

畜禽污染防治现状与趋势的文献计量分析

薛念涛

(北京市环境保护科学研究院, 国家环境保护工业废水污染控制工程技术(北京)中心, 北京 100037)

摘要:借助文献计量, 明确了我国畜禽污染防治领域的整体研究现状, 分析了发展趋势。检索 CNKI 中国期刊全文数据库、万方数据与重庆维普数据库, 共 8585 条题录。2000 年以前论文数量增长较慢, 2000 年以后呈急剧增长态势, 从 2000 年的 226 篇增加到 2010 年的 994 篇, 畜禽污染防治的研究已在全国范围内得到关注。该领域作者群体庞大, 涉及作者 13602 名, 核心作者共 648 名。著录发文机构共 5217 家, 发表论文 10 篇及以上的机构 90 家, 它们是本领域的主要研究机构, 中国农业大学发文数量居首位。被引次数排在前 10 名的论文总被引次数为 1429, 前 3 篇论文分别刊登在《农业环境保护》(现为《农业环境科学学报》)与《中国环境科学》上。《农业环境科学学报》领先于其他期刊, 其发文量、影响因子位居首位。关键词分析表明, 鸡粪、牛粪、猪粪是处理处置的重点, 主要利用方式为饲料、肥料、沼气、食用菌种植等。

关键词:文献计量; 畜禽污染; 畜禽粪便; 现状; 趋势

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)03-0429-06 doi:10.11654/jaes.2014.03.004

Status and Trend of Control Over Livestock and Poultry Pollution Based on Bibliometrics

XUE Nian-tao

(State Environmental Protection Engineering(Beijing) Center for Industrial Wastewater Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: In recent years, livestock and poultry industries have boomed in China, causing air, soil, and water pollution and pathogenic diffusion. The status and future trends of China's overall research on livestock and poultry pollution controls were investigated using bibliometrics. A total of 8585 title entries were found in the Chinese Journal Full-Text Database Retrieval (CNKI), WanFang Data, and Chongqing VIP Database. The number of papers increased slowly before 2000. However, it showed quick growth after 2000, from 226 in 2000 to 994 in 2010, indicating that prevention and control of livestock and poultry pollution had been paid much attention in China since 2000. There were 13 602 authors with 648 core authors and 5217 research institutes involved. There was 90 institutions that had published 10 and over papers. China Agricultural University ranked No. 1 in the number of published papers. The top 10 most cited papers were cited 1429 times in total. The top 3 most cited articles were published in *Agro-environmental Protection (Journal of Agro-Environment Science)* and *China Environmental Science*. The paper number and impact factor of *Journal of Agro-Environment Science* ranked at the first place. Keyword analysis showed that chicken manure, cattle dung, and pig manure were the focus, and the major utilization of manures was feed, fertilizer, biogas, mushroom cultivation and so on. The present results would provide useful information on future research on control over livestock and poultry pollution in China.

Keywords: bibliometrics; livestock and poultry pollution; livestock and poultry manure; status; trend

近年来,我国畜禽养殖业迅猛发展,畜禽粪便(含尿)污染已成为农村面源污染的主要来源。2006年,

我国畜禽粪便产生量高达 27.5 亿 t, 折合 COD 总量约为 1 亿 t, 是当时全国污水排放的 COD 总量的 7.3 倍^[1]。由于大部分养殖场未能有效处理和利用畜禽粪便, 导致大量氮磷流失, 造成严重的空气、土壤、水体污染以及重金属迁移和病原菌扩散^[2]。据预测, 2020 年我国畜禽粪便排放量将会比 2007 年增加 37%^[3], 粪便污染状况可能会进一步恶化^[4]。因此, 加强畜禽粪便

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: “水体污染控制与治理” 重大专项 (2012ZX07203-001-01, 2013ZX07504-004)

作者简介: 薛念涛(1969—), 男, 高级工程师, 博士, 从事污水、固废、生物脱臭研究。E-mail: xueniantao@163.com

的污染防治已成为环保工作的紧迫任务和重要内容。

文献计量学是一种有用的工具,可以描绘出一个研究领域的文献状况,已被用于全球许多具体领域的研究^[5-6]。它是指利用图书馆和信息科学的研究方法,采用定量分析和统计数据,对某一给定的主题、领域、机构和国家描述文献的分布格局^[7]。文献计量分析可在某一领域内系统地评估科研结果的相对重要程度,预示该领域近一段时期的发展方向,表征该项研究的地域分布情况^[8]。近年来,畜禽污染防治领域发文量持续增长,但从文献计量角度研究其发展动态的报道较少。本文就此领域的相关文献进行计量分析,以便科研工作者准确掌握该领域的研究现状及前沿动态,有助于了解该领域的整体情况,把握未来的研究方向。

