

# 畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合趋势研究

## —基于浙江 1978–2012 年的时序数据

姚文捷 赵连阁

(浙江工商大学 经济学院, 杭州 310018)

**【摘要】**基于 1978–2012 年的时间序列数据, 对浙江畜禽养殖环境承载力状况进行评价; 进而借鉴系统科学的理论, 建立畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合模型, 分析并预测“零方案”状态下至 2050 年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合演化趋势。研究发现, 浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合在“零方案”状态下, 直至 2050 年都将处于拮抗期。经预测, 2036 年为浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合倒“U”型演化趋势的唯一拐点, 相应的动态耦合度为 124.0117。

**【关键词】** 畜禽养殖业; 环境负荷; 经济增长; 动态耦合; 浙江

**【中图分类号】** F307.3

**【文章编号】** 1007-4333(2014)06-0242-13

**【文献标志码】** A

畜禽养殖污染是农业面源污染的主要来源。1978 年以来, 国内畜禽养殖生产开始逐步走向商品化、专业化和社会化, 随着养殖方式由传统的农户分散养殖逐渐向规模化、集约化养殖发生转变, 相应的污染形式也由点源污染向面源污染迅速扩散。特别是“公司+农户”的产业化模式越来越多地被采用, 使得畜禽养殖污染在许多地区呈现出大点源污染和区域面源污染并存的特征。改革开放以来, 浙江畜禽养殖业在实现数量持续增长、整体发展水平不断提高的同时, 由于现代集约养殖方式与传统分散养殖方式并存, 对农业生态环境产生了巨大的压力。从整体上看, 当前浙江畜禽养殖业发展已实现了较高程度的规模化养殖, 但没有同种植业发展结合起来, 农牧脱节, 加之部分地区畜禽养殖场养殖密度过高、养殖总量过大、治污设施不配套, 大量的粪便和有机废水难以得到有效处理和利用, 导致环境急剧恶化。虽然传统人畜混居的农户分散养殖方式已呈现出不断萎缩的趋势, 但在养殖密度较高的地区(如嘉兴市)却仍然大量存在。传统的养殖方式不能及时对畜禽废弃物实施完全的资源化再利用, 因而造成了严重的环境污染, 因此, 探索“零方案”状态下浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长二者演化的动态耦合趋势, 进一步预测可供养殖业经济持续发展的环境承载能力的变化, 对浙江在未来几十年继续深化畜禽养殖污染防治、确保养殖业健康稳定发展, 具有十分重要的现实意义。

虽然目前在国内文献中对有关畜禽养殖及其环境污染的问题已有所关注, 但仅局限于畜禽养殖对环境造成污染的现状、原因以及相应的解决措施等方面的一些定性描述<sup>①③</sup>, 以及有关畜禽养殖污染的时空差异性分析<sup>④</sup>。这主要是因为国内现有的农业环境监测基本集中在农药污染、污水灌溉、重点流域污染、乡镇企业污染等方面, 缺乏对畜禽养殖环境的常规性监测, 未能形成

---

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 教育部高校博士点基金(20123326110004); 教育部人文社科基金资助项目(13YJA90160); 国家自然科学基金资助项目(71373238); 浙江省科技计划项目(软科学)(2013C25056); 浙江省社会科学界联合会研究课题(2014N183)

第一作者: 姚文捷, 讲师, 博士研究生, 主要从事区域经济学研究, E-mail: rantom\_821024@163.com

通讯作者: 赵连阁, 教授, 博士生导师, 主要从事农业经济管理研究, E-mail: hhyz1g@163.com

相关数据定期公报制度，因而在有关统计年鉴中出现基础数据空白的现象，较大程度地影响了国内对畜禽养殖环境问题的认知和关注。

目前已有的相关文献大多采取静态耦合的方式进行描述，未能根据耦合实体双方的演化速度做出动态耦合分析，进而揭示出二者之间相互作用的内在联系和时序规律。

本研究基于1978—2012年的时间序列数据，对浙江畜禽养殖环境承载力状况进行评价；选取并利用所计算的畜禽养殖业环境负荷综合指数与经济增长指数，借鉴系统科学的理论，建立畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合模型，分析并预测“零方案”状态下至2050年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合演化趋势，旨在为浙江未来几十年推动实现农业环境的持续改善提供一定的参考。

## 1 畜禽养殖环境承载力评价

### 1.1 畜禽养殖猪粪当量产生总量与各类污染物产生总量测算

畜禽废弃物主要包括在养殖过程中排放的粪便和有机废水，本研究计算牛、羊、生猪3种主要畜禽的猪粪当量年产生总量和各类污染物年产生总量。牛、羊由于饲养周期较长，当年年末出栏量很少，采用年末存栏量来计算粪尿及其各类污染物的年产生量；生猪的饲养周期一般为180 d，可将其出栏量和增补量相抵消，从而把存栏量看作是当年的一个稳定饲养量。因此，牛、羊、生猪3种主要畜禽的粪尿及其各类污染物年产生量计算方法为：年末存栏量×粪尿及其污染物年排泄系数。根据表1中国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数、表2中以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数，以及《浙江统计年鉴（2013）》<sup>⑤</sup>中的相关数据，测算1978—2012年浙江畜禽（牛、羊、生猪）养殖猪粪当量产生总量和各类污染物产生总量，结果见表3。

表1 国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数

Table 1 Annual discharge coefficient of the dung, urine and all kinds of pollutants in livestock and poultry breeding recommended by the State Environmental Protection Administration of China

畜禽种类 Species of livestock and poultry	粪 Dung	尿 Urine	5日生化 需氧量 BOD <sub>5</sub>	化学需氧量 COD <sub>cr</sub>	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	总磷 TP	总氮 TN
牛 Cattle	7 300.00	3 650.00	193.70	248.20	25.15	10.07	61.10
羊 Sheep	950.00	—	2.70	4.40	0.57	0.45	2.28
生猪 Pig	398.00	656.70	25.98	26.61	2.07	1.70	4.51

注：资料来源文献[6]。“—”表示该项数据暂缺。

Note: Data from the literature [6]. “—”means the data is vacant.

