

DOI: 10.5846/stxb201412312621

张亦涛, 王洪媛, 刘申, 刘宏斌, 翟丽梅, 雷秋良, 任天志. 氮肥农学效应与环境效应国际研究发展态势. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Zhang Y T, Wang H Y, Liu S, Liu H B, Zhai L M, Lei Q L, Ren T Z. A bibliometrical analysis of status and trends of international researches on the agronomic and environmental effects of nitrogen application to farmland. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

氮肥农学效应与环境效应国际研究发展态势

张亦涛¹, 王洪媛¹, 刘申¹, 刘宏斌¹, 翟丽梅¹, 雷秋良^{1,*}, 任天志²

¹ 农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

² 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191

摘要: 分析国内外农田氮素农学效应和环境效应研究的发展动态、研究热点, 为以后研究农田氮素效应提供参考。基于 ISI Web of Science 数据库, 检索出以“农田氮肥施用”为主题的所有 SCI 论文 (1957—2014 年 8 月), 并分别提取出与“农学效应”、“环境效应”、“适宜施氮量”相关的文献, 采用计量学方法, 分析各研究方向的主要热点、研究机构、发文期刊和高被引论文等。共检索出关于农田施氮研究的 SCI 文献 7460 篇, 其中与“农学效应”研究相关的文献 2773 篇, 主要涉及到施氮肥对小麦、玉米、水稻、大豆等作物产量、氮素利用率和土壤有机碳的影响; 与“环境效应”研究相关的文献 1609 篇, 主要涉及到氮肥施用对氨挥发、硝化反硝化、温室气体排放、硝酸盐淋失、地下水水质等环境因素的影响; 与“适宜施氮量”研究相关的文献 408 篇, 主要涉及到氮肥施用量、氮肥管理等。刊发各类研究成果最多的机构主要来自欧美发达国家, 影响力大的期刊与高被引论文也主要来自欧美国家, 中国在该领域的研究发展迅速, 以中国科学院、中国农业大学、南京农业大学和中国农业科学院等为代表的中国研究机构的研究水平逐渐进入世界前列。文献计量学可用于分析农田氮素效应主题的研究热点和发展态势, 目前氮素农学效应仍是研究的重点, 随着当前环境污染问题日益突出, 农田氮素环境效应研究越来越多, 特别是氮流失对水体水质的影响备受关注, 而基于氮素综合效应确定农田适宜施氮量是同时保障粮食安全和环境安全的有效措施。中国在相关研究领域的研究起步较晚, 高影响力论文偏少, 优秀国际期刊不足, 但研究实力不断增加, 研究成果也逐渐被国际社会所认可。

关键词: 农田施氮; Web of Science; 农学效应; 环境效应; 适宜施氮量

A bibliometrical analysis of status and trends of international researches on the agronomic and environmental effects of nitrogen application to farmland

ZHANG Yitao¹, WANG Hongyuan¹, LIU Shen¹, LIU Hongbin¹, ZHAI Limei¹, LEI Qiuliang^{1,*}, REN Tianzhi²

¹ Ministry of Agriculture Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

² Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

Abstract: The primary topics and trends in the development of research on the agronomic and environmental effects of nitrogen application, both in China and abroad, were analyzed to provide references and highlight opportunities for future research in the field of farmland nitrogen application. The Institute for Scientific Information (ISI) Web of Science database was used to retrieve Scientific Citation Indexed (SCI) papers published (1957—2014) on the topic of “nitrogen fertilizer application,” and literature relevant to “agronomic effects,” “environmental effects,” and “appropriate nitrogen application” was extracted. The bibliometric method was used to analyze the main focus, research institutions, publishing journals, and citation indices of the publications in each research branch. A total of 7,460 SCI articles on farmland nitrogen research were published during this period. Of these, 2,773 were related to “agronomic effects,” which mainly included the

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003014)

收稿日期: 2014-12-31; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leiqiuliang@caas.cn

effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, soil organic carbon, and yields of wheat, corn, rice, and soybeans, as well as other crops. There were 1,609 articles related to “environmental effects,” which mainly included the effects of nitrogen application on ammonia volatilization, nitrification and denitrification, greenhouse gas emissions, nitrate leaching, groundwater quality, and other environmental topics. There were 408 articles were related to “appropriate nitrogen application,” which mainly covered the aspects of quantity of nitrogen fertilizer application and field nitrogen management. Most of the publications were by researchers affiliated to institutions in developed countries in Europe and North America; most of the publications in mainstream journals and the most highly cited publications were also by researchers based in developed European and American countries. However, research on farmland nitrogen application has developed rapidly in China, and some institutions, including the Chinese Academy of Sciences, China Agricultural University, Nanjing Agricultural University, and the Chinese Academy of Agricultural Sciences, have gradually become global leaders in this area. The bibliometric method can be used to analyze the primary topics and developmental trends in research on nitrogen application. Currently, investigation of the agronomic effects of nitrogen application is the main focus of research on nitrogen. Research on the environmental effects of nitrogen, especially the impacts of nitrogen loss on water quality, is receiving increasing attention, because of serious water quality problems around the world. Tremendous research opportunities lie in development of appropriate nitrogen management practices that could simultaneously guarantee food security and environmental quality. China has only recently entered this field of research, with few highly cited articles in well-recognized international journals by Chinese researchers, but the research capacity of Chinese institutions has been growing and their research achievements have increasingly been recognized by the international community.

Key Words: nitrogen fertilizer application; Web of Science; agronomic effects; environmental effects; appropriate nitrogen application

自从氮肥合成工艺问世以后,氮肥为提高作物产量做出了突出贡献,其对发达国家粮食增产的贡献达到40%以上^[1],对发展中国家粮食增产贡献率高达55%^[2]。但随着化学氮肥施用量的急剧增加,氮损失风险加重,农田过量施氮及施氮后的损失造成了氮污染排放负荷持续增长^[3],由此造成的水体富营养化和地下水硝酸盐超标直接威胁人类饮水安全。

施用氮肥是现代农业的一项标志性措施,其对谷类作物产量的提高使全球70亿人口得以存活^[4],然而由于当前还无法准确预测作物生长所需氮量,加之氮肥利用率较低^[5],全球大多数作物种植体系的氮盈余量都很大^[6],高产作物体系往往伴随着大量的水溶性或气态氮损失^[7],是造成当前诸多环境问题的重要原因^[8-9]。农田氮流失受多种因素的影响,因此不同农田条件下的氮素管理策略可能存在差异^[10],但基于高产、高效和环保的目的,通过分析不同施氮量的产量效果和环境效应^[11],均可以确定兼顾作物高产和环境友好的合理施氮量^[12]。目前氮素管理与环境质量及人类健康的关系受到了广泛关注,相关研究发展迅速,科技文献发表数量持续增长,基于文献事实的文献计量学,能从多方面多角度揭示学科研究现状与热点问题,评价研究机构科研实力,有助于科研工作者把握学科整体布局、发展方向和学科优势。文献计量学是对文献进行定量分析研究的科学,被广泛应用在全球生物多样性^[13]、气候变化^[14]、水资源利用^[15]、硝酸盐去除^[16]等领域,用于分析各种主题的科研成果和研究趋势。SCI (Science Citation Index) 是美国科学情报研究所 ISI (Institute for Scientific Information) 出版的期刊文献检索工具,收录了全世界最重要和最有影响力的研究成果,是自然科学领域公认最为重要的评价工具,ISI Web of Science 数据库整合了 SCI、SSCI (Social Sciences Citation Index)、A&HCI (Art & Humanities Citation Index) 三大引文索引,收录了全球8700多种各学科领域的领先期刊,覆盖面最广,可用于分析文章作者、研究机构、主要期刊及其他主要信息等^[17]。