1 材料与方法

本研究的数据来源于三大中文期刊全文数据库:CNKI 中国期刊全文数据库、万方数据与重庆维普。CNKI 期刊全文数据库是目前世界上最大的连续动态更新的中国期刊全文数据库,收录国内 9100 多种重要期刊;万方数据收录国内 6000 多种期刊;重庆维普收录国内 12 000 余种中文期刊,共 3000 余万文献。以篇名/关键词为检索项,以“畜禽污染”、“畜禽粪”、“畜禽粪便”、“畜禽粪尿”、“猪粪”、“牛粪”、“鸡粪”、“鸭粪”、“羊粪”、“兔粪”、“马粪”、“驴粪”、“养殖污染”、“畜牧污染”、“养殖粪”、“畜牧粪”为检索词进行检索,检索范围为全部期刊,时间跨度为 1951—2010 年,检索截止时间 2011 年 11 月 3 日。对检索到的论文题录的计量指标进行分析,统计每位作者、研究机构的发文量,找出引用较多的文献。

2 结果与讨论

2.1 畜禽污染防治论文的年度分布

文献的数量一定程度上反映了该领域的研究水平和发展程度^[9]。共检索到文献题录 2 万多条,逐条整理,去掉重复、不相关题录、简讯、会议报道、一稿多发的文献,还有 8585 条。论文的年度分布见图 1。我国畜禽污染防治的研究大体上可分为三个阶段:

(1)1951—1980 年为利用阶段。当时我国国民经济发展的方针为“以农业为基础,以工业为先导”。为了实现国家工业化,必须优先发展重工业,同时极为重视农业的基础地位。由于底子薄,当时的化肥很少,畜禽粪便非但不是污染物,而是农业生产的宝贵资

源,农民将畜禽粪便收集起来,简单堆置后还田,还可作为饲料、防治病虫害等。畜禽污染防治的第一篇论文发表于 1951,自此到 1980 年的 30 年跨度,共检索到 152 篇论文。

(2)1981—1999 年为污染预防阶段。在此阶段我国畜禽养殖业有所发展,局部地区出现畜禽污染环境现象,但从总体来看,畜禽粪便仍以利用为主。此阶段论文数量缓慢增长,平均每年发表 105 篇。

(3)2000—2010 年为污染治理阶段。在此阶段,化肥施用量增多,不少农民不愿意再施用粪便。加之畜禽养殖业发展迅速,畜禽粪便在许多地区超过了养殖场周围农田环境的消纳能力,成为新的环境污染源^[10]。畜禽粪便治理引起人们的极大重视,论文数量从 2000 年的 226 篇增加到 2010 年的 994 篇,呈急剧增长态势。预计未来几年还会继续增加。由于肉蛋奶类食品数量增长较快以及人们对提高生活水平的迫切需求,畜禽污染防治已成为全国范围内的关注热点。

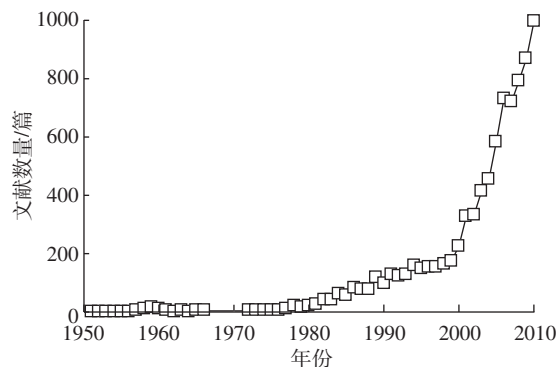


图 1 畜禽污染防治论文的年度分布

Figure 1 Annual distribution of published papers on control of livestock and poultry pollution in China

2.2 主要作者

统计结果表明,畜禽污染防治研究具有一个庞大的作者群体,涉及作者 13 602 名,其中发文 20 篇及以上的作者 6 名,15 篇及以上的有 10 名,10 篇及以上的有 64 名,发文仅 1 篇的作者 10 686 名。篇均作者数为 1.58 名。