表 2 以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数  
 Table 2 Conversion factor of the pig manure equivalent for the dung and urine of all kinds of  
 livestock and poultry in the nitrogen content standard

指标 Index	猪粪 Pig dung	猪尿 Pig urine	牛粪 Cattle dung	牛尿 Cattle urine	羊粪 Sheep dung
氮/% Nitrogen	0.65	0.33	0.45	0.80	0.80
猪粪当量换算系数 Conversion factor of pig manure equivalent	1.00	0.57	0.69	1.23	1.23

注:资料来源文献[7]。

Note: Data from the literature[7].

表 3 1978—2012 年浙江畜禽(牛、羊、生猪)养殖猪粪当量产生总量及各类污染物产生总量  
 Table 3 Total amount of the pig manure equivalent and all kinds of pollutants in livestock and poultry  
 (cattle, sheep and pig) breeding from 1978 to 2012 in Zhejiang Province

年份 Year	猪粪当量 Pig manure equivalent	5 日生化需氧量 BOD <sub>5</sub>	化学需氧量 COD <sub>Cr</sub>	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	总磷 TP	总氮 TN
1978	2 162.293 7	51.471 4	57.315 2	5.008 3	3.233 5	11.738 7
1979	2 408.775 3	57.627 9	63.813 5	5.538 2	3.644 5	12.959 7
1980	2 253.474 9	53.422 6	59.381 3	5.178 0	3.368 1	12.141 2
1981	2 163.530 8	51.730 9	57.575 8	5.027 7	3.248 5	11.775 1
1982	2 162.961 3	52.663 5	58.488 5	5.092 8	3.302 4	11.889 9
1983	2 107.211 1	52.273 4	57.929 9	5.029 5	3.273 2	11.704 2
1984	2 002.373 2	50.175 1	55.619 8	4.829 8	3.133 1	11.222 6
1985	1 988.006 6	50.777 7	56.087 1	4.847 8	3.172 6	11.224 7
1986	2 007.234 3	51.607 4	56.915 8	4.909 6	3.226 5	11.353 6
1987	1 905.104 6	48.170 7	53.348 2	4.626 7	3.005 5	10.734 1
1988	1 836.229 1	46.164 8	51.120 0	4.433 1	2.884 8	10.293 8
1989	1 816.119 6	45.446 3	50.305 6	4.360 8	2.844 5	10.132 5
1990	1 767.764 8	44.069 8	48.828 1	4.237 8	2.757 1	9.854 1
1991	1 708.578 5	42.589 9	47.158 8	4.089 8	2.667 0	9.509 1
1992	1 708.756 7	43.103 1	47.460 9	4.087 2	2.713 0	9.476 6
1993	1 558.186 7	38.555 9	42.496 5	3.665 3	2.434 4	8.525 3
1994	1 488.343 9	36.096 7	39.834 7	3.442 0	2.286 2	8.032 8
1995	1 479.589 8	35.389 8	39.111 4	3.386 3	2.244 4	7.922 0
1996	1 419.405 7	33.373 6	37.008 9	3.218 4	2.115 4	7.553 8
1997	1 472.438 7	35.800 6	39.328 3	3.379 1	2.280 5	7.877 1
1998	1 460.794 8	36.024 0	39.404 3	3.366 8	2.300 6	7.825 3

表 3(续)

年份 Year	猪粪当量 Pig manure equivalent	5 日生化需氧量 BOD <sub>5</sub>	化学需氧量 COD <sub>Cr</sub>	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	总磷 TP	总氮 TN
1999	1 434.132 7	35.076 0	38.308 4	3.267 3	2.249 2	7.602 2
2000	1 529.670 8	37.971 0	41.213 3	3.486 7	2.447 0	8.084 7
2001	1 567.773 1	38.793 4	42.089 3	3.559 3	2.503 2	8.256 5
2002	1 559.523 6	37.970 2	41.287 4	3.502 2	2.452 0	8.148 7
2003	1 552.338 1	37.664 0	40.944 4	3.472 2	2.435 1	8.083 2
2004	1 542.959 8	37.530 4	40.814 9	3.462 8	2.423 7	8.058 5
2005	1 535.326 6	39.002 1	42.081 3	3.531 8	2.520 3	8.149 8
2006	1 138.236 8	30.841 8	32.936 1	2.724 5	1.992 2	6.209 5
2007	1 130.851 4	31.315 3	33.290 5	2.736 3	2.025 7	6.208 7
2008	1 224.248 8	34.487 4	36.534 6	2.988 1	2.233 3	6.756 1
2009	1 271.109 6	36.093 1	38.165 2	3.113 3	2.339 2	7.027 3
2010	1 284.131 5	36.587 6	38.648 0	3.148 1	2.372 8	7.100 2
2011	1 300.193 2	37.305 5	39.341 8	3.197 1	2.421 2	7.199 9
2012	1 327.453 4	38.486 9	40.476 9	3.276 5	2.501 6	7.361 6

注:数据来源,根据国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数、以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数,以及《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理计算(表1、表2)。

Note: Data related to the original data in Zhejiang Statistical Yearbook (2013) is calculated on Table 1 and Table 2.

## 1. 2 畜禽养殖猪粪当量环境负荷量与各类污染物环境负荷量计算

畜禽废弃物的主要处理途径是回用农田。目前,许多发达国家将农田作为畜禽粪便和有机废水的负载场所加以消化<sup>⑧</sup>,即通过废弃物的资源化利用来实现污染物的“零排放”。由此,畜禽养殖猪粪当量环境负荷量与各类污染物环境负荷量即为单位耕地面积猪粪当量产生量与单位耕地面积各类污染物产生量。基于表3中所测算的猪粪当量产生总量和各类污染物产生总量,并根据《浙江统计年鉴(2013)》<sup>⑨</sup>中1978—2012年年末实有耕地面积①,计算1978—2012年浙江畜禽养殖猪粪当量环境负荷量与各类污染物环境负荷量(表4)。

