

· 环境综合整治 ·

基于模糊 DEMATEL-ISM 太湖流域氮减排影响因素研究

席 轩¹, 张骥骧^{1,2}

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 211106;
2. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 102488)

摘 要: 针对目前流域氮污染问题的持续恶化, 文章首先在文献分析和专家调研的基础上建立了流域氮减排的影响因素体系, 通过模糊 DEMATEL 法对各因素进行梳理得到关键因素, 然后利用改进的 ISM 构建各因素的递阶解释结构模型, 最后进行复杂网络结构分析。结果表明, 关键因素大部分来自于政府和技术层面并且位于系统结构的较高层次, 同时单位氮减排成本和排污权交易价格虽位于较低层次但易受到较多高层次因素的影响。此外, 该系统的复杂网络结构的最大度较大以及平均路径短, 因此各关键因素联系紧密复杂、传递迅速, 容易导致流域氮污染进一步的恶化。

关键词: 流域氮减排; 影响因素; 模糊 DEMATEL; ISM; 复杂网络

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.02.005

Research on Factors Affecting Nitrogen Emission Reduction in the Taihu Basin Based on Fuzzy DEMATEL-ISM

XI Xuan¹, ZHANG Jixiang^{1,2}

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China)

Abstract: In view of the continuous deterioration of the current nitrogen pollution problem in the basin, the article firstly established the influencing factors system of the nitrogen emission reduction in the basin based on a literature analysis and the expert investigation. The fuzzy DEMATEL method was used to sort out the factors to obtain the key factors, and then a hierarchical interpretation structure model of each factor was constructed by using the improved ISM, which finally analyzed the complex network structure. The results showed that most of the key factors came from the government and technology level and they were at a higher level of the system structure. At the same time, the nitrogen emission reduction cost and the emission trading price were at a lower level, but they were susceptible to many high-level factors. In addition, the system had a large complex network structure and a short average path. Therefore, the key factors were closely related and were rapidly transferred, which could easily lead to a further deterioration of the nitrogen pollution in the basin.

Keywords: Basin Nitrogen Emission Reduction; Influencing Factors; Fuzzy DEMATEL; ISM; Complex Network

CLC number: X524

随着碳减排问题得到社会各界的重视, 二氧化碳的过度排放现象逐渐得到有效控制, 但是目前少有人意识到氮排放对于一个流域的危害。随着太湖流域社会经济的快速发展, 流域内废水排放量大量增加, 近 30 年来流域水体水质不断下降^[1]。根据《江苏省“十三五”太湖流域水环境综合治理行动方案》, 目前农业面源的污染负荷占比增高趋势明显,

其中以氮磷污染负荷为主。围绕我国农业面源水污染防治的重大战略需求, “十三五”期间国家重点研发计划设立了“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”重点专项^[2]。由此可见, 流域的氮减排问题应该值得重新去审视。

近年来, 国内外对于氮排放的研究重点主要有其控制和治理技术^[3-4]、氨氮的最大容量研究^[5]和

收稿日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(71101071); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2019045)

作者简介: 席 轩(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 流域氮减排博弈。E-mail: 15715198080@163.com

通信作者: 张骥骧(1978-), 男, 博士后、副教授。研究方向: 有限理性博弈与企业经营过程分析与决策。

E-mail: zhang_jixiang@nuaa.edu.cn

引用格式: 席 轩, 张骥骧. 基于模糊 DEMATEL-ISM 太湖流域氮减排影响因素研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 22-29.

监测管理^[6]等。其中流域氮减排研究目前较少, 相关研究主要集中在以下几个方面: 张淑丽^[7]和刘刚等^[8-9]通过对太湖流域的排污权交易进行研究, 得出排污权交易价格、氮排放限值等因素对流域水污染的影响; 董圆媛^[10]在构建太湖流域减排绩效评价指标的研究中, 总结出影响减排效率的因素包括工业氮排放强度等重要因素; 唐玉兰等^[11]采用数据包络分析对辽河流域的水污染物总量减排的效率进行评估, 结果表明减排措施的规模和管理类的减排措施有待改进; 赵永宏等^[12]基于鄱阳湖流域, 建立了氮、磷减排调控多区域分析模型来对比两种调控策略, 研究表明了科学研究与环境管理的重要性; 王凤鹭等^[13]针对松花江流域的农业面源污染来构建指标体系以及确定指标排放计算方法, 总结出氨氮污染物的减排对策; KONG et al^[14]、CHEN et al^[15]、YAN et al^[16]对中国九龙江流域氮减排以及减排的成本效益进行研究, 研究结果说明减少氮肥的应用、建立湿地面积是主要的减排措施。

综上所述, 大部分学者是从特定的角度或根据实际问题来研究氮减排问题, 没有从系统的角度看待整个流域的氮减排影响因素研究, 从而无法得出关键因素以及各因素之间的因果关系。因此, 本文首先识别梳理影响太湖流域氮减排的因素, 然后通过模糊 DEMATEL-ISM 模型对流域氮减排各因素的层次划分和复杂网络结构进行研究, 最后筛选出关键因素, 为流域水污染的治理提供理论依据。