一般来说,某领域的主要研究者就是该领域的核心作者。根据普赖斯理论,核心作者中发文量最多作者所发论文量($N_{\max}$)与发文量最少作者所发论文量($N_{\min}$)之间有如下关系^[11]:

$$N_{\min}=0.749 \times (N_{\max})^{1/2}$$

利用上式计算,本领域核心作者最低发文量应为 $N_{\min}=3.8$ 篇,因此可以判定发表 4 篇及以上的作者方

可成为本领域的核心作者。从检索结果可知,核心作者共 648 名,占作者总人数的 4.76%,他们对本领域的发展和进步起重要的作用。

发文量排在前 10 名作者及其论文量如下:李文哲(26)、廖新梯(21)、王岩(21)、吴银宝(20)、常志州(20)、陈同斌(20)、董红敏(18)、韩鲁佳(18)、李凯年(17)、高定(16)。

2.3 主要研究机构

研究和分析文献的作者所在的机构或单位,不仅可揭示我国畜禽污染防治领域的核心研究机构,清晰把握本领域研究队伍的现状及其在该研究领域的活跃程度,而且有助于从侧面了解本领域研究人员的分布情况。按第一作者统计 8585 篇论文,著录发文机构共 5217 家。发文 100 篇及以上的机构 4 家,50 篇及以上的机构 13 家,10 篇及以上的机构 90 家,它们是本领域的主要研究机构。在 90 家研究机构中,高等院校 50 家、科研机构 33 家,其发文量分别为 1843 篇和 746 篇。高等院校不仅所占比例大,而且发文量多,在畜禽污染防治研究方面具有较强的实力。发文量排在前 10 名的机构见表 1,中国农业大学居首位。发表论文仅 1 篇的机构 4307 家,占机构总数的 82.6%。

从地域分布来看,5217 家机构广泛分布于除台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区以外的 23 省、5 个少数民族自治区和 4 个直辖市,但江苏、山东、河南、黑龙江等研究机构相对较多。

2.4 引文分析

被引次数是文献计量学中用来测度学术论文的社会显示度和学术影响力的重要指标。一篇论文被引得越多,说明该论文在同行中引起的反响越大,受同行关注的程度越高,其学术影响力也越大^[12]。被引次数排在前 10 名的论文总被引次数为 1429,见表 2。这

表 1 发表论文量位列前十名的机构			
Table 1 Top 10 institutes in published papers			
序号	机构	发文量/篇	占发文总量的比例/%
1	中国农业大学	162	1.89
2	中国农业科学院	160	1.86
3	西北农林科技大学	114	1.33
4	南京农业大学	110	1.28
5	东北农业大学	103	1.20
6	湖南农业大学	83	0.97
7	浙江大学	79	0.92
8	河南农业大学	74	0.86
9	华南农业大学	74	0.86
10	上海市农业科学院	63	0.73

10 篇论文分布在 8 种期刊上,被引次数最高的前 3 篇论文分别刊登在《农业环境保护》(现为《农业环境科学学报》)与《中国环境科学》上。《农业环境保护》是刊发高被引论文数量最多的期刊,总共 3 篇,说明该期刊发表的文献对本领域的研究已产生重要影响。中国农业大学是产出高被引论文最多的机构,共 3 篇。

2.5 主要期刊

在检索范围内,刊发本领域论文的期刊共 1298 种,每刊平均发文为 6.6 篇。刊发论文量 50 篇以上的期刊共 30 种,共发文 2264 篇,占发文总数的 26.4%。限于篇幅,仅列出被引频次、影响因子较高的 11 种主要期刊。影响因子常用来评估同一研究领域不同期刊的相对重要程度^[13-14],但有时未必尽然。在这 11 种期刊中,《农业环境科学学报》(其前身《农业环境保护》刊发 17 篇论文)刊发论文数量、影响因子居于榜首。而《农业环境科学学报》、《农业工程学报》、《饲料研究》是综合影响力较高的期刊,影响因子排在前三位。