虽然世界各国均十分重视农田氮肥施用问题,相关的SCI论文发表数量也增长迅速,但涉及内容庞杂,目前尚无针对氮肥施用效应发展态势的系统总结分析,本文基于ISI Web of Science数据库,拟采用文献计量分

析的方法,针对氮素农学效应、环境效应以及适宜施氮量的确定等主要研究方向,进行了系统的定量分析。通过系统分析国内外农田氮素效应主要研究方向的发展态势,揭示各研究方向发展趋势、研究热点、优势研究机构、高引用率论文等,以期为农业科技工作者和农业管理部门选择研究方向以及确定适宜施氮量提供参考。

1 材料与方法

以 ISI Web of Science 数据库的全部期刊为检索对象,限定发表时间为 1957 年至 2014 年 8 月,首先对“农田中氮肥施用”主题的 SCI 论文进行检索、数据清理、文献分类和主题分析,检索策略:(TOPIC: ((Farmland or field or agriculture or farming) and ("nitrogen fertiliz * " or "N fertiliz * " or "fertiliz * nitrogen" or "fertiliz * N"))),在 SCI 数据库中,共检索出全部论文 7460 篇,其中 Article 论文 6882 篇,Review 论文 196 篇。然后从 7460 篇论文的关键词中分别提取出与“农学效应”、“环境效应”、“适宜施氮量”相关的文献,其中与“农学效应”研究相关的文献主要涉及到氮肥对小麦、玉米、水稻、大豆等作物产量、氮素利用率和土壤有机碳的影响。与“环境效应”研究相关的文献主要涉及到氮肥施用对氨挥发、硝化反硝化、温室气体排放、硝酸盐淋失、地下水水质等环境因素的影响。与“适宜施氮量”研究相关的文献主要涉及氮肥施用量、氮肥管理等关键词。

对检索出的各研究方向的相关文献利用 Excel 统计相关数据信息,采用发文数量和被引频次对农田氮素效应研究的机构、出版期刊等进行研究分析,利用高频关键词和相关关系图对研究热点进行研究分析,统计时均以第一作者、第一研究机构为标准。利用汤森路透公司研发的 TDA (Thomson Data Analyzer) 软件,将各主题下的关键词与全部关键词进行相关分析组成相互关系系数矩阵,并据此绘制相互关系图,相关关系图揭示了各关键词之间关联性的紧密程度,图中点的大小表示包含这一关键词的文献量多少,点之间线的粗细表示两个关键词之间的相关程度,线越粗相关程度越紧密。

2 结果

2.1 农学效应研究

2.1.1 研究热点

检索出涉及氮肥施用农学效应研究的文献 2773 篇,主要涉及氮肥对小麦、玉米、水稻、大豆等作物产量、氮素利用率和土壤有机碳的影响,这一研究方向上的高频关键词主要包括与作物类型相关的 Wheat、Maize、Rice、Winter wheat、Zea mays、Triticum aestivum、Crop 等,与作物产量相关的 Yield、Grain yield、Biomass 等,与氮素养分利用相关 Nitrogen use efficiency、N uptake、N use 等,以及与土壤肥力相关的 Soil fertility、Soil organic carbon 等(表 1)。该研究方向下的高频关键词之间的相关关系图显示(图 1),所有关键词之间的关联程度较分散,说明关于作物农学效应的研究点较多、涉及面较广;这一领域研究的热点主要集中不同种类作物如小麦 (Wheat, *Triticum aestivum*)、玉米 (Corn; Maize)、大麦 (Barley)、大豆 (Soybean) 与氮 (Nitrogen)、磷 (Phosphorus) 等元素的关系,氮肥施用 (Nitrogen fertilization)、耕作 (Tillage) 等管理措施对作物产量 (Yield, Biomass)、水肥利用率 (Nitrogen use efficiency, N uptake) 等方面的影响,以及氮肥施用对土壤肥力 (Soil fertility, Soil organic carbon) 的影响等。此外,这一研究中,¹⁵N 标记的尿素 (Urea) 是常用的研究材料,土壤中氮含量 (Soil N) 对作物氮吸收 (Nitrogen uptake) 有显著性影响,两者存在密切的相关关系。

2.1.2 研究机构

开展农田氮肥施用农学效应研究的机构主要分布在北美、欧洲和亚洲(表 2),发文量前十位的研究机构中来自加拿大的有 1 家,发表了 149 篇文章,远高于其他国家的研究机构,中国科学院发表了 118 篇 SCI 文章,排在全球第二位,美国农业部以 99 篇 SCI 论文发表量居全球第三位;此外,中国农业大学和南京农业大学的发文量也均居全球前十位。关注这一研究领域的国家或者是农田面积大、工农业均发达的国家,如加拿大、美国、澳大利亚等,或者是农田面积大但人均面积小的国家,如中国、印度等,或者是科学研究开展较早,科研

实力较强的欧洲国家如法国、德国等。

表 1 农学效应主题前二十位关键词频词
Table 1 Top 20 word frequency of keywords on the topic of agronomy effect

高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency	高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency
Wheat	241	Soil fertility	81
Yield	241	Corn	80
Maize	171	Biomass	79
Rice	147	N uptake	77
Grain yield	135	Soil organic carbon	77
Nitrogen use efficiency	118	Nitrogen uptake	76
Winter wheat	100	Barley	75
Zea mays	90	N use	74
Triticum aestivum	89	Soybean	72
Crop	85	Soil organic matter	69

表 2 农学效应主题发文量前十位的机构
Table 2 Top 10 affiliations with the most published articles on the topic of agronomy effect

排序 Rank	作者机构 Affiliations	论文量 Number of articles	国家 Country
1	Agr & Agri Food Canada	加拿大农业及农业食品部	加拿大
2	Chinese Acad Sci	中国科学院	中国
3	USDA	美国农业部	美国
4	China Agr Univ	中国农业大学	中国
5	INRA	法国农业科学研究院	法国
6	CSIRO	联邦科学与工业研究组织	澳大利亚
7	Nanjing Agr Univ	南京农业大学	中国
8	Int Rice Res Inst	国际水稻研究所	菲律宾
9	Univ Calif Davis	加州大学戴维斯分校	美国
10	Islamic Azad Univ	伊斯兰阿扎德大学	伊朗
10	Univ Hohenheim	霍恩海姆大学	德国

2.1.3 主要期刊和高被引论文

刊发农田氮肥施用农学效应研究 SCI 论文的期刊主要来自欧美发达国家,均是农田氮素研究活跃、农业研究开展较早的国家,发文量排名前十位的期刊来自荷兰的有 5 份,其中发文量前三名的期刊均来自荷兰,分别是 *FIELD CROPS RESEARCH* (184 篇)、*PLANT AND SOIL* (137 篇) 和 *NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS* (116 篇),其他期刊发文量均在 100 篇以下,主要来自法国、加拿大、美国和德国等(表 3)。

该领域的高被引论文主要是欧美科学家的研究成果(表 4),被引频次最高的论文是德国霍恩海姆大学的 Kuzyakov, Y 于 2000 年在 *SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY* 杂志上发表的论文 Review of mechanisms and quantification of priming effects,文中讨论了农田土壤中 C、N 循环机制及影响因素,其中涉及了碳氮等元素的利用,该论文发表后被引用了 611 次。该研究领域,被引频次排在前十位的论文没有来自中国的科研成果,说明中国在这一领域的研究并不突出,还有待提高。