表 4 1978—2012 年浙江畜禽(牛、羊、生猪)养殖猪粪当量环境负荷量与各类污染物环境负荷量

Table 4 Environmental load of the pig manure equivalent and all kinds of pollutants in livestock and poultry (cattle, sheep and pig) breeding from 1978 to 2012 in Zhejiang Province

t/hm<sup>2</sup>

年份 Year	环境负荷量 Environmental load					
	猪粪当量 Pig manure equivalent	5 日生化需氧量 BOD <sub>5</sub>	化学需氧量 COD <sub>Cr</sub>	氨氮 NH <sub>3</sub> -N	总磷 TP	总氮 TN
1978	11.764 4	0.280 0	0.311 8	0.027 2	0.017 6	0.063 9
1979	13.149 1	0.314 6	0.348 3	0.030 2	0.019 9	0.070 7
1980	12.361 2	0.293 0	0.325 7	0.028 4	0.018 5	0.066 6
1981	11.888 4	0.284 3	0.316 4	0.027 6	0.017 9	0.064 7
1982	11.898 8	0.289 7	0.321 8	0.028 0	0.018 2	0.065 4
1983	11.599 8	0.287 8	0.318 9	0.027 7	0.018 0	0.064 4
1984	11.087 5	0.277 8	0.308 0	0.026 7	0.017 3	0.062 1
1985	11.189 3	0.285 8	0.315 7	0.027 3	0.017 9	0.063 2
1986	11.446 8	0.294 3	0.324 6	0.028 0	0.018 4	0.064 7
1987	10.917 9	0.276 1	0.305 7	0.026 5	0.017 2	0.061 5
1988	10.574 5	0.265 9	0.294 4	0.025 5	0.016 6	0.059 3
1989	10.490 0	0.262 5	0.290 6	0.025 2	0.016 4	0.058 5
1990	10.256 7	0.255 7	0.283 3	0.024 6	0.016 0	0.057 2
1991	9.962 5	0.248 3	0.275 0	0.023 8	0.015 6	0.055 4
1992	10.103 7	0.254 9	0.280 6	0.024 2	0.016 0	0.056 0
1993	9.379 8	0.232 1	0.255 8	0.022 1	0.014 7	0.051 3
1994	9.100 4	0.220 7	0.243 6	0.021 0	0.014 0	0.049 1
1995	9.145 7	0.218 8	0.241 8	0.020 9	0.013 9	0.049 0
1996	8.795 5	0.206 8	0.229 3	0.019 9	0.013 1	0.046 8
1997	9.131 9	0.222 0	0.243 9	0.021 0	0.014 1	0.048 9
1998	9.053 9	0.223 3	0.244 2	0.020 9	0.014 3	0.048 5
1999	8.912 8	0.218 0	0.238 1	0.020 3	0.014 0	0.047 2
2000	9.515 5	0.236 2	0.256 4	0.021 7	0.015 2	0.050 3
2001	9.789 6	0.242 2	0.262 8	0.022 2	0.015 6	0.051 6
2002	9.752 4	0.237 4	0.258 2	0.021 9	0.015 3	0.051 0
2003	9.750 0	0.236 6	0.257 2	0.021 8	0.015 3	0.050 8
2004	9.674 2	0.235 3	0.255 9	0.021 7	0.015 2	0.050 5
2005	9.634 6	0.244 7	0.264 1	0.022 2	0.015 8	0.051 1
2006	7.138 8	0.193 4	0.206 6	0.017 1	0.012 5	0.038 9
2007	7.079 6	0.196 0	0.208 4	0.017 1	0.012 7	0.038 9
2008	7.701 4	0.216 9	0.229 8	0.018 8	0.014 0	0.042 5
2009	8.034 8	0.228 1	0.241 2	0.019 7	0.014 8	0.044 4
2010	8.156 4	0.232 4	0.245 5	0.020 0	0.015 1	0.045 1
2011	8.298 3	0.238 1	0.251 1	0.020 4	0.015 5	0.046 0
2012	8.513 3	0.246 8	0.259 6	0.021 0	0.016 0	0.047 2

注:数据来源,根据国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数、以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数,以及《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理计算(表1、表2)。

Note: Data related to the original data in Zhejiang Statistical Yearbook (2013) is calculated on Table 1 and Table 2.

### 1.3 畜禽养殖环境承载力状况估计

1) 评价方法。针对畜禽养殖环境承载力状况的估计,已有的研究一般采用各指标加权求和的方法<sup>⑩~⑪</sup>。

在指标的选取上则是根据限制类指标和发展类指标<sup>⑫</sup>进行分类,前者描述资源环境的客观条件,后者描述经济社会的发展规模。

也有采用诸如氮污染负荷等单个指标进行评价的方法<sup>⑬</sup>。然而,畜禽养殖环境承载力并非限制性因素和发展性因素的简单综合,也不是单个污染负荷指标可以涵盖说明的。从本质上而言,畜禽养殖环境承载力主要体现在耕地土壤对畜禽粪尿及其各类污染物的消纳能力。因为进入土壤的粪便及其分解产物或携带的污染物质,超过土壤本身的自净能力时,便会引起土壤的组成和性状发生改变,并破坏其原有的基本功能,给人和动物的生活与健康造成危害<sup>⑭</sup>。因此,畜禽养殖环境承载力状况的估计,应使用多个耕地土壤污染负荷指标进行综合评价,即以单位耕地面积猪粪当量环境负荷量与单位耕地面积各类污染物环境负荷量作为评价指标,通过各指标的加权求和来表示。