表 2 畜禽污染防治领域被引次数位列前 10 篇的高被引论文						
Table 2 Top 10 most cited papers in prevention and control of livestock and poultry pollution						
序号	题名	作者	作者单位	发表期刊	发表时间	被引次数
1	我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望	李庆康,等	江苏省农业科学院	农业环境保护	2000,(4)	234
2	畜禽粪便对环境的污染及资源化途径	董克虞	北京市农林科学院	农业环境保护	1998,(6)	197
3	中国畜禽粪便产生量估算及环境效应	王方浩,等	中国农业大学	中国环境科学	1998,(6)	161
4	规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究	张树清,等	中国农业科学院	植物营养与肥料学报	2005,(6)	154
5	上海市郊区非点源污染综合调查评价	张大弟,等	上海农学院	上海农业学报	1997,(1)	137
6	长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策	刘培芳,等	华东师范大学	长江流域资源与环境	2002,(5)	135
7	中国农村面源污染的环境影响及其控制对策	张从	中国农业大学	环境科学动态	2001,(4)	117
8	广州市畜禽粪便污染与防治对策	丁疆华	中山大学	环境科学研究	2000,(3)	106
9	Hsp 菌剂在牛粪堆肥中的试验应用	沈根祥,等	上海市农业科学院	农业环境保护	1999,(2)	96
10	猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价	黄国锋,等	华南农业大学	华南农业大学学报	2002,(3)	92

2.6 关键词词频分析

关键词是作者自行选取或者数据库加工者补充的。不同的人选取关键词的原则差别很大,所以关键词的词频分析能在一定程度上说明问题,但离文献内容分析还相差很远,甚至还谈不上内容分析。但对关键词、标题和文摘的分析是内容分析的基础^[16]。关键词统计分析的目的在于寻找科学研究趋势,帮助研究者快速掌握科研动态^[17]。近几年,可进行此项分析的文献计量学方法已经出现^[18],有学者开始利用高频词归纳研究热点^[19]。在 8585 篇文献中,共出现关键词 16 787 个,篇均关键词 6.36 个;关键词出现 54 559 个

次,平均每个关键词出现 3.25 次。关键词平均频次等于关键词频次除以关键词的个数,此值越高,说明词的分布越集中。出现频次排在前 50 位的关键词见表 4。

在畜禽粪便种类中,含有鸡粪的关键词有“鸡粪”、“鸡粪喂猪”、“鸡粪饲料”、“发酵鸡粪”(带引号的名词为精确匹配,不带引号的名词为模糊匹配)等,共出现 1719 次;含有“猪粪”的关键词有“猪粪”、“猪粪尿”、“猪粪便”等,共出现 704 次;含有“牛粪”的关键词有“牛粪”、“奶牛粪便”、“奶牛粪”、“牛粪堆肥”等,共出现 673 次;含有“羊粪”的关键词共出现 154 次;

表 3 刊发畜禽污染防治论文最多的 11 种期刊

Table 3 Top 11 most publication journals for prevention and control of livestock and poultry pollution

序号	期刊名	发文量/篇	占发文总量的比例/%	总被引频次 ^[15]	影响因子 ^[15]	学科影响指标 ^[15]
1	农业环境科学学报	144	1.68	3777	1.424	0.60
2	中国禽业导刊	97	1.13	—	—	—
3	农业环境与发展	96	1.12	483	0.433	0.40
4	农业工程学报	94	1.09	6115	1.327	0.72
5	饲料研究	88	1.02	917	0.436	0.65
6	中国家禽	87	1.01	1150	0.275	0.57
7	农村养殖技术	83	0.97	93	0.025	0.27
8	新农业	82	0.96	119	0.042	0.30
9	农村新技术	80	0.93	72	0.043	0.18
10	养殖技术顾问	79	0.92	—	—	—
11	畜禽业	79	0.92	573	0.148	0.65

表 4 出现频次排在前 50 位的关键词

Table 4 Top 50 most frequent keywords in prevention and control of livestock and poultry pollution

序号	关键词	出现频次	序号	关键词	出现频次	序号	关键词	出现频次
1	畜禽粪便	1206	18	养殖业	170	35	污染治理	103
2	鸡粪	861	19	经济效益	168	36	畜禽粪尿	101
3	牛粪	509	20	有机肥料	162	37	饲料添加剂	101
4	猪粪	414	21	鸡粪喂猪	159	38	废弃物	99
5	环境污染	373	22	鸡粪饲料	148	39	循环经济	98
6	粪便	289	23	对策	140	40	粗蛋白质	97
7	畜牧业	282	24	羊粪	130	41	养殖户	96
8	污染	237	25	营养成分	121	42	蚯蚓	90
9	有机肥	233	26	厌氧发酵	120	43	猪粪尿	89
10	堆肥	232	27	无害化处理	120	44	生态环境	89
11	饲料	232	28	畜禽	120	45	发酵鸡粪	88
12	畜禽养殖业	201	29	沼气	119	46	畜牧业生产	88
13	沼气池	198	30	营养价值	117	47	鲜鸡粪	88
14	畜禽养殖	197	31	可持续发展	115	48	喂猪	87
15	养殖场	179	32	配合饲料	111	49	兔粪	86
16	发酵	179	33	综合利用	107	50	肥料	86
17	畜禽养殖场	172	34	马粪	105			