2.2 环境效应研究

2.2.1 研究热点

检索出涉及氮肥施用环境效应研究的文献 1609 篇,主要涉及到氮肥施用对氨挥发、硝化反硝化、温室气

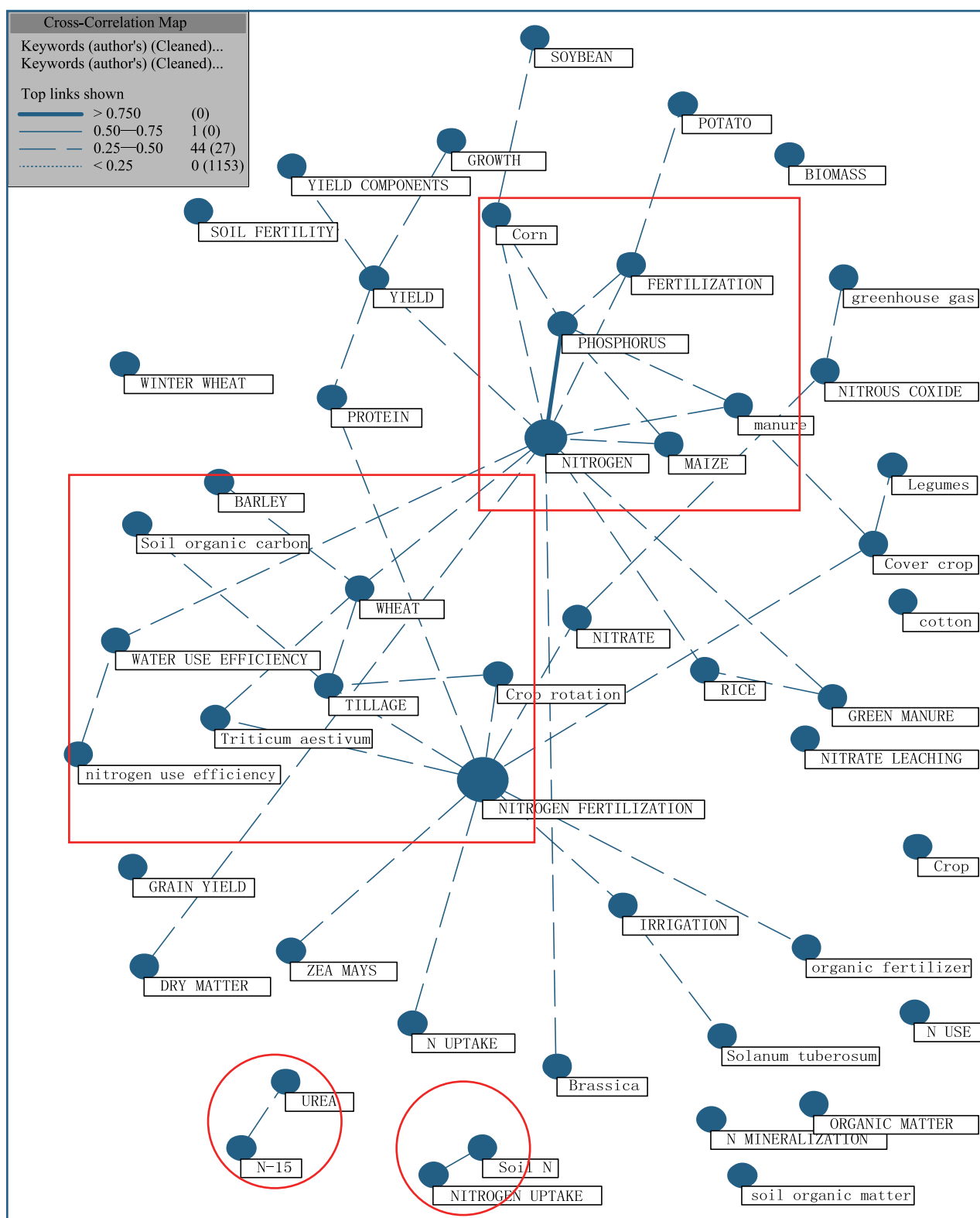


图1 农学效应主题相关关系图

Fig.1 Affinity diagram on the topic of agronomy effect

体排放、硝酸盐淋失、地下水水质等环境因素的影响,这一研究方向上的高频关键词主要包括与含氮化合物相关的 Nitrous oxide、Nitrate、Ammonia、Ammonium、 N_2O 、Nitric oxide 等,与大气或水环境相关的 Denitrification、Greenhouse gas、Nitrate leaching、Leaching、Environment、Water quality、Emission factor 等(表5)。该主题高频关

表 3 农学效应主题发文量前十位的期刊

Table 3 Top 10 journals of published articles on the topic of agronomy effect

排序 Rank	期刊名称 Journal name	发文量 Number of articles	2013 影响因子 Impact factor in 2013	国家 Country
1	<i>FIELD CROPS RESEARCH</i>	184	2.608	荷兰
2	<i>PLANT AND SOIL</i>	137	3.235	荷兰
3	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i>	116	1.733	荷兰
4	<i>EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY</i>	96	2.918	法国
5	<i>CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE</i>	79	0.921	加拿大
6	<i>AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT</i>	74	3.203	荷兰
7	<i>CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE</i>	71	1.000	加拿大
8	<i>JOURNAL OF PLANT NUTRITION</i>	67	0.536	美国
9	<i>BIOLOGY AND FERTILITY OF SOILS</i>	62	3.396	德国
10	<i>SOIL & TILLAGE RESEARCH</i>	57	2.575	荷兰

表 4 农学效应研究排名前十位热点论文

Table 4 Top 10 published articles of citation rates on the topic of agronomy effect

排名 Rank	第一作者 The first author	来源 Source	被引频次 Citation rates	国家 Country
1	Kuzyakov, Y	<i>SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY</i> .2000,32;1485.	611	德国
2	Bouwman, AF	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i> .1996,46(1);53.	364	荷兰
3	Vickery, J A	<i>JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY</i> .2001,38(3);647.	300	英国
4	Peoples, MB	<i>PLANT AND SOIL</i> .1995,174;3.	272	澳大利亚
5	Dumas, Y	<i>JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE</i> .2003,83(5);369.	262	法国
6	Foster, BL	<i>ECOLOGY</i> .1998,79(8);2593.	225	美国
7	Justes, E	<i>ANNALS OF BOTANY</i> .1994,74(4);397.	220	法国
8	Chantigny, MH	<i>GEODERMA</i> .2003,113;357.	198	加拿大
9	Cassman, KG	<i>FIELD CROPS RESEARCH</i> .1998,56;7.	192	菲律宾
10	Lawlor, DW	<i>JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY</i> .2002,53(370);773.	182	英国

表 5 环境效应主题前二十位关键词频次

Table 5 Top 20 word frequency of keywords on the topic of environment effect

高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency	高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency
Nitrous coxide	235	Nitrification	70
Nitrate	171	Methane	68
Denitrification	116	Groundwater	63
Greenhouse gas	114	Nitrification inhibitor	57
Nitrate leaching	111	Carbon dioxide	54
Ammonia	108	Water quality	50
Ammonium	101	Crop residues	47
N ₂ O	96	Carbon	44
Leaching	94	Emission factor	44
Environment	87	Nitric oxide	44

关键词之间的相关关系图显示(图 2),各关键词分布相对分散,说明氮肥的环境效应的概念涵盖范围广,所涉及到的研究方向较多;氧化亚氮(Nitrous coxide)、甲烷(Methane)、二氧化碳(Carbon dioxide)等温室气体(Greenhouse gas)的排放(Emission)及其排放影响因子(Emission factors),以及氨挥发(Ammonia, Ammonium)均是当前重要的研究内容,此外,硝酸盐(Nitrate)及其排水(Drainage)、淋溶(Leaching)对水体(Groundwater)、水质(Water quality)均有显著影响,采用相关缓解(Mitigation)措施如硝化抑制剂(Nitrification inhibitor)抑制