根据表4中所计算的猪粪当量环境负荷量与各类污染物环境负荷量,对1978—2012年浙江畜禽养殖环境承载力状况进行估计。

①确定环境负荷量适宜值数列和警戒值数列。一般认为,耕地面积能够负荷的畜禽粪便在30~45 t/hm<sup>2</sup>左右<sup>⑮</sup>。根据上海市农业科学研究院提出的畜禽粪便负荷警报值分级标准,当猪粪当量环境负荷量同当地耕地以猪粪当量计算的有机肥理论最大适宜施肥量的比值在0.4以下时,该地区粪便可完全被农田消纳和承受,对环境不构成污染威胁<sup>⑯</sup>。由此,采取畜禽养殖猪粪当量环境负荷量适宜值和警戒值分别为每公顷耕地面积12和18 t猪粪当量。虽然畜禽养殖各类污染物有不同的标准制定,如欧盟农业政策规定粪肥年施氮(TN)量的限量标准为170 kg/hm<sup>2</sup><sup>⑰</sup>,但从已有的研究来看,大都依据国家环保总局推荐的每公顷耕地面积15和25生猪当量来分别确定5日生化需氧量(BOD5)、化学需氧量(CODCr)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)和总氮(TN)。产生量的适宜值和警戒值的[10, 17]。因此,畜禽养殖各类污染物环境负荷量适宜值和警戒值也分别按照每公顷耕地面积15和25生猪当量进行核算。从而确定环境负荷量适宜值数列{r\*k}=[r\*1, r\*2, r\*3, r\*4, r\*5, r\*6]为[12, 0.38970, 0.39915, 0.03105, 0.02550, 0.06765],环境负荷量警戒值数列{r\*\*k}=[r\*\*1, r\*\*2, r\*\*3, r\*\*4, r\*\*5, r\*\*6]为[18, 0.64950, 0.66525, 0.05175, 0.04250, 0.11275](数列中k=1, 2, ..., 6, 依次表示猪粪当量、BOD5、CODCr、NH<sub>3</sub>-N、TP和TN)。

②指标规范化处理。采用极差标准化方法对包含环境负荷量适宜值数列和警戒值数列在内的1978—2012年浙江畜禽养殖猪粪当量环境负荷量数据与各类污染物环境负荷量数据进行无量纲化处理,得到压缩于区间[0, 1]的值C<sub>ik</sub>。由于各指标均为逆向指标,公式为:

$$C_k^i = \frac{r_{\max(k)} - r_k^i}{r_{\max(k)} - r_{\min(k)}} \quad (1)$$

---

式中:  $r_{\max}(k) = \max\{r_{ik}\}$ ,  $r_{\min}(k) = \min\{r_{ik}\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 12$ ,  $*$ ,  $**$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$

③计算变异系数。变异系数  $V_k$  的计算公式为:

$$V_k = \frac{s_k}{\bar{C}_k} \quad (2)$$

式中:  $s_k$  和  $\bar{C}_k$  分别为  $C_{ik}$  的标准差和均值。

④计算指标权重。指标权重  $W_k$  的计算公式为:

$$W_k = \frac{V_k}{\sum_{k=1}^6 V_k} \quad (3)$$

指标值的变异系数越大, 所提供的信息量越丰富, 该指标在综合指数中起到的作用就越大, 相应的权重也就越大。各指标权重如表 5 所示。

表 5 畜禽(牛、羊、生猪)养殖猪粪当量与各类  
污染物指标权重

Table 5 Weight of index for the pig manure equivalent  
and all kinds of pollutants in livestock and  
poultry (cattle, sheep and pig) breeding

序号 No.	指标 Index	权重 Weight
1	猪粪当量	0.198 0
2	BOD <sub>5</sub>	0.152 3
3	COD <sub>Cr</sub>	0.156 7
4	NH <sub>3</sub> -N	0.167 0
5	TP	0.150 1
6	TN	0.175 9

注:数据来源,根据国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类  
污染物年排泄系数、以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当  
量换算系数,以及《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理  
计算。

⑤计算综合评价结果。采用线性加权法计算 1978—2012 年各年度浙江畜禽养殖业环境负荷综合指数 PI<sub>i</sub>, 即

$$PI_i = \sum_{k=1}^6 W_k C_k^i \quad (4)$$

2) 评价结果分析。

1978—2012 年浙江畜禽养殖环境负荷综合指数计算结果如表 6 所示。1978—2012 年浙江畜禽养殖业环境负荷综合指数基本呈现出持续上升并不断偏离适宜值的趋势(图 1)。猪粪当量和各类污染物共 6 项指标与畜禽养殖业环境负荷综合指数的相关系数绝对值均在 0.96 以上,且通过了显著性水平为 1% 的检验,呈现出高度的负相关性,说明在这 35 年间浙江畜禽养殖业环境承载力状况总体上是有所改善的。

表 6 1978—2012 年浙江畜禽(牛、羊、生猪)养殖业环境负荷综合指数  
 Table 6 Environmental load composite index of livestock and poultry (cattle, sheep and pig)  
 farming from 1978 to 2012 in Zhejiang Province

年份 Year	综合值 Value								
1978	0.716 2	1985	0.723 5	1992	0.806 6	1999	0.904 9	2006	0.846 6
1979	0.624 8	1986	0.703 1	1993	0.864 1	2000	0.861 5	2007	0.997 4
1980	0.679 8	1987	0.745 9	1994	0.890 7	2001	0.844 7	2008	0.948 3
1981	0.705 9	1988	0.772 6	1995	0.892 6	2002	0.853 0	2009	0.922 1
1982	0.696 9	1989	0.780 9	1996	0.920 9	2003	0.854 8	2010	0.912 4
1983	0.708 6	1990	0.798 1	1997	0.889 8	2004	0.858 6	2011	0.900 1
1984	0.738 3	1991	0.818 7	1998	0.891 4	2005	0.846 6	2012	0.881 5

注: 适宜值为 0.578 6, 警戒值为 0。数据来源, 根据国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数、以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数, 以及《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理计算。

## 2 畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合分析与预测

耦合是指 2 个或 2 个以上的实体相互依赖于对方的一个量度。在一个系统中, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长之间存在着对立统一的关系, 环境负荷对经济增长形成制约力的同时, 经济增长也对环境负荷产生胁迫力, 二者在相互作用中共同发展, 并形成一定的耦合轨迹。但畜禽养殖业环境负荷与经济增长的耦合性质是复杂的, 二者既有协调共生的一面, 也有磨合适应的一面, 更有拮抗排斥的一面, 甚至失重不调的一面。伴随着经济的高速发展, 畜禽养殖业的持续集约化是畜禽养殖污染逐渐加重的重要原因。未来几十年, 浙江畜禽养殖业经济将会保持稳定增长, 畜禽养殖污染也会呈现出不断恶化的趋势。这是畜禽养殖业环境负荷与经济增长之间的矛盾。揭示畜禽养殖业环境负荷与经济增长耦合的动态演化规律, 目的在于进一步预测可供畜禽养殖业经济持续发展的环境承载能力的变化, 为相应政策规划方案的制定和调整提供可参考的依据。