1 概念界定及影响因素的提出

1.1 流域氮减排

近年来, 我国许多流域如松花江、洞庭湖和太湖等出现了较严重的水体氮污染现象。氮是造成流域富营养化的主要元素, 为了防止流域富营养化进一步恶化, 必须对氮排放进行严格有效地控制。虽然国内外对氮减排研究有不同的见解, 其中在对废水氮减排的控制要素研究中讨论了氨氮和总氮 2 项控制指标的差异。“十三五”期间我国仍处于工业化中后期, 流域环境与能源消耗矛盾更集中, 重点流域的点源污染得到削减, 但面源污染治理难度加大。随着氨氮成为流域中的主要污染物之一, 农业面源污染的加剧, 《“十三五”主要污染物总量控制规划编制技术指南》中将氨氮考虑进流域总量控制体系中, 并且氨氮的过度排放将导致总氮的增

加。因此, 本文将氮减排的控制指标定义为氨氮, 其更符合“十三五”期间流域污染治理的情况。

氨氮污染可分为外源和内源, 2 个途径: 外源氨氮主要通过面污染源和点污染源 2 种方式进入水体, 对于氨氮的总量减排主要是通过控制外源的输入来实现。外源污染中点源主要包括工业废水和生活污水。外源污染中的面源主要是农业面源污染, 包括农业施肥、养殖投饵等^[17], 同时畜禽养殖业所造成的氨氮污染日趋严重。

1.2 流域氮减排影响因素体系的构建

在文献和调研的基础上, 将从企业、政府、技术水平和社会层面 4 个维度建立了流域氮减排的影响因素体系。企业的污染排放强度是氮污染中的关键因素, 文中将农民群体视为企业层面中的农业源企业以方便研究, 最后总结出企业层面下的 6 个因素^[1-2, 10]; 作为流域氮减排中最重要的影响者, 政府管理协调其他各方的合理运作, 主要通过环境管理和相关政策来加强氮减排的有效推进, 最后总结出政府层面下的 9 个因素^[7-9, 18-19]; 减排技术关系到全国各流域氮减排工作能否高效快速实施, 很大程度影响着企业和农民的减排意愿, 最后总结出技术层面下的 4 个因素^[10-13]; 流域氮减排工作是一个复杂的系统, 其中社会因素是不可或缺的一个重要因素, 一定程度决定了减排工作的走势, 最后总结出社会层面下的 8 个因素^[10, 14-16]。

据以上分析: 流域氮减排的影响因素主要来源于企业、政府、技术水平和社会 4 个层面, 包括单位 GDP 工业氮排放强度、氮排放有偿使用费和污水处理率等 27 个因素, 具体情况见表 1。

2 模糊 DEMATEL-ISM 模型的构建

DEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) 方法起初主要用于研究和解决错综复杂的问题^[20]。该方法以矩阵工具和图论为基础, 通过聚集专家或群组的知识 and 经验判断, 构建复杂因素之间因果关系的可视化结构^[21]。同时引入模糊集理论来解决专家的判断的模糊性, 改进的 ISM 法可以理清各因素间的层次划分和影响路径; 最后进行复杂网络结构分析, 便于理清流域氮减排各因素之间影响关系。基于模糊 DEMATEL-ISM 的流域氮减排影响因素模型的具体实施步骤见图 1。

表 1 流域氮减排影响因素指标体系

指标分类	一级指标	二级指标
流域氮减排 影响因素体 系A	企业因素B ₁	单位GDP工业氮排放强度C ₁₁
		高氮排量产品的生产比例C ₁₂
		农业源企业氮排放强度C ₁₃
		农田氮肥使用强度C ₁₄
		单位氮减排成本C ₁₅
		氮排放标准限值C ₁₆
	政府因素B ₂	氮排放有偿使用费C ₂₁
		排污权交易价格C ₂₂
		环保投入占GDP的比重C ₂₃
		氮减排奖励补贴标准C ₂₄
		政府监督成本C ₂₅
		税收返还比例C ₂₆
		企业偷排的惩罚系数C ₂₇
		社会舆论成本C ₂₈
		氮排放税率C ₂₉
	技术水平因素B ₃	生活污水处理率C ₃₁
		清洁生产技术能力C ₃₂
		减排技术创新成本C ₃₃
		清洁能源的购买成本C ₃₄
	社会因素B ₄	人均GDPC ₄₁
		公众对氮减排的支持率C ₄₂
		高氮能源使用强度C ₄₃
		湿地建设面积C ₄₄
		水土流失面积C ₄₅
		流域第三产业占比C ₄₆
		城市化密度C ₄₇
		人均能源耗量C ₄₈