硝化反应,可以减少温室气体排放及硝酸盐的淋失。同时,尿素(Urea)也是氮肥环境效应研究中的主要材料,¹⁵N 标记技术也是常用的技术手段,硝化(Nitrification)与反硝化(Denitrification)是两个关联密切的过程,涉及到氮转化的多种形态,也是当前研究的热点。

2.2.2 研究机构

当前开展农田氮肥施用环境效应研究的机构很多,发表 SCI 论文最多的机构主要分布在北美和亚洲,欧洲国家对这一研究领域也十分关注(表 6),其中中国科学院在该领域发表了 159 篇 SCI 文章,远远高于其他各国各研究机构,中国农业大学、南京农业大学和中国农业科学院在该领域的发文量也均居全球前十位,这说明中国已经意识到农田氮肥过量施用导致了严重的环境问题,并正在为解决这一问题积极努力。美国、加拿大两国也都非常重视氮素环境效应,美国农业部在该领域发表了 75 篇 SCI 论文,排名全球第二位,加拿大农业及农业食品部发表了 68 篇,排在全球第三位。此外,日本、荷兰、法国等农业技术先进的国家都有很多关于氮素环境效应的研究成果。

表 6 环境效应主题发文量前十位的机构

Table 6 Top 10 affiliations with the most published articles on the topic of environment effect				
排序 Rank	作者机构 Affiliations		论文量 Number of articles	国家 Country
1	Chinese Acad Sci	中国科学院	159	中国
2	USDA	美国农业部	75	美国
3	Agr & Agri Food Canada	加拿大农业及农业食品部	68	加拿大
4	China Agr Univ	中国农业大学	55	中国
5	Natl Inst Agroenvironm Sci	国家农业环境技术研究所	38	日本
6	Nanjing Agr Univ	南京农业大学	34	中国
7	INRA	法国农业科学研究院	30	法国
8	Chinese Acad Agr Sci	中国农业科学院	25	中国
9	Michigan State Univ	密歇根州立大学	24	美国
9	Univ Wageningen & Res Ctr	瓦赫宁根大学	24	荷兰

2.2.3 主要期刊和高被引论文

刊发农田氮肥施用环境效应研究 SCI 论文的期刊主要来自欧美发达国家,均是较早开展农田氮素研究、工农业发达的国家,发文量排名前十位的期刊来自欧洲的有 8 份,其中荷兰 4 份,英国 3 份,德国 1 份,其他两份分别来自日本和加拿大。发文量排名前三名的期刊均来自荷兰,分别是 *NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS* (122 篇)、*AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT*(109 篇)和 *PLANT AND SOIL* (95 篇),其他期刊发文量均在 55 篇以下(表 7)。

表 7 环境效应主题发文量前十位的期刊

Table 7 Top 10 journals of published articles on the topic of environment effect				
排序 Rank	期刊名称 Journal name	发文量 Number of articles	2013 影响因子 Impact factor in 2013	国家 Country
1	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i>	122	1.733	荷兰
2	<i>AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT</i>	109	3.203	荷兰
3	<i>PLANT AND SOIL</i>	95	3.235	荷兰
4	<i>BIOLOGY AND FERTILITY OF SOILS</i>	55	3.396	德国
5	<i>SOIL USE AND MANAGEMENT</i>	42	1.968	英国
6	<i>SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY</i>	40	4.410	英国
7	<i>ATMOSPHERIC ENVIRONMENT</i>	38	3.062	英国
8	<i>AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT</i>	37	2.333	荷兰
9	<i>SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION</i>	35	0.753	日本
10	<i>CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE</i>	33	0.921	加拿大

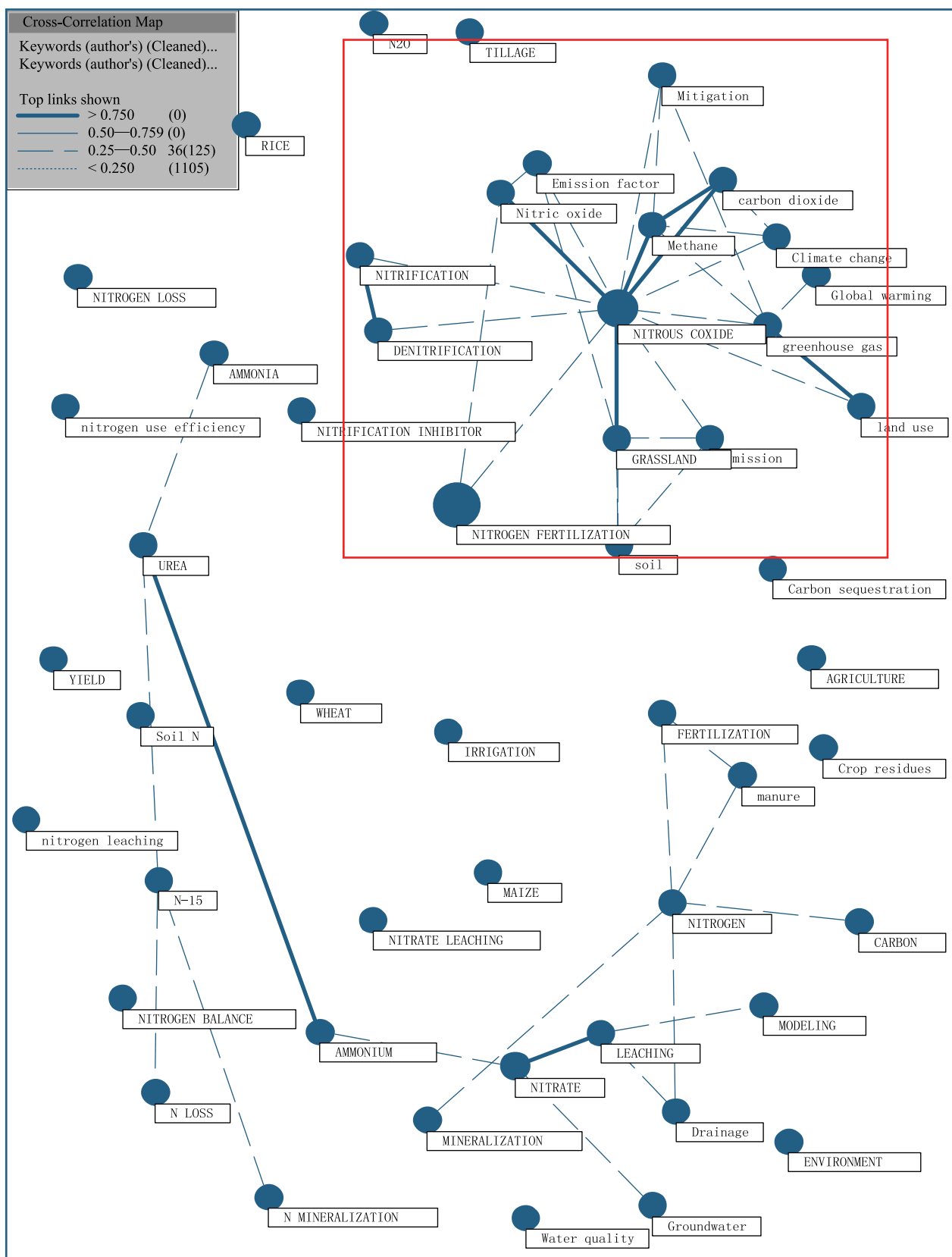


图2 环境效应主题相关关系图

Fig.2 Affinity diagram on the topic of environment effect

该领域的高被引论文除了欧美科学家的研究成果外,中国科研工作者的研究成果也得到国际认可(表

8)。其中,被引频次最高的论文是德国霍恩海姆大学的 Kuzyakov, Y 于 2000 年发表在 *SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY* 上的论文 Review of mechanisms and quantification of priming effects,文中主要讨论了农田土壤中 C、N 循环机制及影响因素,目前被引用被引频次为 611。该研究领域,被引频次排在前十位的论文有两篇来自中国的科研成果,作者分别是中国农业大学的巨晓棠教授和中国科学院南京土壤研究所的朱兆良院士,表明中国在这一领域的研究已经有了一定基础,并受到了科学界的关注。