### 2. 1 数据处理

畜禽养殖业经济增长状况由相应的经济增长指数表示。根据《浙江统计年鉴(2013)》<sup>⑥</sup>中的相关数据以不变价格计算 1978—2012 年浙江人均牧业产值, 并采用极差标准化方法对计算结果进行无量纲化处理, 得到压缩于区间 [0, 1] 的值  $EI_i$ 。由于人均牧业产值为正向指标, 公式为

$$EI_i = \frac{Z_i - \min(Z_i)}{\max(Z_i) - \min(Z_i)}, i = 1, 2, \dots, 35 \quad (5)$$

式中:  $EI_i$  即为 1978—2012 年各年度浙江畜禽养殖业经济增长指数。1978—2012 年浙江人均牧业产值与畜禽养殖业经济增长指数计算结果如表 7 所示。

表 7 1978—2012 年浙江人均牧业产值与畜禽养殖业经济增长指数  
 Table 7 Animal husbandry output values per capita and economic growth index of livestock and poultry farming from 1978 to 2012 in Zhejiang Province

项目 Item	年份 Year						
	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
人均牧业产值/元	25.113 6	41.003 8	50.671 9	42.489 9	58.303 1	59.069 9	67.641 9
畜禽养殖业经济增长指数	0	0.014 2	0.022 8	0.015 5	0.029 7	0.030 3	0.038 0
项目 Item	年份 Year						
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
人均牧业产值/元	93.906 0	98.499 5	117.854 3	168.663 1	179.810 3	177.524 4	180.176 8
畜禽养殖业经济增长指数	0.061 5	0.065 6	0.082 9	0.128 3	0.138 3	0.136 2	0.138 6
项目 Item	年份 Year						
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
人均牧业产值/元	198.860 9	213.548 8	310.467 2	325.039 0	354.265 5	429.710 5	372.959 8
畜禽养殖业经济增长指数	0.155 3	0.168 4	0.255 0	0.268 1	0.294 2	0.361 6	0.310 9
项目 Item	年份 Year						
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
人均牧业产值/元	351.430 1	408.644 8	433.510 9	452.140 4	511.932 1	607.115 2	621.345 4
畜禽养殖业经济增长指数	0.291 6	0.342 8	0.365 0	0.381 7	0.435 1	0.520 2	0.532 9
项目 Item	年份 Year						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
人均牧业产值/元	602.687 6	788.952 9	893.501 3	858.491 4	944.449 7	1142.636 6	1143.990 6
畜禽养殖业经济增长指数	0.516 2	0.682 7	0.776 1	0.744 8	0.821 7	0.998 8	1.000 0

注:数据来源,根据《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理计算。

直至 2006 年,浙江已顺利完成 339 个年存栏生猪 1 000 头以上、奶牛 1 000 头以上的规模化畜禽养殖场和 25 个畜禽粪便收集处理中心的治理与建设任务,因而 2006 年畜禽养殖污染环境负荷综合指数为 0.9987,远高于 2005 年 0.8466 的水平(图 1)。但伴随着 2007 年之后浙江人均牧业产值开始大幅提升,畜禽养殖污染环境负荷综合指数又呈现出稳步回落的态势。



图 1 1978—2012 年浙江畜禽(牛、羊、生猪)  
养殖业环境负荷综合指数

鉴于此,本研究选取 2006—2012 年的浙江畜禽养殖业环境负荷综合指数与经济增长指数进行动态耦合分析和预测。

## 2. 2 模型构建

根据一般系统理论中的系统演化思想建立畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合模型。由于畜禽养殖业环境负荷与经济增长都是非线性系统,其一般动态演化方程为

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

式中:  $t$  为时间变量。李雅普若夫第一近似定理表明 [18], 非线性系统的运动稳定性取决于一次近似系统特征根的性质,因此可以略去高次项而保证运动的稳定性。所得到的近似线性系统为

$$\frac{dx(t)}{dt} = \sum_{k=1}^n a_k x_k, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

据此, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长的一般函数则为  $f(P_I) = 1 - f(R) =$

---


$$1 - \sum_{k=1}^6 W_k \xi_i(k), i = 1, 2, \dots, 7 \quad (8)$$

$$f(\text{EI}) = \text{EI}_i, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (9)$$

将畜禽养殖业环境负荷与经济增长合二为一，则根据 Bertalanffy<sup>④</sup>的一般系统理论，该系统的演化方程为

$$V = \frac{d\text{PI}}{dt} = \alpha_1 \text{PI} + \alpha_2 \text{EI} \quad (10)$$

$$U = \frac{d\text{EI}}{dt} = \beta_1 \text{PI} + \beta_2 \text{EI} \quad (11)$$

式中：t 为年度。在式 (10) 与式 (11) 中，畜禽养殖业环境负荷与经济增长作为同一系统的两个主导部分，是相互影响的，二者中任一部分的变化都会导致整个系统的变化。因此，畜禽养殖业环境负荷与经济增长之间相互协调就意味着整个系统的良性发展。这一系统的演化速度  $G$  是关于畜禽养殖业环境负荷演化速度  $G_v$  和经济增长演化速度  $G_u$  的函数，即有  $G = f(G_v, G_u)$ 。畜禽养殖业环境负荷演化速度  $G_v$  与经济增长演化速度  $G_u$  分别为

$$G_v = \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

$$G_u = \frac{dU}{dt} \quad (13)$$

若畜禽养殖业的经济增长呈周期性变化，则环境负荷受其影响，也呈周期性变化。由于畜禽养殖业环境负荷较之经济增长的周期性变化略为滞后，因此在以  $G_v$  为横轴、  $G_u$  为纵轴建立的直角坐标系中，  $G$  的变化轨迹就呈现为一个椭圆，如图 2 所示。在直角坐标系中，  $G_v$  和  $G_u$  满足