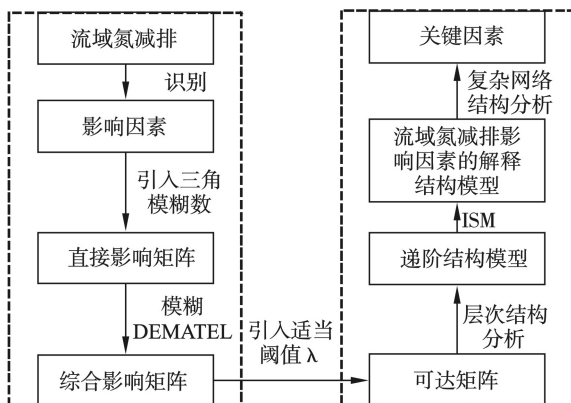


图 1 基于模糊 DEMATEL-ISM 的流域氮减排影响因素流程模型图

2.1 数据的模糊处理

为解决 DEMATEL 方法中专家判断模糊问题, 本文采用 LI 的模糊数与语意评价转换关系, 利用三

角模糊数方法对初始直接影响矩阵进行处理, 提高 DEMATEL 方法的精确性^[22]。本文通过文献以及专家咨询得出的影响因素指标 $C=\{C_{11}, C_{12}, \dots, C_{48}\}$, 并设计专家评价等级问卷, 即将影响程度的大小被分为没有“0”、一般“1”、弱“2”、强“3”、较强“4”。为获取 27 个影响因素间相互影响度, 邀请 7 位在流域水污染研究领域且熟悉流域氮减排发展现状的专家对各影响因素进行判断, 根据 OPRICOVIC^[23] 中的数据解模糊化获得直接影响矩阵 A 。

2.2 利用模糊 DEMATEL 法筛选关键因素

2.2.1 综合影响矩阵的计算 经过解模糊化得到直接影响矩阵 A , 经过公式(1)处理得到标准化直接影响矩阵 C ; 接着运用公式(2)将 C 转化为综合影响矩阵 $T=(t_{ij})_{n \times n}$ 。

$$C = \frac{A}{\max \left(\max \sum_{i=1}^n a_{ij}, \max \sum_{j=1}^n a_{ij} \right)} \quad (1)$$

$$T = \lim_{m \rightarrow \infty} (C + C^2 + \dots + C^m) = C(I - C)^{-1} \quad (2)$$

式(1)中, t_{ij} 为因素 i 和因素 j 的间接影响关系; I 为单位矩阵。

2.2.2 影响度、被影响度、原因度和中心度的计算 在上述求得的综合影响矩阵 T 中, 行和为 f_i , 表示因素的影响度; 列和为 e_j , 表示因素的被影响度。当 $i=j$ 时, 中心度 m_i 表示因素在系统中的位置及重要程度; 原因度 n_i 用于分析得出各影响因素的重要性及所属的因果种类, 计算公式见式(3-4)。

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i=1, 2, \dots, n); e_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$m_i = f_i + e_j, n_i = f_i - e_j, i = j \quad (4)$$

2.2.3 影响因子四分图的构建 将流域氮减排各影响因素的中心度和原因度分别作为横纵坐标, 得出对应的 27 个因素散点图以分析原因因素和结果因素的关系以及关键因素的分布区域。

2.3 利用集成 ISM 法构建递阶层次结构

由于模糊 DEMATEL 法计算得出的综合影响矩阵 T 与 ISM 法中的可达矩阵 K 的相似性在于都能够表达出各因素之间的是否存在相应的影响关系, 因此本研究将集成模糊 DEMATEL-ISM 法对流域氮减排影响因素进行研究。

2.3.1 选取阈值 λ 和计算可达矩阵 K 根据上一节计算得出的流域氮减排影响因素综合影响矩阵

T , 根据 $Q=T+I$ 计算出整体影响矩阵 Q 。进而根据公式(5)求出可达矩阵 $K=(k_{ij})_{n \times n}$ 。

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & q_{ij} \geq \lambda (i, j = 1, 2 \cdots n) \\ 0 & q_{ij} < \lambda (i, j = 1, 2 \cdots n) \end{cases} \quad (5)$$

由于阈值 λ 的设定将影响可达矩阵的准确获得和相应影响因素的层次划分, 因此, 需要考虑专家的建议以及流域氮减排情况。

2.3.2 层次结构分析 对上述求得的可达矩阵进行分析, 求出可达集 R_i 和先行集 S_i , 对可达矩阵每一个因素验证 $R_i=R_i \cap S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是否成立, 如果成立划去因素 a_i 所在行和列, 重复以上步骤, 直到划除所有因素, 最后将划分好的因素进行层级的确定。

2.4 复杂网络结构的构建

根据复杂网络的思路构建流域氮减排因素的复杂网络结构图, 首先将因素看作节点, 其中复杂网络节点相连的边代表因素间的有向影响关系, 然后将可达矩阵对应的因素 C_{ij} 中 i 行的元素为 1 对应的因素作为 C_i 有向入边的起点, 最后将绘制的流域氮减排影响因素复杂网络图进行最大度和网络直径的测算, 根据复杂网络的分布特点得出流域氮减排因素间的关系。