表 8 环境效应主题排名前十位热点论文
Table 8 Top 10 published articles of citation rates on the topic of environment effect

排名 Rank	第一作者 The first author	来源 Source	被引频次 Citation rates	国家 Country
1	Kuzyakov, Y	<i>SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY</i> .2000,32(41955):1485.	611	德国
2	Wrage, N	<i>SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY</i> .2001,33(41986):1723.	488	荷兰
3	Bouwman, AF	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i> .1996,46(1):53.	364	荷兰
4	Ju, XT	<i>PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA</i> .2009,106(9):3041.	275	中国
5	Treseder, KK	<i>NEW PHYTOLOGIST</i> .2004,164(2):347.	251	美国
6	Zhu, ZL	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i> . 2002, 63 (41673):117.	234	中国
7	Foster, BL	<i>ECOLOGY</i> .1998,79(8):2593.	225	美国
8	Valiela, I	<i>ECOLOGICAL APPLICATIONS</i> .1997,7(2):358.	220	美国
8	Justes, E	<i>ANNALS OF BOTANY</i> .1994,74(4):397.	220	法国
10	Adler, PR	<i>ECOLOGICAL APPLICATIONS</i> .2007,17(3):675.	207	美国

2.3 适宜施氮量研究

2.3.1 研究热点

检索出涉及农田适宜施氮量研究的文献 408 篇,主要涉及氮肥施用量、施氮量、施氮水平、氮肥管理等,这一研究方向上的高频关键词主要包括氮(Nitrogen, N)的施用(Application)、管理(Management)、施用时间(Application time)、施用位置(Fertilizer placement)等(表 9)。该研究高频关键词之间的相关关系图显示(图 3),各关键词分布相对分散,说明确定农田适宜施氮量的研究方法较多;基于产量(Yield)、环境(Environment)、氮损失(N loss)、硝酸盐淋失(Nitrate leaching)、空间变异性(Spatial Variability)以及位点特异性(Site-specific)等均可进行氮(Nitrogen)管理(Nitrogen management)、推荐施肥(Fertilizer recommendation)。此外,土壤 N(Soil N)、氮损失(N Loss)、肥料利用(Fertilizer use)、环境(Environment)之间的相互关系较密切,玉米(Zea mays)、氮利用率(Nitrogen use efficiency)、收获产量(Grain yield)、叶绿素(Chlorophy II)之间关联紧密,基于这些关系确定适宜施氮量仍是当前的研究热点。

表 9 适宜施氮量主题前二十位关键词频词
Table 9 Top 10 affiliations with the most published articles on the topic of appropriate nitrogen application rate

高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency	高频关键词 High frequency keywords	词频 Word frequency
Nitrogen management	48	Nitrogen levels	11
Nitrogen application	29	Best management practice	10
Nitrogen rate	24	Total nitrogen	10
N application	20	Nitrogen Fertilizer Rate	9
N	14	Nitrogen fertilizer use	9
N rate	14	Application time	8
Fertilizer Application	11	Fertilizer rate	8
Fertilizer management	11	Fertilizer recommendation	8
Fertilizer placement	11	Fertilizer use	7
N management	11		