$$\tan \theta = \frac{G_u}{G_v} \quad (14)$$

则有

$$\theta = \arctan \frac{G_u}{G_v} \quad (15)$$

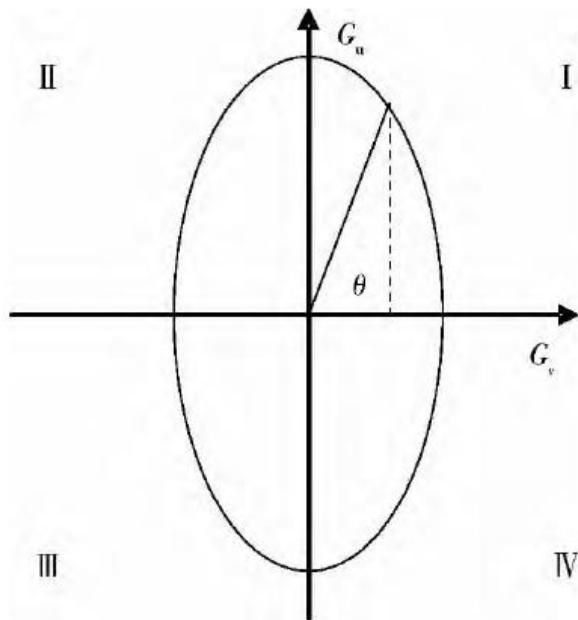


图 2 畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态  
耦合演化轨迹直角坐标

$\theta$  即为畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合度。在直角坐标系中, 根据  $\theta$  所处的不同象限, 描述畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合特征如下:

1) 当  $\theta$  取值落入第 I 象限, 即  $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$  时, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合处于磨合期。这一时期, 经济增长对环境负荷所产生的胁迫作用基本是在畜禽养殖环境的可承载范围之内, 其压力能够在一定程度上得到释放。

2) 当  $\theta$  取值落入第 II 象限, 即  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$  时, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合处于拮抗期。这一时期, 经济增长对环境负荷极为依赖, 同时畜禽养殖业环境负荷对经济增长的制约、排斥等负反馈作用日益突出。

3) 当  $\theta$  取值落入第 III 象限, 即  $-180^\circ < \theta \leq -90^\circ$  时, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合处于协调期。这一时期, 经济增长与环境负荷之间的关系由相互对立逐渐转化为相互促进, 二者趋向于协调共生的良性态势。

4) 当  $\theta$  取值落入第 IV 象限, 即  $-90^\circ < \theta \leq 0^\circ$  时, 畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合处于失重期。这一时期, 低水平的经济增长对环境负荷的依赖性不高, 经济增长尚未触及畜禽养殖环境承载能力的问题, 环境负荷对经济增长的制约作用也不强。

### 2. 3 计算结果

根据表 7 和表 8, 利用 STATA 软件将 2006—2012 年浙江畜禽养殖业环境负荷综合指数与经济增长指数分别进行指数函数拟合与幂函数拟合, 结果如表 8 所示, 则畜禽养殖业环境负荷综合指数拟合表达式和经济增长指数拟合表达式分别为

$$PI = e^{-0.0221t} \quad (16)$$

$$EI = 0.5227t^{0.3229} \quad (17)$$

式中:  $t$  对应为 2006—2012 年度, 自然数 取值范围为 [1, 7]。

表 8 2006—2012 年浙江畜禽养殖业环境负荷综合指数和经济增长指数曲线拟合回归结果  
Table 8 Fitting regression results for the environment load composite index and the economic growth composite index in livestock and poultry farming from 2006 to 2012 in Zhejiang Province

环境负荷综合指数指数函数拟合回归结果			经济增长指数幂函数拟合回归结果		
Exponential function fitting regression results for environment load composite index			Power function fitting regression results for economic growth composite index		
被解释变量 $\ln PI, R^2 = 0.9473$			被解释变量 $\ln EI, R^2 = 0.9299$		
解释变量	回归系数	P 值	解释变量	回归系数	P 值
$t$	-0.0220769*	0.000	$\ln t$	0.3229118*	0.000
常数项	0.0224389	0.084	常数项	-0.6487885*	0.000

注: \* 表示在 5% 的统计水平下显著。环境负荷综合指数指数函数拟合回归分别通过了 Breusch-Godfrey 自相关检验 ( $P$  值为 0.9970, 大于 5% 的显著性水平, 接受原假设) 和 Breusch-Pagan 异方差检验 ( $P$  值为 0.4202, 大于 5% 的显著性水平, 接受原假设); 经济增长指数幂函数拟合回归分别通过了 Breusch-Godfrey 自相关检验 ( $P$  值为 0.9536, 大于 5% 的显著性水平, 接受原假设) 和 Breusch-Pagan 异方差检验 ( $P$  值为 0.5119, 大于 5% 的显著性水平, 接受原假设)。

由式 (12)、式 (13) 求得  $G_v$ 、 $G_u$  分别为

$$G_v = \frac{dV}{dt} = -0.0221e^{-0.0221t} \quad (18)$$

$$G_u = \frac{dU}{dt} = 0.1688t^{-0.6771} \quad (19)$$

根据式 (18)、式 (19)、式 (14) 和式 (15) 分别求得 2006—2012 年  $G_v$ 、 $G_u$ 、 $\tan \theta$  和  $\theta$  的值, 其中  $t$  对应为 2006—2012 年度, 自然数取值范围为 [1, 7]。从计算结果 (表 9) 来看, 2006—2012 年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合度呈现平滑上升但速率减缓的态势 (图 3)。由此可知, 未来某一时期二者动态耦合度平滑上升速率必将为 0 而出现 拐点。为确认该拐点, 可将  $t$  由原先所对应的 2006—2012 年度延伸至 2006—2050 年度, 自然数取值范围为 [1, 45], 相应的环境负荷与经济增长动态耦合度计算结果如表 9 所示。再由表 9 作出 2006—2050 年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合演化曲线, 如图 3 所示。