3 基于模糊 DEMATEL-ISM 流域氮减排影响因素模型的应用

本文以太湖流域为例, 目前太湖流域的氮减排

工作现状不乐观。根据太湖流域水利部管理局统计数据, 整个流域的水体营养状态为中度富营养, 大概 24.0% 水域为轻度富营养, 76.0% 水域为中度富营养, 其中氮减排指标中总氮浓度有所上升, 氨氮浓度持平但仍然维持在一个较高的水平。由于流域有着跨区域、多部门管理和污染把控难等特点, 整个流域的氮减排将受到来自政府、企业、社会和技术等各方面因素的影响。

3.1 关键影响因素的确定

3.1.1 综合影响矩阵的计算 文章挑选了 7 名在流域氮减排过程有丰富经验的专家, 在分析太湖流域氨氮污染排放情况之后, 进行问卷打分。首先将专家们对流域氮减排影响因素之间的评分进行三角模糊数的转化以及去模糊化, 获得影响流域氮减排 27 个因素的直接影响矩阵 A 需要标准化后接着运用公式(1)、(2)取得该系统的综合影响矩阵 T , 该综合影响矩阵可以反映出流域氮减排各因素之间直接与潜在的关系。

3.1.2 中心度和原因度的计算 根据上述流域氮减排各影响因素的综合影响矩阵, 用公式(3)、(4)得到各因素的被影响度 e_j 、影响度 f_i 、原因度 n_i 和中心度 m_i , 同时以中心度为准则对各因素重要程度排序得到流域氮减排关键影响因素, 最后根据原因度的正负划分各因素的属性, 分为结果和原因。流域氮减排各因素模糊 DEMATEL 法计算结果见表 2。

表 2 流域氮减排各因素模糊 DEMATEL 法计算结果

流域氮减排影响因素	被影响度 e_j	影响度 f_i	原因度 n_i	中心度 m_i	中心度排序	因素属性
单位GDP工业氮排放强度 C_{11}	5.01	5.63	0.11	10.12	17	原因因素
高氮排量产品的生产比例 C_{12}	4.99	5.25	-0.31	9.66	22	结果因素
农业源企业氮排放强度 C_{13}	4.38	4.88	1.31	10.07	18	原因因素
农田氮肥使用强度 C_{14}	4.59	5.73	0.16	9.34	23	原因因素
单位氮减排成本 C_{15}	5.47	5.13	0.16	11.10	1	原因因素
氮排放标准限值 C_{16}	5.17	5.49	0.08	10.42	14	原因因素
氮排放有偿使用费 C_{21}	5.95	4.97	-1.07	10.84	4	结果因素
排污权交易价格 C_{22}	5.23	4.94	0.50	10.96	3	原因因素
环保投入占GDP的比重 C_{23}	5.40	5.08	-0.27	10.54	12	结果因素
氮减排奖励补贴标准 C_{24}	5.31	4.81	0.17	10.80	7	原因因素
政府监督成本 C_{25}	5.62	5.20	-0.65	10.58	11	结果因素
税收返还比例 C_{26}	5.71	4.60	-0.78	10.65	10	结果因素
企业偷排的惩罚系数 C_{27}	5.37	5.47	-0.30	10.45	13	结果因素
社会舆论成本 C_{28}	5.15	5.12	-0.34	9.96	19	结果因素
氮排放税率 C_{29}	5.62	4.73	-0.42	10.83	5	结果因素
生活污水处理率 C_{31}	5.33	4.96	-0.74	9.93	20	结果因素
清洁生产技术能力 C_{32}	5.54	5.44	-0.07	11.02	2	结果因素

续表 2

流域氮减排影响因素	被影响度 e_j	影响度 f_i	原因度 n_i	中心度 m_i	中心度排序	因素属性
减排技术创新成本 C_{33}	5.67	5.28	-0.55	10.80	8	结果因素
清洁能源的购买成本 C_{34}	5.58	4.36	-0.85	10.32	16	结果因素
人均GDP C_{41}	4.70	4.11	0.26	9.66	21	原因因素
公众对氮减排的支持率 C_{42}	5.37	4.76	0.06	10.81	6	原因因素
高氮能源使用强度 C_{43}	5.37	4.99	-0.09	10.65	9	结果因素
湿地建设面积 C_{44}	3.04	4.90	1.32	7.40	26	原因因素
水土流失面积 C_{45}	2.59	5.63	1.52	6.69	27	原因因素
流域第三产业占比 C_{46}	4.28	5.25	0.48	9.04	25	原因因素
城市化密度 C_{47}	5.36	4.88	-0.37	10.34	15	结果因素
人均能源耗量 C_{48}	4.23	5.73	0.67	9.12	24	原因因素