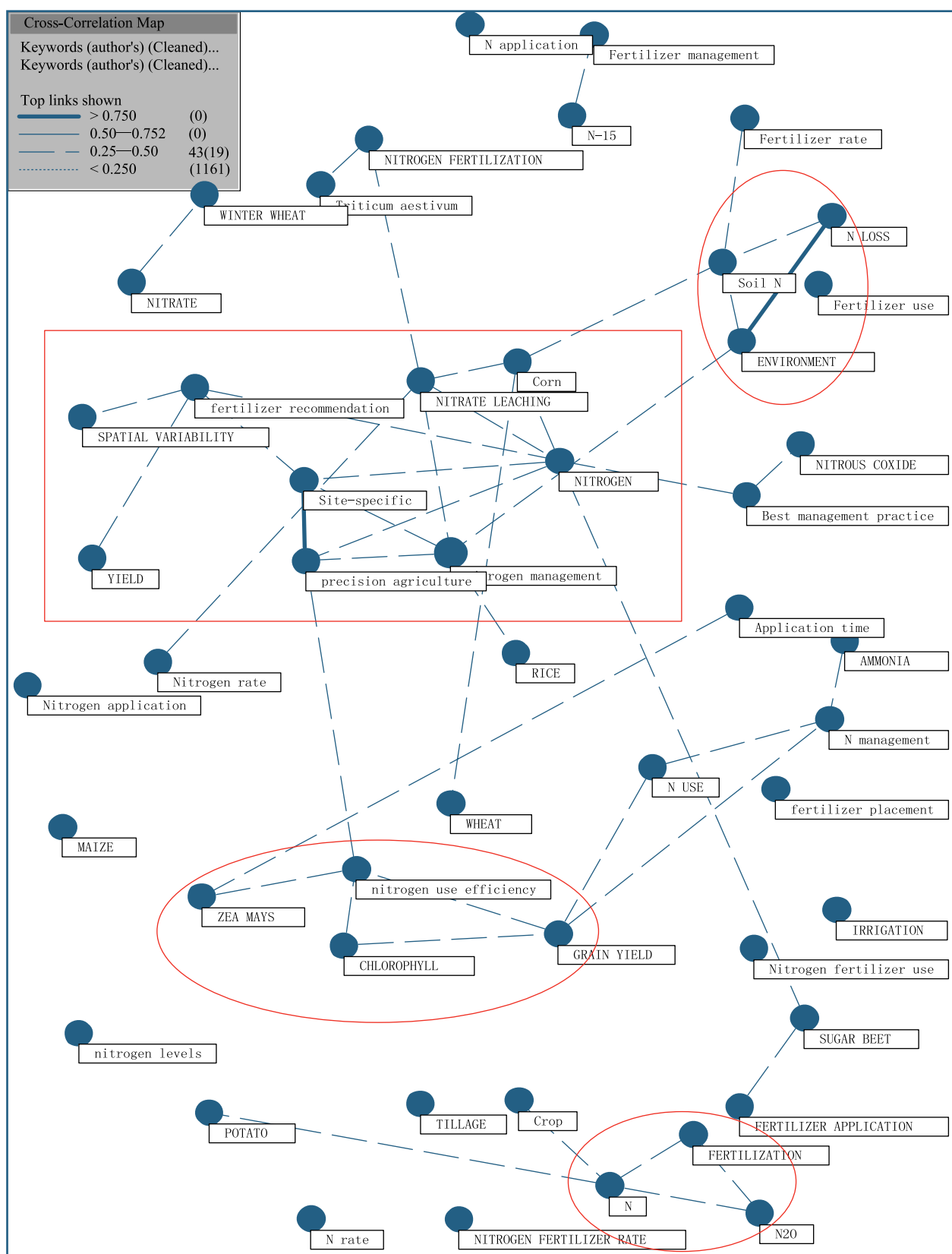


图3 适宜施氮量主题相关关系图

Fig.3 Affinity diagram on the topic of appropriate nitrogen application rate

2.3.2 研究机构

当前开展农田适宜施氮量研究的机构很多,发表 SCI 论文最多的机构主要分布在北美和亚洲,发文量排名全球前十位的研究机构中有 4 家来自中国,4 家来自美国,2 家来自加拿大,但各个研究机构的发文量均较少,都在 30 篇以下,这说明虽然关注这一研究领域的机构很多,但并未把适宜施氮量研究作为重点(表 10)。中国科学院在该领域发表了 30 篇 SCI 文章,略高于其他研究机构,中国农业大学、中国农业科学院和南京农业大学在该领域的发文量也均居全球前十位。中国面对农田氮肥过量施用和环境污染日益严重的现状,意识到确定农田适宜施氮量是平衡产量安全和环境恶化之间矛盾的有效手段。美国、加拿大农田面积大、农业生产技术先进,在其农业发展过程中也曾面对中国当前所面临的问题,其研究机构也都十分关注如何确定兼顾粮食和环境安全的农田适宜施氮量。

表 10 适宜施氮量主题发文量前十位的机构

Table 10 Top 10 affiliations with the most published articles on the topic of appropriate nitrogen application rate

排序 Rank	作者机构 Affiliations	论文量 Number of articles	国家 Country
1	Chinese Acad Sci	中国科学院	30 中国
2	Agr & Agri Food Canada	加拿大农业及农业食品部	28 加拿大
3	China Agr Univ	中国农业大学	22 中国
4	USDA	美国农业部	18 美国
5	Univ Florida	佛罗里达大学	12 美国
6	Michigan State Univ	密歇根州立大学	10 美国
7	Chinese Acad Agr Sci	中国农业科学院	8 中国
8	Univ Saskatchewan	萨斯喀彻温大学	8 加拿大
9	Nanjing Agr Univ	南京农业大学	7 中国
10	Oklahoma State Univ	俄克拉荷马州立大学	7 美国

2.3.3 主要期刊和高被引论文

刊发农田适宜施氮量研究 SCI 论文的期刊主要来自欧美农业生产技术较发达的国家(表 11),来自中国期刊的 *PEDOSPHERE* 也刊发了 16 篇此类论文,发文量排在全球第 5 位;发文量最多的是来自荷兰的 *FIELD CROPS RESEARCH*,刊发了 32 篇此类文章。此外,发文量排名前九位的期刊来自荷兰的 4 份,加拿大 2 份,中国、法国、美国各 1 份。

表 11 适宜施氮量主题发文量前九位的期刊

Table 11 Top 9 journals of published articles on the topic of appropriate nitrogen application rate

排序 Rank	期刊名称 Journal name	发文量 Number of articles	2013 影响因子 Impact factor in 2013	国家 Country
1	<i>FIELD CROPS RESEARCH</i>	32	2.608	荷兰
2	<i>CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE</i>	19	1.000	加拿大
3	<i>CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE</i>	18	0.921	加拿大
4	<i>NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS</i>	17	1.733	荷兰
5	<i>PEDOSPHERE</i>	16	1.379	中国
6	<i>EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY</i>	12	2.918	法国
7	<i>COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS</i>	11	0.423	美国
8	<i>ACTA SCIENTIARUM POLONORUM-HORTORUM CULTUS</i>	9	0.522	波兰
9	<i>AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT</i>	9	3.203	荷兰

该领域的高被引论文主要来自欧美科学家的研究成果,亚洲科学家在该领域的成果也受到较多关注(表12),被引频次最高的论文是德国霍恩海姆大学的 Justes, E. et al.于1994年在 *ANNALS OF BOTANY* 杂志上发表的论文 *Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter-wheat crops*,文中讨论了临界氮稀释曲线的研究方法,为确定适宜施氮量提供了一种研究思路,该论文已被引用了220次。该研究领域,被引频次排在前十位的论文有一篇来自中国的科研成果,作者是中国科学院南京土壤研究所的褚海燕研究员,该文关注了平衡施肥对土壤微生物的重要性,被引用了91次,这说明中国在这一领域的研究成果正在被国际认可。

表12 适宜施氮量主题排名前十位热点论文

Table 12 Top 10 published articles of citation rates on the topic of appropriate nitrogen application rate				
排名 Rank	第一作者 The first author	来源 Source	被引频次 Citation rates	国家 Country
1	Justes, E	<i>ANNALS OF BOTANY</i> . 1994.74(4):397.	220	法国
2	Cassman, KG	<i>FIELD CROPS RESEARCH</i> . 1998.56(41641):7.	192	美国
3	Snyder, CS	<i>AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT</i> . 2009.133(41702):247.	161	加拿大
4	Stone, ML	<i>TRANSACTIONS OF THE ASAE</i> . 1996.39(5):1623.	149	美国
5	Peng, S	<i>FIELD CROPS RESEARCH</i> . 1996.47(41673):243.	148	菲律宾
6	Chu, H Y	<i>SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY</i> . 2007.39(11):2971.	91	中国
7	Olf, HW	<i>JOURNAL OF PLANT NUTRITION AND SOIL SCIENCE</i> . 2005.168(4):414.	69	德国
7	Brentrup, F	<i>EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY</i> . 2004.20(3):265.	69	德国
9	Raun, WR	<i>COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS</i> . 2005.36:2759.	67	美国
10	Schroder, J	<i>BIORESOURCE TECHNOLOGY</i> . 2005.96(2):253.	61	荷兰

3 讨论

3.1 研究热点

文献计量分析显示,氮素农学效应研究的发文量最多,氮肥施用对作物生长、粮食产量、氮肥利用率、土壤肥力等因素的影响一直是氮素效应研究的重点。20世纪60年代以来,亚洲和欧洲的粮食产量分别增加了280%和65%,然而人口也从300万增长到640万^[18-19],粮食产量之所以增加,作为决定作物产量形成的最重要营养元素——氮的施用起到了决定性作用^[20]。当前世界人口正以每12年增长10亿的速度快速扩张,预计2050年,全球人口总数将达90亿,如何满足人类粮食需求仍是全球面临的重大难题^[3],因此,氮素施用的农学效应尤其是对作物产量的增产潜力仍是未来关注的重点。然而作物产量的形成受多方面因素的影响,区域^[21]、时间^[22]、作物品种^[23]、施用方法^[24]、氮素类型^[25]等都会不同程度的影响氮素效应。随着农业生物技术的发展,尤其是遗传育种科技的进步,加之全球气候变化的大趋势,作物新品种、气候变化条件下的氮素农学效应也应当受到重视^[26-27]。

氮肥施用还带来了严重的环境风险,因为农田施用的氮肥并不能全部被作物吸收,特别是在施氮过量的农田上,氮损失极其严重^[28-29]。损失的氮一部分在土壤中积累,一部分以氨、氧化亚氮、一氧化氮等含氮化合物的形式排放进入大气,一部分随降雨或灌溉以径流、淋溶或壤中流的形式进入地表水或地下水,显著影响了氮素在陆地、大气以及水生生态系统的循环^[30]。由于农民习惯于按作物茬口施肥,农田土壤中积累的氮素并不能被后茬作物全部利用,氮素持续累积导致土壤质量下降,甚至再次发生气体排放或氮素流失^[31]。施氮导致农田成为一个巨大的氨挥发源^[32],农田氨挥发量占全球氨挥发总量的50%^[33],而具有碱性的氨可以与大气中的硫酸或硝酸分子结合形成硫酸铵和硝酸铵,这都是雾霾中的主要成分^[34],进一步污染空气。由于土壤中反硝化细菌的存在,氮素反硝化活动频繁,施入农田的部分氮素以氧化亚氮的形式排放进入大气,成为全球气候变暖的重要因素^[35]。