含有“马粪”的关键词共出现 110 次;含有“兔粪”的关键词共出现 86 次。这说明目前对鸡粪的处置研究最多,其次为猪粪、牛粪等。

在处置方式上,饲料出现 2045 次,鸡粪喂猪出现 159 次,鸡粪饲料出现 148 次,配合饲料出现 140 次,共 2492 次;有机肥出现 589 次,堆肥出现 457 次,有机肥料出现 188 次,共 1234 次;沼气池出现 224 次,沼气出现 653 次,沼气发酵出现 68 次,共 945 次;蘑菇出现 41 次,双孢蘑菇出现 28 次,食用菌出现 32 次,共 101 次。这说明,畜禽粪便的主要利用方式为饲料、肥料、沼气、蘑菇种植等。

(1)用作饲料。畜禽粪便含有大量的营养成分,如粗蛋白质、脂肪、钙、磷、维生素 B12 等,可用作饲料。但这种方式存在很多安全隐患,目前欧美、日本等经济发达国家基本上不主张用粪便作饲料,东欧等国家则主张粪液分离^[20]。

(2)生产肥料。好氧堆肥和厌氧发酵是近年来应用较广泛的两种方法^[21]。畜禽粪便作为农田肥料有其不可替代的优势,但是如果超过耕地的承载量将会对环境造成潜在的影响和压力^[22]。

(3)产生沼气。由于有机废物数量增长较快以及人类对能源的迫切需求,厌氧发酵产沼气已成为全球范围内的研究热点^[23-24]。2009 年中国规模化养殖畜禽粪便沼气生产潜力约为 472.1 亿 m³^[25]。但是,如果没有足够的消纳土地,大量沼液沼渣目前没有好的解决办法。

3 结论

检索了 CNKI 中国期刊全文数据库、万方数据与重庆维普数据库,共得到有效题录 8585 条,采用文献计量学方法进行统计分析。2000 年以前论文数量增长较慢,2000 年以后呈急剧增长态势,从 2000 年的 226 篇增加到 2010 年的 994 篇,畜禽污染防治的研究已在全国范围内得到关注,该领域具有一个庞大的作者群体,涉及作者 13 602 名。《农业环境科学学报》领先于其他学术期刊,发文量、影响因子位居首位。研究机构中,中国农业大学发文量居首位。关键词分析表明,鸡粪、牛粪、猪粪是处理处置的重点,主要利用方式为饲料、肥料、沼气、食用菌种植等。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部.《畜禽养殖业污染防治技术政策(征求意见稿)》编制说明[R]. 2010.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China.
Preparation instruction to pollution control technology policy in live-