1)原因度分析。根据表 2 得出, C_{11} 、 C_{13} 、 C_{14} 、 C_{15} 、 C_{16} 、 C_{22} 、 C_{24} 、 C_{41} 、 C_{42} 、 C_{44} 、 C_{45} 、 C_{46} 和 C_{48} 均为原因因素。首先 C_{41} 、 C_{44} 、 C_{45} 、 C_{46} 和 C_{48} 这 5 个因素的原因度都相对较大, 但被影响度、中心度较小, 说明这些因素不容易受到其他影响因素作用, 主要通过自身来影响整个系统; 其中 C_{11} 、 C_{14} 、 C_{15} 、 C_{16} 、 C_{22} 、 C_{42} 这 6 个因素的原因度较小, 但是影响度都较大, 表明这些因素对其他因素有较强的影响力, 特别是 C_{15} 起着关键作用, 与较多因素都有密切联系, 流域氮减排过程中应该时刻关注这一因素; 最后 C_{24} 和 C_{13} 的原因度不大, 被影响度较大, 说明同时也容易受其他因素的影响。

除此之外, C_{12} 、 C_{21} 、 C_{23} 、 C_{25} 、 C_{26} 、 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 、 C_{31} 、 C_{32} 、 C_{33} 、 C_{34} 、 C_{43} 和 C_{47} 均为结果因素, 表明这些因素属于容易被其他因素所影响, 因此需要协调好其与其他因素之间的影响关系, 避免其受到各因素之间不稳定的干扰。其中 C_{21} 、 C_{29} 和 C_{32} 这 3 个因素的被影响度和影响度都较大, 在流域氮减排过程中起着较为重要的作用, 在系统中与其他各因素有着紧密的联系。

2)中心度分析。从表 2 的流域氮减排影响因素中心度计算结果看出, C_{15} 、 C_{32} 、 C_{22} 、 C_{21} 、 C_{24} 、 C_{25} 、 C_{26} 、 C_{29} 、 C_{33} 、 C_{42} 和 C_{43} 为中心度排名前 11 的因素, 说明这些因素在系统中为重要因素。其中 C_{15} 、 C_{32} 、 C_{22} 、 C_{21} 和 C_{29} 这 5 个因素的影响度和被影响度均为较高水平, 其在流域氮减排工作中发挥着至关重要的作用; 同时 C_{11} 、 C_{14} 等因素的影响度排名都较高, 但是由于中心度均处于很低的水平, 因此仍然将其列为不太重要的因素。

3)影响因素四分图的构建。文章以流域氮减排影响因素的中心度和原因度分别作为横、纵坐标, 制成影响因素四分图见图 2。其中横坐标轴以

上的因素划分为原因因素, 横坐标轴以下的因素划分为结果因素。

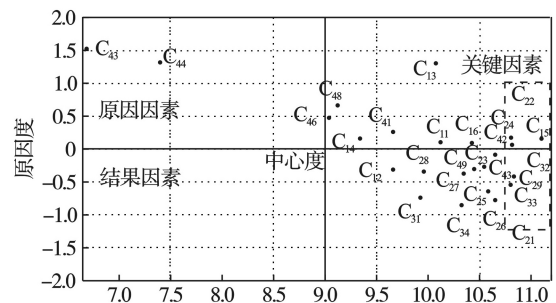


图 2 流域氮减排影响因素四分图

图 2 可见, 中心度越大表明该因素在流域氮减排过程中影响越大, 因此, 将中心度排名前 8 的因素列为关键因素: C_{15} 、 C_{32} 、 C_{22} 、 C_{21} 、 C_{29} 、 C_{42} 、 C_{24} 和 C_{33} , 图 2 中以虚线框包含的因素表示为关键因素。

根据四分图看出: 流域氮减排因素中的关键因素包括结果因素和原因因素, 部分关键因素原因度较大, 因此在流域氮减排过程中, C_{15} 、 C_{22} 等原因因素是流域氮减排工作中的重要缘起因素, 与很多结果因素有着相当密切联系, 容易受到其他关键结果因素的影响, 同时许多结果因素, 如 C_{21} 、 C_{29} 等相互影响是加剧太湖流域氮污染问题发生的重要原因。

流域氮减排影响因素的位置大部分位于图中的一、四象限, 说明这些因素相互影响进而影响整个系统, 同时具备较高的有效性。同时中心度较小且位于第二象限的因素属于影响较弱的表层因素。

3.2 影响因素的递阶层级划分

3.2.1 衰减度 λ 的确定 经上述模糊 DEMATEL 法计算出影响流域氮减排各因素的综合影响矩阵 T 后, 本研究针对 λ 为 0.205、0.215、0.225 为 0.235 分别对应的流域氮减排影响因素的可达矩阵, 其中可达矩阵 K 中对应某一因素所在行 k_i 和所在列 k_j 元素之和视为该因素的节点度, 因此, 取得流域氮减排影