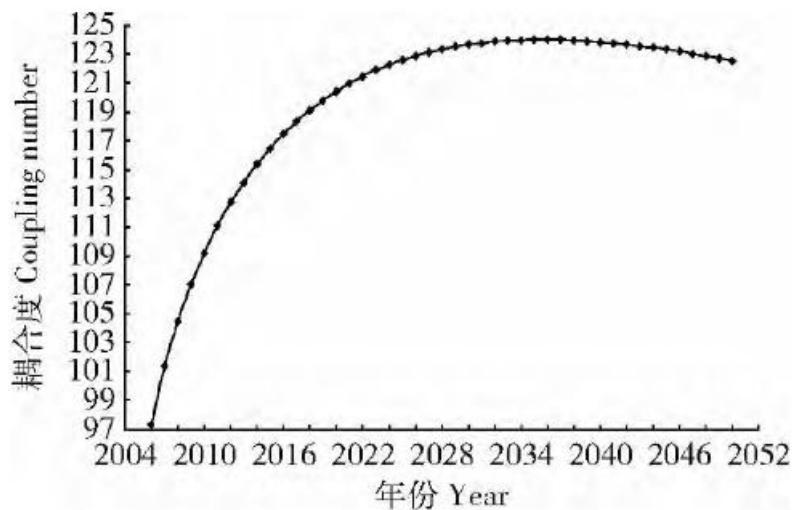


图 3 2006—2050 年浙江畜禽养殖业环境负荷与  
经济增长动态耦合演化趋势

#### 2. 4 实证评价

如表 9 所示, 2006—2012 年浙江畜禽养殖业环境负荷演化速度为负值, 呈现出逐年上升的趋势; 经济增长演化速度为正值, 呈现出逐年下降的趋势。畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合度  $\theta$  取值均落入直角坐标系的第 II 象限, 说明这一时期浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合处于拮抗状态。

表 9 2006—2050 年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合度  
Table 9 Dynamic coupling number of the environment load and the economic growth in livestock and  
poultry farming from 2006 to 2050 in Zhejiang Province

指标 Index	年份 Year								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
$t$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_v$	-0.0216	-0.0211	-0.0207	-0.0202	-0.0198	-0.0193	-0.0189	-0.0185	-0.0181
$G_u$	0.1688	0.1056	0.0802	0.0660	0.0568	0.0502	0.0452	0.0413	0.0381
$\tan\theta$	-7.8157	-4.9973	-3.8823	-3.2665	-2.8711	-2.5944	-2.3894	-2.2316	-2.1065
$\theta$	97.2912	101.3160	104.4442	107.0213	109.2029	111.0792	112.7100	114.1378	115.3945

指标		年份 Year							
Index	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
$t$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$G_v$	-0.0177	-0.0173	-0.0169	-0.0166	-0.0162	-0.0159	-0.0155	-0.0152	-0.0148
$G_u$	0.0355	0.0333	0.0314	0.0297	0.0283	0.0270	0.0258	0.0248	0.0238
$\tan\theta$	-2.0053	-1.9219	-1.8524	-1.7938	-1.7441	-1.7017	-1.6653	-1.6340	-1.6071
$\theta$	116.5049	117.4887	118.3620	119.1380	119.8278	120.4406	120.9846	121.4664	121.8921
指标		年份 Year							
Index	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
$t$	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$G_v$	-0.0145	-0.0142	-0.0139	-0.0136	-0.0133	-0.0130	-0.0127	-0.0124	-0.0122
$G_u$	0.0230	0.0222	0.0215	0.0208	0.0202	0.0196	0.0191	0.0186	0.0181
$\tan\theta$	-1.5839	-1.5640	-1.5469	-1.5324	-1.5202	-1.5100	-1.5016	-1.4949	-1.4897
$\theta$	122.2668	122.5949	122.8805	123.1271	123.3378	123.5153	123.6622	123.7807	123.8728
指标		年份 Year							
Index	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
$t$	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$G_v$	-0.0119	-0.0116	-0.0114	-0.0111	-0.0109	-0.0107	-0.0104	-0.0102	-0.0100
$G_u$	0.0177	0.0173	0.0169	0.0165	0.0162	0.0158	0.0155	0.0152	0.0149
$\tan\theta$	-1.4859	-1.4834	-1.4821	-1.4819	-1.4828	-1.4846	-1.4874	-1.4910	-1.4955
$\theta$	123.9404	123.9851	124.0084	124.0117	123.9963	123.9633	123.9138	123.8489	123.7693
指标		年份 Year							
Index	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
$t$	37	38	39	40	41	42	43	44	45
$G_v$	-0.0098	-0.0095	-0.0093	-0.0091	-0.0089	-0.0087	-0.0085	-0.0084	-0.0082
$G_u$	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128
$\tan\theta$	-1.5008	-1.5068	-1.5136	-1.5211	-1.5293	-1.5381	-1.5476	-1.5577	-1.5684
$\theta$	123.6761	123.5699	123.4515	123.3216	123.1808	123.0298	122.8691	122.6993	122.5208

注:数据来源,根据国家环保总局推荐的畜禽养殖粪尿及其各类污染物年排泄系数、以含氮量为标准的各类畜禽粪尿猪粪当量换算系数,以及《浙江统计年鉴(2013)》中的相关数据整理计算。

2006—2012年浙江畜禽养殖业经济持续快速增长,但却处在转型升级的关键时期,局部地区畜禽养殖总量增加与环境容量有限、土地种植消纳不足的矛盾仍然突出,畜禽废弃物依旧是平原河网和部分流域水环境的污染源之一,难以在短时间内得到根本改变。尽管自2005年以来,通过实施“811”环境整治行动和“811”环境保护新3年行动,浙江存栏生猪200头以上、牛20头以上的7800多个规模化畜禽养殖场(户)得到了治理,废弃物资源化利用也取得了积极进展,但一些地区的禁养区或禁养制度尚未全面落实,部分养殖场污染治理设施与养殖规模不匹配,且后续管理不到位。正是这些问题制约了浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的协调发展。

基于2006—2012年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合的演化状况,通过对“零方案”状态下直至2050年二者动态耦合演化趋势的预测结果可见,动态耦合度 $\theta$ 取值均落入直角坐标系的第II象限,说明直至2050年,浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合都将处于拮抗状态。2006—2050年整个时期,浙江畜禽