- stock and poultry industry(draft)[R]. 2010.
- [2] 朱凤连, 马友华, 周 静, 等. 我国畜禽粪便污染和利用现状分析[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(13):48-50, 12.
ZHU Feng-lian, MA You-hua, ZHOU Jing, et al. Analysis on present situation of pollution and utilization of animal excrement in China[J]. *Auhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(13):48-50, 12.
- [3] Fischer G, Ermolieva T, Ermoliev Y, et al. Livestock production planning under environmental risks and uncertainties[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2006, 15(4):399-418.
- [4] 仇焕广, 廖绍攀, 井 月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7):2766-2774.
QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, et al. Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(7):2766-2774.
- [5] Falagas M E, Karavasiou A I, Bliziotis I A. A bibliometric analysis of global trends of research productivity in tropical medicine[J]. *Acta Tropica*, 2006, 99(2-3):155-159.
- [6] 王利红, 蔡玮玮, 张 笑, 等. 食品废物的研究回顾与展望: 基于 Web of Science 数据库的文献计量分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(8):49-53.
WANG Li-hong, CAI Wei-wei, ZHANG Xiao, et al. A bibliometric analysis of research on food waste based on web of science[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(8):49-53.
- [7] Fu H Z, Wang M H, Ho Y S. Mapping of drinking water research: A bibliometric analysis of research output during 1992—2011[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443:757-765.
- [8] Cimmino M A, Maio T, Ugolini D, et al. Trends in otolaryngology research during the period 1995—2000: A bibliometric approach[J]. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2005, 132(2):295-302.
- [9] 潘月红, 孙国凤, 逮 锐. 基于文献计量学的我国农业立体污染防治研究和发展趋势分析[J]. 湖南农业科学, 2010, 19:142-145.
PAN Yue-hong, SUN Guo-feng, LU Rui. Control method and developmental trend of agricultural tri-dimensional pollution in China based on literature metrology [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010, 19:142-145.
- [10] 董克虞. 畜禽粪便对环境的污染及资源化途径[J]. 农业环境保护, 1998, 17(6):281-283.
DONG Ke-yu. Reclamation and environment pollution of wastes from livestock and poultry[J]. *Agro-environmental Protection*, 1998, 17(6):281-283.
- [11] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京:北京大学出版社, 1993.
DING Xue-dong. Bibliometrics foundation[M]. Beijing:Peking University Press, 1993.
- [12] 金碧辉, 汪寿阳, 任胜利, 等. 论期刊影响因子与论文学术质量的关系[J]. 中国科技期刊研究, 2000, 11(4):202-205.
JIN Bi-hui, WANG Shou-yang, REN Sheng-li, et al. On the relationship between journal impact factor and the academic quality[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2000, 11(4):202-205.
- [13] Lluh J O. Some considerations on the use of the impact factor of scientific journals as a tool to evaluate research in psychology[J]. *Scientia-*

- metrics, 2005, 65(2): 189–197.
- [14] Li J F, Zhang Y H, Wang X S, et al. Bibliometric analysis of atmospheric simulation trends in meteorology and atmospheric science journals [J]. *Croatica Chemica Acta*, 2009, 82(3): 695–705.
- [15] 中国科学技术信息研究所, 万方数据股份有限公司. 2009 年版中国期刊引证报告(扩刊版)[R]. 北京: 科学技术文献出版社, 2009. China Institute of Scientific and Technical Information, Wan Fang Data Co., Ltd. 2009 Edition Chinese journal citation reports(extended published version) [R]: Science and Technology Literature Publishing House, 2009.
- [16] 化柏林. 图书情报学核心期刊论文关键词计量分析研究(下)[J]. 情报科学, 2007, 25(8): 1176–1179.
HUA Bo-lin. Keywords statistical analysis of papers from core journal on library and informatics(II) [J]. *Information Science*, 2007, 25(8): 1176–1179.
- [17] Xie S D, Zhang J, Ho Y S. Assessment of world aerosol research trends by bibliometric analysis[J]. *Scientometrics*, 2008, 77(1): 113–130.
- [18] Chiu W T, Ho Y S. Bibliometric analysis of tsunami research[J]. *Scientometrics*, 2007, 73(1): 3–17.
- [19] Ho Y S. Bibliometric analysis of adsorption technology in environmental science[J]. *Journal of Environmental Protection Science*, 2007, 1(1): 1–11.
- [20] 国 辉, 袁红莉, 耿 兵, 等. 牛粪便资源化利用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 68–75.
GUO Hui, YUAN Hong-li, GENG Bing, et al. Research progress in resource utilization of cattle manure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(5): 68–75.
- [21] 张 颖, 夏训峰, 李中和, 等. 规模化养牛场粪便处理生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1423–1427.
ZHANG Ying, XIA Xun-feng, LI Zhong-he, et al. Life cycle assessment of manure treatment in scaled cattle farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1423–1427.
- [22] 李 帷, 李艳霞, 张丰松, 等. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2350–2357.
LI Wei, LI Yan-xia, ZHANG Feng-song, et al. The spatial and temporal distribution features of animal production in three northeast provinces and the impacts of manure nutrients on the local environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2350–2357.
- [23] Mata A J, Macé S, Llabrés P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74(1): 3–16.
- [24] Wilkinson K G. A comparison of the drivers influencing adoption of on-farm anaerobic digestion in Germany and Australia[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(5): 1613–1622.
- [25] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 230–234.
TIAN Yi-shui. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 230–234.