响因素在不同阈值下的各因素节点度散点见图3。

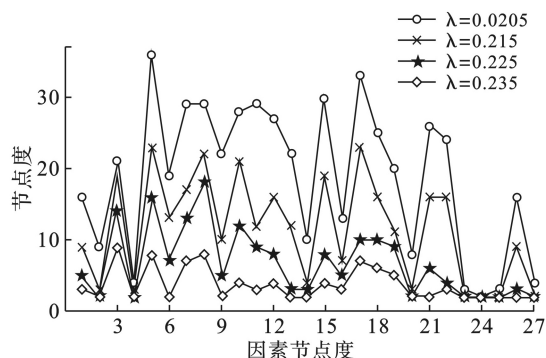


图3 不同阈值 λ 下流域氮减排因素的节点度散点图

由于阈值取值不同对应的可达矩阵也不同, 计算得出各流域氮减排影响因素的节点度也是不同, 27个因素节点度散点变化图也有所差别, 一般按照2条规则挑选合适的阈值: 首先在某一阈值 λ 下的因素节点度大小偏差不大同时相互影响关系与流域氮减排工作情况相符合; 然后再对比节点度较大的流域氮减排因素与模糊 DEMATEL 法计算得出的关键因素是否相同。

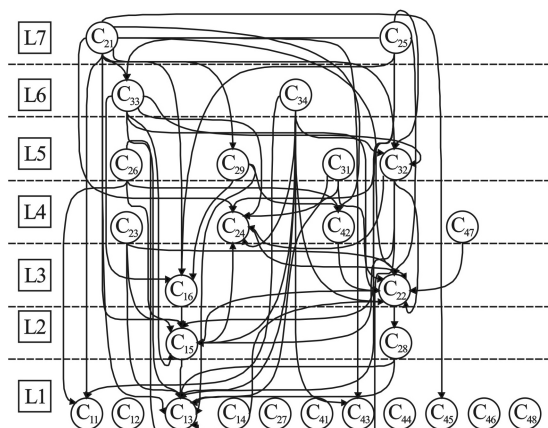
图3可见, 阈值 λ 为0.225时, 曲线各峰值点对应的因素与上述模糊 DEMATEL 确定的流域氮减排关键影响因素所一致, 并且各因素的节点度适中, 同时符合流域氮减排的情况。

3.2.2 系统层次结构的确定 由上述确定的 $\lambda=0.12$, 根据公式(5)计算得到流域氮减排影响因素的可达矩阵 K , 其中1代表2个因素之间存在较强的影响关系, 0代表两个因素的影响关系不明显。然后对可达矩阵进行分析求出各因素对应的先行集 S_i 和可达集 R_i , 经过数据处理将流域氮减排影响因素的层次结构共划分为7层。

27个流域氮减排影响因素层次划分结构如下:
 $L1=\{C11、C12、C13、C14、C27、C41、C43、C44、C45、C46、C48\}$;
 $L2=\{C15、C28\}$;
 $L3=\{C16、C22\}$;
 $L4=\{C23、C24、C42、C47\}$;
 $L5=\{C26、C29、C31、C32\}$;
 $L6=\{C33、C34\}$;
 $L7=\{C21、C25\}$ 。

流域氮减排影响因素系统层次结构的构建将按照各因素的影响传递层级划分, 各因素按照各自的层级由下往上排列, 根据可达矩阵的元素值, 即流域氮减排的影响因素间的可达关系, 最后通过影响因素之间的有向弧构建系统的递阶结构模型, 见图4。

将影响流域氮减排的27个因素根据上述改进的ISM进行分层, 图4中所有因素共分为7层, 从上往下层级递减。根据图4得到以下结论。



注: L, 层级; C, 二级指标

图4 流域氮减排的影响因素递阶结构图

1) C_{11} 、 C_{12} 等因素大部分位于系统层次结构底层 L1, 是流域氮减排的直接影响因素; 而 C_{21} 、 C_{25} 等因素多处于递阶结构上层, 是流域氮减排的间接影响因素。

2) 流域氮减排关键影响因素大部分分布于较高层次, 个别位于 L2 和 L3。层级较高的因素多为较重要的结果因素, 如 C_{21} 、 C_{33} 分别位于 L7、L6, 同时向下对许多低层次的因素有复杂的影响关系, 说明在流域氮减排工作中要首先对这些因素进行把控, 切断其对较低层次因素的影响。 C_{15} 、 C_{22} 作为关键因素但分别位于较低层次 L2、L3, 从图4可见, C_{15} 和 C_{22} 与较多因素之间存在紧密联系, 特别是受到多个较高层次因素的影响进而对整个系统产生影响, 因此, 需要控制好这2个因素以及与高层次因素的传递影响。

3) 流域氮减排表层 L1 因素中的 C_{11} 、 C_{13} 和 C_{14} 这3个因素都是直接导致流域氮污染越来越严重的因素, 也是氮排放的主要来源。图4看出, C_{11} 和 C_{13} 作为表层因素与较多层次因素有关系, 受到各方面的影响最多, 因此需要分析其他因素的传递途径以及与表层因素的关系。倘若其他因素控制不佳容易迅速相互传递, 通过对较低层级的 C_{11} 和 C_{13} 采取控制是避免流域氮污染恶化的关键。