综上所述,氮肥施用急需确定一个兼顾粮食安全与环境安全的平衡点,该平衡点的核心就是确定农田适

宜施氮量,这也是从源头控制氮素污染的有效手段。目前,适宜施氮量的确定方法很多,基于满足作物氮素需求的方法,包括利用叶绿素仪法、土壤无机氮实时调控、经验施肥模型等^[36-37];基于最佳产量或经济效益的方法,包括测土配方施肥、产量或经济效益效应曲线等^[36-37];基于环境风险估算的方法,包括氮淋失潜力估算、氮损失估算模型等^[38-40];基于目标标准管理的方法,根据环保法规限定施氮量、施氮时期^[41-42]等。然而,不同于欧美发达国家,我国农田面积虽然大,但单块农田面积较小,并且确定田块适宜施氮量的方法多种多样,在区域内范围缺乏统一的施氮量,为解决这一问题,中国科学院南京土壤研究所的朱兆良院士首先提出了区域平均适宜施氮量的构想和具体方法^[43],其应用结果也显示区域平均适宜施氮量相对于最大产量施氮量减少 20% 以上,相对于农民习惯施氮量减少近 40%,而作物产量和农民收益并未降低,氮肥利用率反而有所提高^[44],这为我国进行区域尺度上的氮肥管理提供了参考。适宜施氮量研究虽然是当前氮肥施用研究的一个重要方向,但被关注程度较低,发文量较少,缺少统一的研究方法。特别是面对农田氮流失造成的水体水质恶化问题,应当进一步探索以水质保护为目标的农田施氮阈值(造成水体污染的临界施氮量)。此外,氮素的吸收、利用、转化、损失均受多种因素的影响,未来的研究应当将农田氮素放到生态系统氮素循环过程中,而不仅仅研究某一方面的氮素效应。

3.2 计量分析

科技论文是科学家智慧的结晶,文献数据库将历年研究成果收录在一起^[45-46],对后世科学家开展科研工作具有重要的指导意义,世界各国相当重视科学研究,科研成果层出不穷,文献数据库不断得到补充,这也导致特定研究领域内的文献数量时刻变化。因此,为保证文献计量结果的相对稳定性,只能选取一个时间段内的文献进行分析^[47],虽然这一方法可能并未涵盖最新的文章,但只要科学合理的设置主题词,计量分析结果对后人了解前人研究成果、总结研究经验、开拓研究方向仍有非常重要的借鉴意义^[48]。

欧美国家的工业化程度高,具有较强的研究基础,不但带动了农业生产的革新,也促进了农业科研的发展,无论是氮肥农学效应、环境效应还是适宜施氮量研究,以美国、加拿大、德国等为代表的发达国家均处在领先地位,无论是高被引论文还是刊发相关研究成果最多的期刊都主要来自欧美国家。中国在相关领域的研究虽然起步晚,但发展迅速,部分中国研究机构的发文量已经进入世界前列,尤其是中国对氮肥环境效应及适宜施氮量的研究相当重视,这主要是因为中国当前正处于快速发展阶段,必须满足国内粮食需求,但吸取了发达国家的教训,绝不走“先污染后治理”的路子,积极创造优美的自然环境。

中国在该研究领域取得了不少研究成果,但仍然存在一些问题:优秀研究团队较少,发文量最多的中国机构主要是国家重点扶持的 985 高校或者中国科学院、中国农业科学院等国家级科研院所;优秀期刊不足,缺少有影响力的国际主流期刊;文献质量不高,被国际认可的成果较少。这主要是因为:政策偏向于重点高校和科研院所,其他机构对人才重视程度不够;中国的研究大多注重模仿,原始创新突破少;急于文章的发表,不注重数据积累,研究可持续性差;追求期刊影响因子,投稿时很少考虑国内优秀期刊;刻意引用国外文献,故意避开国内同行成果。

为解决这些问题,增强整体研究实力,提高论文质量,需要从多方面加以改进。首先,服从于国家发展规划,学习并改进国际先进研究方法,关注与人类生存息息相关的研究方向。其次,我国当前面临着保障粮食安全和环境安全的双重压力,科研工作者应当继续加强该领域相关研究,政府也要增加科研资金投入,建立研究持续资助机制,保证研究延续性,注重人才培养,建立公平的竞争机制。第三,支持国内优秀期刊发展,鼓励将最新研究进展发表在国内优秀英文期刊上,促进产出更多的高水平研究成果。第四,加强国际交流,坚持“走出去请进来”的战略,借鉴发达国家已有经验,引进先进技术并进行本土化改进。第五,完善共享机制,实现大数据共享,提高科技成果转化率,鼓励可持续性农业发展,在提高数据利用率的同时,可以提升国家整体研究实力。

4 结论

基于 Web of Science 数据库,利用文献计量学的方法,可以很好地分析农田氮素效应主要研究方向中的

研究热点。氮肥农学效应主要包括施氮对小麦、玉米、水稻、大豆等作物产量、氮素利用率和土壤有机碳的影响,环境效应主要包括施氮对氨挥发、硝化反硝化、温室气体排放、硝酸盐淋失、地下水水质等因素的影响,而确定农田适宜施氮量是解决粮食安全和环境安全之间矛盾的研究热点。欧美发达国家较早的关注了氮素施用对产量、环境的影响,研究基础好,影响力大的期刊与高被引论文也主要来自欧美国家,中国在相关研究领域研究起步较晚,高影响力论文偏少,被引次数较低,优秀国际期刊不足,但研究实力不断增加,发展非常迅速,研究成果也逐渐被国际社会所认可。中国尤其关注氮素对环境的影响,并进行了较多的适宜施氮量研究,以中国科学院、中国农业大学、南京农业大学和中国农业科学院等为代表的中国研究机构的研究水平逐渐进入世界前列。然而,面对保障粮食安全和环境安全的双重压力,中国应当继续加大资金投入,增强该领域相关研究水平,提高科技成果转化,促进可持续性农业发展。

致谢:感谢中国科学院文献情报中心在文献检索和数据分析过程中给予的支持和帮助,感谢彭皓老师在论文写作和修改过程中提供的建议和指导。

参考文献 (References):