养殖业环境负荷与经济增长动态耦合演化曲线呈现出显著的倒“U”型状态。畜禽养殖业环境负荷演化速度持续为负值，且逐年上升；经济增长演化速度持续为正值，且逐年下降。2036年为二者动态耦合演化曲线的唯一拐点，此时动态耦合度 $\theta$ 达到最大值。在2036年之前，由于畜禽养殖业环境的改善尚不足以弥补经济增长对其产生的胁迫影响，二者动态耦合的拮抗性减速增强；而在2036年之后，随着畜禽养殖业环境的改善已经可以弥补经济增长对其产生的胁迫影响，二者动态耦合的拮抗性加速减弱。

该预测提示了在未实施任何规划方案的情况下，浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合的未来演化存在着一个较长的拮抗期，即环境负荷与经济增长将在未来很长时期内处于相互抵触和矛盾的状态中。因此，如何将未来各年度的动态耦合度降至低于预测水平，同时致力于使动态耦合演化曲线的拐点较之预测水平提前到来，对当前浙江畜禽养殖业可持续发展规划方案的制定和调整具有重要的现实意义。具体而言，一方面要使环境负荷演化速度逐年加快上升，且由负值变为正值；另一方面要在保持经济增长演化速度持续为正值的同时使之逐年上升。最终使得2012年之后的动态耦合度逐渐保持在90之下，从而畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合将由拮抗期转入磨合期，即经济增长对环境负荷所产生的胁迫和压力在畜禽养殖环境的可承载范围之内能够得到释放，动态耦合演化曲线的拐点也将随之提前到来。

### 3 研究结论与政策启示

本研究采用1978—2012年的时间序列数据，在对浙江畜禽养殖环境承载力状况进行评价的基础上，借鉴系统科学的理论，建立畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合模型，分析并预测“零方案”状态下至2050年浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合演化趋势。研究结论如下：

1) 1978—2012年浙江畜禽养殖污染环境负荷综合指数基本呈现出持续上升并不断偏离适宜值的趋势，35年间畜禽养殖环境承载力状况在总体上有所改善。

2) 2006年浙江畜禽养殖污染环境负荷综合指数远高于2005年的水平，但伴随着2007年之后浙江人均牧业产值开始大幅提升，畜禽养殖污染环境负荷综合指数又呈现出稳步回落的态势。

3) 浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长的动态耦合不仅在2006—2012年间处于拮抗期，而且在“零方案”状态下，直至2050年都将处于拮抗期。畜禽养殖环境演化速度持续为负值，呈现出逐年上升的趋势；经济增长演化速度持续为正值，呈现出逐年下降的趋势。经预测，2036年为浙江畜禽养殖业环境负荷与经济增长动态耦合倒“U”型演化趋势的唯一拐点。2036年之前，畜禽养殖环境的改善尚不足以弥补经济增长对其产生的胁迫影响，二者动态耦合的拮抗性减速增强；2036年之后，畜禽养殖环境的改善已经可以弥补经济增长对其产生的胁迫影响，二者动态耦合的拮抗性加速减弱。

本研究的政策启示在于：

1) 综合运用技术、经济、法律和必要的行政手段，加强畜禽养殖业环境监管。严格执行畜禽养殖业环境准入制度，加快建立推行养殖场排污许可及备案制度，切实加大相应的环境执法力度。不断完善畜禽养殖生态化建设机制，促进废弃物减排，实现改善畜禽养殖环境与保障畜产品有效供给的协调发展。

2) 探索推广生态畜禽养殖发展模式。按照“农牧结合、科学布局、因地制宜、循环利用、控量减污”的原则，根据区域畜禽养殖环境承载力，以满足土地消纳能力和水环境功能区达标为前提，以废弃物资源化利用为主要途径，通过建立健全区域和总量控制制度、优化养殖区域布局等措施，大力开展规模化生态养殖，提高废弃物综合利用率。

---

## 参考文献

- ① 吴云波, 田爱军, 邢雅囡, 等. 江苏省畜禽养殖业污染状况分析及政策建议 [J]. 江苏农业学报, 2013, 29 (5): 1059—1064
- ② 李冉. 我国畜禽养殖污染防治现状、问题及政策建议: 基于生猪养殖大省湖南的调查 [J]. 经济研究参考, 2013 (43): 41—46
- ③ 曹芹, 殷伟庆. 集约化畜禽养殖对环境的污染及防治研究 [J]. 环境科学与管理, 2014, 39 (1): 111—112, 139
- 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
- ⑤ 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队. 浙江统计年鉴 (2013) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013
- ⑥ 杨朝飞. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 14—103
- ⑦ 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级 [J]. 上海农业学报, 1994 (10): 6—10
- ⑧ Frank J Dietz, Nico J P Hoogervorst. Towards a sustainable and efficient use of manure in agriculture: The dutch case [J]. Environmental and Resource Economics (Historical Archive), 1991, 1 (3): 313—332
- ⑨ Terence J Centner. Developing institutions to encourage the use of animal wastes as production inputs [J]. Agriculture and Human Values, 2004, 21, (4): 367—375
- ⑩ 王洋, 李翠霞. 黑龙江省畜禽养殖环境承载能力分析及预测 [J]. 水土保持通报, 2009, 29 (1): 187—191
- ⑪ 王甜甜, 程波, 冯雪莲, 等. 华北地区典型区域畜禽养殖环境承载力综合评价研究: 以滨州市为例 [J]. 农业环境与发展, 2012 (3): 37—41
- ⑫ 张文国, 杨志峰. 基于指标体系的地下水环境承载力评价 [J]. 环境科学学报, 2002, 22 (4): 541—544
- ⑬ 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (5): 1—11

- 
- ⑩ 张绪美. 中国畜禽养殖及其粪便污染与治理现状 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (12): 35—39
- ⑪ 王晓燕, 汪清平. 北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评价 [J]. 农村生态环境, 2005, 21 (1): 30—34
- ⑫ 侯彦林, 李红英, 赵慧明. 中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证: IV各类型区污染程度和趋势 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (7): 1341—1345
- ⑬ 程火生, 崔哲浩. 长白山地区生态旅游环境承载力与可持续发展研究 [J]. 延边大学学报, 2010, 32 (1): 39—43
- ⑭ 朱美玉, 尤晓琳. 李雅普诺夫稳定性理论应用研究 [J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (4): 14—149
- ⑮ Berthalantffy L V. Clean coal technologies: A status report [J]. Electrical World, 1992 (2): 37—42