4) 较高层次 L5、L6 和 L7 的因素均来自与政府层面和技术层面, 并且包含了大部分的关键影响因素。政府在流域氮减排工作中扮演着重要的角色, 不仅需要对流域氮排放设置合理的有偿使用费和排放权交易价格, 还要控制好氮减排的奖励补贴和排放税率等。同时, 技术层面的 C_{32} 和 C_{33} 等因素都是提高流域氮减排工作效率的关键所在, 不管是企业还是农民群体都需要重视。只有首先将高层次的因素把控好, 同时专注中间层的关键影响因

素的变化,才能更好地解决流域氮污染问题。

3.3 影响因素的复杂网络结构讨论分析

将上述流域氮减排的 27 个影响因素根据可达矩阵得出的相互影响关系以复杂网络图的形式表示出来,由此得流域氮减排影响因素复杂网络图见图 5。网络图中各节点的连入度和连出度的和为该节点的度,以图中节点的右边数字表示,当某一节点的度越大时,该节点的面积越大同时颜色变深,说明该节点对应的流域氮减排因素越重要。

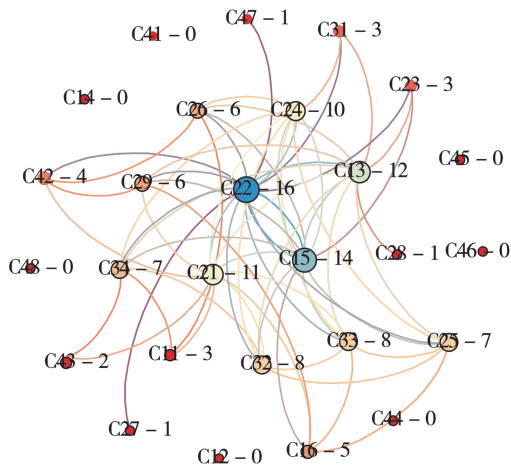


图 5 流域氮减排影响因素复杂网络图

图 5 得出以下两点结论。

1) 图 5 中所显示的关键因素与前两节所确定的相同,由于关键因素的度较大,流域氮减排影响因素中的关键因素都集中在圆心位置,相反不太重要的因素都在外圈围绕。其中各关键因素间存在交错复杂的关系,联系紧密又互相影响,如 C_{15} 、 C_{22} 的节点面积较大且位于关键位置,表明了其在系统中的重要性,但 C_{13} 不属于中心度确定的关键因素,却处于系统的关键位置,说明了其与许多关键因素存在影响关系不可忽视。

2) 对复杂网络图进行 matlab 测算,得出各节点中的最大度为 16,表明这些关键因素一旦改变会很大程度影响较多其他因素,进而导致流域氮污染的严重,因此,部分关键原因因素需要及时把控。其中该系统的平均路径为 1.21,网络直径为 3,说明了流域氮减排因素系统为影响较强的小型复杂网络结构,各因素很快能够相互传递影响从而降低流域氮减排工作的效率。

4 结论与建议

4.1 研究结论

氮减排是现阶段流域的环境治理工作所面临

的关键,由于流域涉及面广以及各方面关系复杂,氮减排将同时受到众多因素的影响,因此,根据识别出的关键因素进行优先控制将成为流域氮减排的核心问题。本文在对流域氮减排的情况进行调研考察,在此基础上建立了流域氮减排的影响因素体系,通过模糊 DEMATEL-ISM 法对各因素进行梳理得到关键影响因素,并对各因素的递阶层次结构进行分析,最终得出以下 3 点结论。

1) 模糊 DEMATEL 与 ISM 的结合用来分析影响流域氮减排的各种因素之间的关系,并将文中的因素分为 13 个原因因素和 14 个结果因素,通过各因素的因果分析得出 C_{15} 起着关键作用, C_{21} 、 C_{29} 和 C_{32} 这 3 个因素的被影响度和影响度都较大,均与较多因素都有密切联系。同时根据中心度计算以及四分图分析,得出流域氮减排的关键因素为 8 个,这些关键因素应该紧密联系并及时监测、及时识别,及时有效地进行再调查防止氮污染进一步恶化。

2) 为方便研究流域氮减排各影响因素之间的复杂传递层级关系,将 27 个影响因素共分为 7 层。其中大部分原因因素属于流域氮减排表层因素,而高层次的结果因素之间相互影响是流域氮污染严重的关键,得出高层次中的氮排放有偿使用费 C_{21} 等因素应作为流域氮减排中优先考虑的因素,同时对较低层级的农业源企业氮排放强度 C_{13} 采取控制是避免流域氮污染恶化的重要措施。研究发现较高层次的因素均来自于政府层面和技术层面,并且包含了大部分的关键影响因素,表层因素主要来自企业和社会层面。

3) 构建了流域氮减排影响因素间影响的复杂网络图,研究表关键因素均位于整个系统的中心位置,其中特别是 C_{13} 也处于较核心的位置,同时该系统的复杂网络最大度较大以及平均路径短,因此各关键因素相互影响,传递迅速容易导致流域氮污染进一步的恶化。

