water quality assessment model based on projection pursuit dynamic clustering method[J]. Water Power, 2013, 39(1): 16-19.
- [37] 于嘉骥, 张慧妍, 王小艺, 等. 基于改进的投影寻踪-云模型的农业灌溉水质综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 142-146.
YU Jiaji, ZHANG Huiyan, WANG Xiaoyi, et al. Comprehensive evaluation of agricultural irrigation water quality based on modified projection pursuit-cloud model[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 142-146.
- [38] 方崇, 谢洁, 黄伟军. 一种改进投影寻踪回归算法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 广东农业科学, 2009, 36(12): 8-11, 19.
FANG Chong, XIE Jie, HUANG Weijun. A comprehensive evaluation method of projection pursuit based on artificial fish-swarm algorithm in lake eutrophication[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009, 36(12): 8-11, 19.
- [39] 邵磊, 周孝德, 杨方廷, 等. 基于自由搜索的投影寻踪水质综合评价方法[J]. 中国环境科学, 2010, 30(12): 1 708-1 714.
SHAO Lei, ZHOU Xiaode, YANG Fangting, et al. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of water quality based on free search[J]. China Environmental Science, 2010, 30(12): 1 708-1 714.
- [40] 巩奕成, 张永祥, 丁飞, 等. 基于萤火虫算法的投影寻踪地下水水质评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 566-572.
GONG Yicheng, ZHANG Yongxiang, DING Fei, et al. Projection pursuit model for assessment of groundwater quality based on firefly algorithm[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(3): 566-572.
- [41] 杨晓华, 杨志峰, 郇建强. 水质综合评价的遗传投影寻踪插值模型[J]. 环境工程, 2004, 22(3): 69-71.
YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, LI Jianqiang. A Genetic Projection pursuit interpolation model for comprehensive assessment of water quality[J]. Environmental Engineering, 2004, 22(3): 69-71.
- [42] 王淑娟. 基于投影寻踪模型和加速遗传算法的石羊河流域水资源承载力综合评价[J]. 地下水, 2009, 31(6): 82-84.
WANG Shujuan. Application of PPC model and RAGA for comprehensive evaluation of water resource carrying capacity in Shiyang river basin[J]. Ground Water, 2009, 31(6): 82-84.
- [43] 陈亮亮, 刘风华, 龚程. 投影寻踪模型在区域水资源承载力综合评价

- 价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010(1): 13-15.
- CHEN Liangliang, LIU Fenghua, GONG Cheng. Application of PPC model for comprehensive evaluation of regional water resource carrying capacity[J]. Water Saving Irrigation, 2010(1): 13-15.
- [44] 姜秋香, 付强, 王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 184-190.
- JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity in sanjiang plain[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 184-190.
- [45] 任守德, 付强, 王凯. 基于宏观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 8-14.
- REN Shoude, FU Qiang, WANG Kai. Regional agricultural water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 8-14.
- [46] 崔东文, 金波. 足球联赛竞争算法-投影寻踪模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 5-11.
- CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on SLC-PP model[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(1): 5-11.
- [47] 崔东文, 金波. 基于 WDO-PP 模型的文山州近 10 年水资源承载力评价[J]. 水利经济, 2016, 34(6): 43-49.
- CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of carrying capacity of water resources of wenshan prefecture in last 10 years based on WDO-PP model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(6): 43-49.
- [48] 郭倩, 汪嘉杨, 张碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 484-493.
- GUO Qian, WANG Jiayang, ZHANG Bi. Comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity based on DPSIRM[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 484-493.
- [49] 雍志勤, 张鑫. 基于投影寻踪模型的榆林市水资源承载能力研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 101-107.
- YONG Zhiqin, ZHANG Xin. The carrying capacity of water resources in Yulin studied using the projection pursuit method[J]. Journal of Irrigation Drainage, 2019, 38(1): 101-107.
- [50] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- LIU Xin. Research on Regional Water Security Assessment Model and Its Application[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [51] 邱德华. 区域水安全战略的仿真评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- QIU Dehua. Research on the Simulation & Evaluation of Regional Water Security Strategy[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [52] 王顺久, 李跃清, 丁晶. 基于指标体系的水安全评价方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 116-119.
- WANG Shunjiu, LI Yueqing, DING Jing. Evaluation method of water security based on indicator system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2): 116-119.
- [53] 吴开亚, 金菊良. 基于变权重和信息熵的区域水资源安全投影寻踪评价模型[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1 085-1 091.
- WU Kaiya, JIN Juliang. Projection pursuit model for evaluation of region water resource security based on changeable weight and information[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(9): 1 085-1 091.
- [54] 周玉良. 水安全问题中的智能非参数方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- ZHOU Yuliang. Intelligence Nonparametric Methods for Water Security Systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [55] 王绍玉, 唐桂娟. 汶川地震堰塞湖地区水安全综合评价[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(S1): 76-81.
- WANG Shaoyu, TANG Guijuan. Water safety evaluation in the regions of wenchuan earthquake landslide lake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(S1): 76-81.
- [56] JANSSEN M A. An update on the scholarly networks on resilience, vulnerability, and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. Global Environmental Change, 2007, 12(2): 9.
- [57] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- LI He, ZHANG Pingyu, CHENG Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability[J]. Progress in Geography, 2008, 27(2): 18-25.
- [58] 刘卫林, 董增川, 童芳, 等. 地下水环境脆弱性评价的遗传投影寻踪插值模型[J]. 水电能源科学, 2006, 24(3): 21-24, 98.
- LIU Weilin, DONG Zengchuan, TONG Fang, et al. Genetic projection pursuit interpolation model of groundwater environmental vulnerability evaluation assessment[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(3): 21-24, 98.
- [59] 刘仁涛, 付强, 盖兆梅, 等. 三江平原地下水脆弱性评价的投影寻踪模型[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(2): 184-190.
- LIU Rentao, FU Qiang, GAI Zhaomei, et al. PPC model based on RAGA in evaluating groundwater vulnerability of Sanjiang Plain[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(2): 184-190.
- [60] 曹永强, 伊吉美, 游海林, 等. 投影寻踪技术在农业旱灾脆弱性评价中的应用[J]. 人民黄河, 2010, 32(2): 12-13.
- CAO Yongqiang, YI Jimei, YOU Hailin, et al. Application of projection pursuit in vulnerability assessment of agricultural drought[J]. Yellow River, 2010, 32(2): 12-13.
- [61] 金菊良, 丁晶, 魏一鸣, 等. 解不确定型决策问题的投影寻踪方法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(4): 42-46.
- JIN Juliang, DING Jing, WEI Yiming, et al. Projection pursuit method for uncertain decision-making problem[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, 23(4): 42-46.
- [62] 廖力, 周雪芹, 李清清, 等. 基于双重迭代聚类的模糊投影寻踪聚类算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(7): 932-938.
- LIAO Li, ZHOU Xueqin, LI Qingqing, et al. A dual iterative clustering based fuzzy projection pursuit clustering algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(7): 932-938.
- [63] 金菊良, 汪淑娟, 魏一鸣. 动态多指标决策问题的投影寻踪模型[J]. 中国管理科学, 2004, 12(1): 64-68.
- JIN Juliang, WANG Shujuan, WEI Yiming. Projection pursuit model for dynamic multiple attribute decision problems[J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(1): 64-67.