- [1] Malhi S S, Grant C A, Johnston A M, Gill K S. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil and Tillage Research*, 2001, 60(3/4): 101-122.
- [2] Li S X, Wang Z H, Hu T T, Gao Y J, Stewart B A. Nitrogen in dryland soils of china and its management // Sparks D L. *Advances in Agronomy*. San Diego: Elsevier Academic Press Inc., 2009: 123-181.
- [3] Spiertz J H J. Nitrogen, sustainable agriculture and food security: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(1): 43-55.
- [4] Jan Willem Erisman, Mark A Sutton, James Galloway, Zbigniew Klimont, Wilfried Winiwarter. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636-639.
- [5] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China. *Ambio*, 2010, 39(5/6): 376-384.
- [6] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, David M B, Drinkwater L E, Holland E, Johnes P J, Katzenberger J, Martinelli L A, Matson P A, Nziyheba G, Ojima D, Palm C A, Robertson G P, Sanchez P A, Townsend A R, Zhang F S. Nutrient Imbalances in Agricultural Development. *Science*, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [7] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Peter Christie, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [8] Robert W Howarth. An assessment of human influences on fluxes of nitrogen from the terrestrial landscape to the estuaries and continental shelves of the North Atlantic Ocean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 213-223.
- [9] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1996, 59(3): 223-231.
- [10] Haben Asgedom, Ermias Kebeab. Beneficial management practices and mitigation of greenhouse gas emissions in the agriculture of the Canadian Prairie: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(3): 433-451.
- [11] Bruno Basso, Joe T Ritchie, Davide Cammarano, Luigi Sartori. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *European Journal of Agronomy*, 2011, 35(4): 215-222.
- [12] Wang W N, Lu J W, Ren T, Li X K, Su W, Lu M X. Evaluating regional mean optimal nitrogen rates in combination with indigenous nitrogen supply for rice production. *Field Crops Research*, 2012, 137: 37-48.
- [13] Liu X J, Zhang L, Hong S. Global biodiversity research during 1900-2009: a bibliometric analysis. *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20(4): 807-826.
- [14] Li J F, Wang M H, Ho Y S. Trends in research on global climate change: A Science Citation Index Expanded-based analysis. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1/2): 13-20.
- [15] Wang M H, Li J F, Ho Y S. Research articles published in water resources journals: A bibliometric analysis. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 28(1/3): 353-365.
- [16] Huang W L, Zhang B G, Feng C P, Li M, Zhang J. Research trends on nitrate removal: a bibliometric analysis. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 50(1/3): 67-77.
- [17] Julián Monge-Najera, Yuh-Shan S Ho. Costa rica publications in the science citation index expanded: A bibliometric analysis for 1981-2010. *Revista De Biología Tropical*, 2012, 60(4): 1649-1661.
- [18] Jules Pretty. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 447-465.

- [19] Peter Hazell, Stanley Wood. Drivers of change in global agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 495-515.
- [20] Prasad R. Fertilizer urea, food security, health and the environment. *Current Science*, 1998, 75(7): 677-683.
- [21] Hiroe Yoshida, Takeshi Horie, Kou Nakazono, Hiroyuki Ohno, Hiroshi Nakagawa. Simulation of the effects of genotype and N availability on rice growth and yield response to an elevated atmospheric CO₂ concentration. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 433-440.
- [22] Malhi S S, Gill K S, Heier K, Lickacz J. Effects of single versus split annual applications of nitrogen on forage dry matter and protein yield of smooth brome grass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(19-20): 3797-3808.
- [23] Ma B L, Biswas D K, Zhou Q P, Ren C Z. Comparisons among cultivars of wheat, hulled and hullless oats; Effects of N fertilization on growth and yield. *Canadian Journal of Plant Science*, 2012, 92(6): 1213-1222.
- [24] Beres B L, Harker K N, Clayton G W, Bremer E, O'Donovan J T, Blackshaw R E, Smith A M. Influence of N fertilization method on weed growth, grain yield and grain protein concentration in no-till winter wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 2010, 90(5): 637-644.
- [25] M Kaleem Abbasi, Majid Mahmood Tahir, Nasir Rahim. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan. *Geoderma*, 2013, 195-196: 87-93.
- [26] C Nelson Hayes, James A Winsor, Andrew G Stephenson. Environmental variation influences the magnitude of inbreeding depression in *Cucurbita pepo* ssp. *texana* (Cucurbitaceae). *Journal of Evolutionary Biology*, 2005, 18(1): 147-155.
- [27] Virmantas Povilaitis, Sigita Lazauskas, Dalia Feizienė, Arnas Kukujevas, Virginijus Feiza. Maize productivity as influenced by different nitrogen levels and climate change. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2013, 11(2): 803-807.
- [28] Zhou M H, Klaus Butterbach-Bahl. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 977-991.
- [29] Zhang X X, Yin S, Li Y S, Zhuang H L, Li C S, Liu C J. Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 381-388.
- [30] Gabriela R Muñoz, J Mark Powell, Keith A Kelling. Nitrogen budget and soil N dynamics after multiple applications of unlabeled or ¹⁵Nitrogen-enriched dairy manure. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 817-825.
- [31] Mathieu Sebilo, Bernhard Mayer, Bernard Nicolardot, Gilles Pinay, André Mariotti. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [32] Kentaro Hayashi, Yan X Y. Airborne nitrogen load in Japanese and Chinese agroecosystems. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(1): 2-18.
- [33] Sven G Sommer, Jan K Schjoerring, O T Denmead. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Advances in Agronomy*, 2004, 82: 557-622.
- [34] Robert W Pinder, Peter J Adams. Ammonia emission controls as a cost-effective strategy for reducing atmospheric particulate matter in the eastern United States. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(2): 380-386.
- [35] Wan S, Tonya L Ward, Illimar Altosaar. Strategy and tactics of disarming GHG at the source: N₂O reductase crops. *Trends in Biotechnology*, 2012, 30(8): 410-415.
- [36] Hou P, Gao Q, Xie R Z, Li S K, Meng Q F, Ernest A Kirkby, Volker Röhneld, Torsten Müller, Zhang F S, Cui Z L, Chen X P. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China. *Field Crops Research*, 2012, 129: 1-6.
- [37] Xu X P, He P, Qiu S J, Mirasol F Pampolino, Zhao S C, Adrian M Johnston, Zhou W. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China. *Field Crops Research*, 2014, 163: 10-17.
- [38] Huang M X, Liang T, Ou-Yang Z, Wang L Q, Zhang C S, Zhou C H. Leaching losses of nitrate nitrogen and dissolved organic nitrogen from a yearly two crops system, wheat-maize, under monsoon situations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91(1): 77-89.
- [39] Deng J, Zhou Z, Zhu B, Zheng X, Li C, Wang X, Jian Z. Modeling nitrogen loading in a small watershed in southwest China using a DNDC model with hydrological enhancements. *Biogeosciences*, 2011, 8: 2999-3009.
- [40] Aveline A, Rousseau M L, Guichard L, Laurent M, Bockstaller C. Evaluating an environmental indicator: Case study of MERLIN, a method for assessing the risk of nitrate leaching. *Agricultural Systems*, 2009, 100(1/3): 22-30.
- [41] Frank Nevens, Dirk Reheul. Agronomical and environmental evaluation of a long-term experiment with cattle slurry and supplemental inorganic N applications in silage maize. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22(3): 349-361.
- [42] Schröder J J, Neeteson J J. Nutrient management regulations in The Netherlands. *Geoderma*, 2008, 144(3/4): 418-425.
- [43] 朱兆良, 张绍林, 徐银华. 平均适宜施氮量的含义. *土壤*, 1986, (6): 316-317.
- [44] 晏娟. 太湖地区稻麦轮作体系氮肥适宜用量及提高其利用效率的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [45] Tan J, Fu H Z, Ho Y S. A bibliometric analysis of research on proteomics in *Science Citation Index Expanded*. *Scientometrics*, 2014, 98(2): 1473-1490.
- [46] Dragan Ivanović, Yuh-Shan Ho. Independent publications from Serbia in the *Science Citation Index Expanded*: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 2014, 101(1): 603-622.
- [47] Ignacio Cañas-Guerrero, Fernando R Mazarrón, Ana Pou-Merina, Cruz Calleja-Perucho, Gonzalo Díaz-Rubio. Bibliometric analysis of research activity in the "Agronomy" category from the Web of Science, 1997-2011. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 19-28.
- [48] Sun J S, Wang M H, Ho Y S. A historical review and bibliometric analysis of research on estuary pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(1): 13-21.