4.2 政策建议

1) 提倡清洁生产技术,降低氮减排成本。现阶段的流域氮污染很大程度是因为农业源企业的高排放生产以及农田氮肥的过度使用,需要鼓励更多的企业和农民选择绿色清洁生产技术以及相应的减排技术,尽可能地从根源上降低农业源氮排放的强度;同时政府在减排技术层面要加大支持力度,氮减排成本与其他因素联系紧密,需要重点把控,

促使企业在低成本条件下选择氮减排。

2) 制度合理的排污控制措施。目前我国针对流域氮排放的有偿使用和交易的相关法规仍未完全普及, 相关政府应尽早完善相关氮排放权交易和有偿使用的规章制度, 建立合理合法的市场交易和审核机制, 为企业实现氮减排提供更好的保障, 同时政府需要进行宏观调控和采取激励措施来保证市场的合理、规范和公平。

3) 完善氮减排税收政策。政府首先要根据流域各行业的特点制定相应的氮排放税率, 保证其合理性和有效执行, 同时要加大税收政策的创新力度, 引入氮排放税收返还制度以及其他税收优惠政策, 针对性地制定各行业的税收返还比例和优惠细则以激励企业的氮减排工作。

4) 提高氮减排补贴标准和加大监督力度。政府应该不断提高对各企业采取清洁生产技术、氮减排处理设备的购买以及减排技术创新成本支持等的补贴标准, 同时对补贴资金进行严格的审批和验收, 确保补贴的正确使用和减排效果, 政府可组织专家进行评估各项目的氮减排情况再制定合理的补贴标准; 为鼓励企业积极参与到流域氮减排行动中, 需要政府和社会公众的有效监督和相应的处罚措施, 民众对于流域氮减排的支持和对企业偷排的举报是对整个环境污染治理起着至关重要的作用。

参考文献

- [1] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. *水资源保护*, 2010, 26(3): 87-90.
- [2] 徐长春, 郑戈, 林友华. 国家重点研发计划“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”专项解析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(6): 657-662.
- [3] WILLIAMS A, POURKASHANIAN M, JONES J M, et al. Review of NO_x formation and reduction mechanisms in combustion systems, with particular reference to coal[J]. *Journal of the Institute of Energy*, 1997, 70(484): 102-113.
- [4] 孙雅丽, 郑骥, 姜冰. 燃煤电厂烟气氮氧化物排放控制技术发展现状[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(S1): 174-179.
- [5] 陈峻崎, 贾剑波, 朱建刚. 基于环境基准的太湖氨氮最大容量研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 89-94.
- [6] LIN J Y, CAO B, CUI S H, et al. Evaluating the effectiveness of urban energy conservation and GHG mitigation measures: The case of Xiamen city, China[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 5123-5132.
- [7] 张淑丽. 水污染物排污权交易的规则与方式[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
- [8] 刘钢, 王慧敏, 仇蕾, 等. 湖域工业初始排污权纳什议价模型研究—以江苏省太湖流域纺织行业为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(10): 78-85.
- [9] 刘钢, 王慧敏, 仇蕾. 湖域工业初始排污权合作配置体系构建—以太湖流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(10): 1223-1229.
- [10] 董圆媛, 张涛, 顾进伟, 等. 太湖流域水污染物总量减排绩效评估体系建立[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(5): 22-26.
- [11] 唐玉兰, 董旭, 李晶晶, 等. 辽河流域水污染物总量减排实施效率研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4): 168-173.
- [12] 赵永宏, 邓祥征, 吴锋, 等. 乌梁素海流域氮磷减排与区域经济发展的均衡分析[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(1): 110-117.
- [13] 王凤鹭, 杜慧玲, 李晶, 等. 农业面源氮氮污染减排体系的构建及减排控制对策—以黑龙江省松花江流域为例[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(4): 77-79.
- [14] KONG H, LIN H, PENG B R, et al. Modelling the cost-effective solutions of nitrogen reduction in Jiulong River Watershed, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166: 218-229.
- [15] CHEN N W, WU J Z, ZHOU X P, et al. Riverine N_2O production, emissions and export from a region dominated by agriculture in Southeast Asia (Jiulong River)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 208: 37-47.
- [16] YAN Y Y, GUAN Q S, WANG M, et al. Assessment of nitrogen reduction by constructed wetland based on InVEST: A case study of the Jiulong River Watershed, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 349-356.
- [17] 陈艳卿. 中国废水排放氨氮控制标准评述[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(3): 21-23.
- [18] 黄少薇, 张骥骧. 氮氧化物减排博弈行为研究[J]. *环境保护科学*, 2017, 43(4): 55-61.
- [19] 郭新帅, 缪柏其, 方世建. 排污管制中的授权监督与合谋[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(4): 24-29.
- [20] LIN R-J. Using fuzzy DEMATEL to evaluate the green supply chain management practices[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 40: 32-39.
- [21] KESKIN G A. Using integrated fuzzy DEMATEL and fuzzy C: Means algorithm for supplier evaluation and selection[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(12): 3586-3602.
- [22] LI R J. Fuzzy method in group decision making[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1999, 38(1): 91-101.
- [23] OPRICOVIC S, TZENG G-H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(2): 44-455.