Bibliometric Analysis of the Application of Projection Pursuit Regression Method in Water Research in China

ZHOU Rongxing¹, CHEN Menglu¹, JIN Juliang^{1,2}, CUI Yi^{1,2*}, ZHOU Yuliang^{1,2}, NING Shaowei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: **【Background】** Practical problems in water science and engineering are diverse and complex, characterized by nonlinearity and multi-dimensions. Satisfactory solutions to them are not easy to obtain using traditional data analysis methods. The projection pursuit regression proposed in the 1960s can fill this gap and it has been developed and applied rapidly. Since its introduction to China in the 1980s, the projection pursuit method has seen a widespread applications because of its superiority in processing multi-dimensional data and flexibility in problem-oriented solving. **【Objective】** The objective of this paper is to review and summarize the evolution and application of the projection pursuit method in different disciplines in China since the 1980s, as well as the areas to which it has been mostly used. **【Method】** Our analysis was based on the literatures collected from the China National Knowledge Infrastructure database and considered four categories in the collection: temporal change, the disciplines, journals that published papers using this method, as well as some keywords representative of its applications. The data was then analyzed using the visualization analysis function of the bibliometrics provided by VOSviewer. **【Result】** Application and research of the projection pursuit method in China can be roughly divided into four stages: Introduction stage from 1984 to 1992; slow development stage from 1993 to 1999, rapid development stage from 2000 to 2010, and stable development after 2011. Its research and application are primarily in water conservancy engineering, environment science and engineering, and quantitative economy. Four of the top five journals that have published most projection pursuit papers are all water science journals, indicating that this method might be most suitable for solving water-related problems and are widely appreciated by the water science community. The areas that used the projection pursuit most included comprehensive evaluation, regression analysis, scheme selection and dynamic clustering. The results of clustering analysis showed that the research and application of the projection pursuit method in water-related problems are mainly in theoretical development, water quality evaluation, analyzing carrying capacity of water resource, water safety, and vulnerability of water resource systems. **【Conclusion】** The projection pursuit method has been widely used in China, especially in water science for evaluating water quality, water safety analysis, as well as bearing capacity of water resources. The method still has potential. In theoretical perspective, further work might focus on the fundamentals, improving the algorithms to determine the projection index function and the window width radius, as well as coupling it with other methods. In practical application, the method has potential applications in areas such as diagnosis identification, early warning, decision making, and evaluation of dynamic systems.

Key words: projection pursuit regression; research progress; water problem; bibliometric method; visualization analysis; VOSviewer

责任编辑: 白芳芳