中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征

高巍，张建杰，张艳舫，张楠楠，王选，柏兆海，马文奇，马林

引用本文:
高巍, 张建杰, 张艳舫, 等. 中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1181−1199.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200471

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海南岛农业绿色发展指标时空变化特征

Spatial and temporal characteristics of agricultural green development indica−tors in Hainan Island

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1156−1167 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200011

中国农业绿色发展指标体系的构建与例证

Construction of a green development index system for agriculture in China and examples

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1113−1126 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200069

农业绿色发展系统研究思路与定量方法

Systematic research and quantitative approach for assessing agricultural green development

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1127−1140 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200241

中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征

Spatiotemporal variation of nitrogen indicators related to agricultural green development in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1141−1155 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200159

农业绿色发展理论框架和实现路径的思考

Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1103−1112 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200238

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200471

高巍, 张建杰, 张艳舫, 张楠楠, 王选, 柏兆海, 马文奇, 马林. 中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1181−1199

GAO W, ZHANG J J, ZHANG Y F, ZHANG N N, WANG X, BAI Z H, MA W Q, MA L. Spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1181−1199

中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征*

高 巍[1,2], 张建杰[3,4], 张艳舫[5], 张楠楠[1], 王 选[1], 柏兆海[1], 马文奇[3], 马 林[1**]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 4. 山西农业大学资源环境学院 太原 030031; 5. 河北省畜牧良种工作总站 石家庄 050000)

摘 要: 奶业是关乎国民健康和食品安全的战略性农业产业, 本文从社会发展、经济效益、产品生产、资源投入和生态环境 5 个方面选取 28 项指标, 发展和完善了中国奶业全产业链绿色发展指标体系和分级标准。基于该指标体系, 利用 NUFER-animal 模型, 定量分析了 1990—2017 年中国奶业绿色发展指标的时空分布特征, 剖析了产业绿色发展的限制因素, 阐明了优化途径。结果表明: 中国人均奶制品消费量稳步提高, 从 2.0 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1} 增加到 12.5 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1}; 奶牛单产水平不断提高, 从 2.4 t·head^{-1}·a^{-1} 增加到 7.0 t·head^{-1}·a^{-1}, 种养系统氮素利用效率由 8.4%提升至 14.4%; 单位牛奶的资源投入和环境代价均呈下降趋势, 生产单位牛奶的蓝水足迹由 0.5 m^3·kg^{-1} 降低到 0.2 m^3·kg^{-1}, 耕地资源投入量由 18.5 m^2·kg^{-1} 降低到 3.3 m^2·kg^{-1}; 养殖系统氨挥发量指标由 21.9 g(N)·kg^{-1} 降低到 7.0 g(N)·kg^{-1}, 但仍远远高于欧美国家水平; 牛奶生产和加工成本逐年增加, 利润却低于欧美等先进国家的水平。空间特征分析表明: 农牧交错带和东部沿海地区产品生产、资源投入和生态环境绿色发展水平相对较高, 北方地区牛奶及奶制品的生产、消费水平均高于南方地区。发展种养一体化产业链融合绿色发展技术与模式、构建产销一体化产业链融合绿色发展利益共享机制和形成全产业链质量追踪服务体系与国民消费信任机制是促进中国奶业振兴和绿色发展的有效途径。

关键词: 奶业振兴; 奶业产业链; 农业绿色发展; 指标体系; NUFER-animal

中图分类号: S19; S8-1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China*

GAO Wei[1,2], ZHANG Jianjie[3,4], ZHANG Yanfang[5], ZHANG Nannan[1], WANG Xuan[1], BAI Zhaohai[1], MA Wenqi[3], MA Lin[1**]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences /

* 国家自然科学基金项目(31972517)、河北省重点研发专项项目(20327301D)、河北省现代农业产业技术体系奶牛产业创新团队项目(HBCT2018120206)和中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-25)资助

** 通信作者: 马林, 研究方向为农业生态学。E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn
高巍, 研究方向为养分资源管理与农业生态学。E-mail: gaowei18@mails.ucas.edu.cn

收稿日期: 2020-06-19 接受日期: 2020-06-30

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31972517), the Key R&D Program of Hebei (20327301D), Hebei Dairy Cattle Innovation Team of Modern Agro-industry Technology Research System (HBCT2018120206) and the Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (2019-XZ-25).

** Corresponding author, E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

Received Jun. 19, 2020; accepted Jun. 30, 2020

Hebei Key Laboratory of Soil Ecology / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 5. Fine Livestock Breeding Workstation of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Dairy industry is a key agricultural industry related to public health and food safety. According to the agricultural green development index system in China, 28 indicators were selected from five aspects (i.e. social development, economic benefits, agricultural productivity, resource utilization and ecological environment) in this study to establish the green development indicators and benchmarks of the whole dairy industry chain in China. Based on the index system, this study quantitatively analyzed spatiotemporal variations of green development indicators of the whole dairy industry chain in China during 1990–2017 using NUFER-animal model. The results showed that 1) milchigs consumption per capita in China increased from 2.0 to 12.5 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1} during 1990–2017, 2) milk yield per cow increased from 2.4 to 7.0 t·head^{-1}·a^{-1}, 3) nitrogen use efficiency of crop-livestock farming system increased from 8.4% to 14.4%, 4) blue water footprint of milk decreased from 0.5 to 0.2 m^3·kg^{-1}, 5) land use per unit milk product decreased from 18.5 to 3.3 m^2·kg^{-1}, and 6) NH_3 volatilization from farming system reduced from 21.9 g(N)·kg^{-1} to 7.0 g(N)·kg^{-1}. Resource utilization and environmental costs per unit of milk showed a downward trend, while they were higher than that of Europe and America. Moreover, production and processing costs of milk increased in China with lower profits than that of developed countries (e.g. Europe and America). The green development level of production, resource utilization and ecological environment were relatively high in the eastern China and the transition zone between cropping area and nomadic area. Production and consumption of milk in the northern China were higher. It is an effective way to promote the revitalization and green development of China's dairy industry by 1) implementing the green technologies and integrating production systems of crop and animal production; 2) building the benefit sharing mechanism of production, processing and marketing industrial chain; and 3) reestablishing the milk quality tracking system of the whole industry chain and the trust mechanism of publics.

Keywords: Dairy industry revitalization; Dairy industry chain; Agricultural green development; Index system; NUFER-animal

奶业是关乎国民健康和食品安全的战略性农业产业。近 30 年来, 中国牛奶产量增长了近 6 倍, 但依旧需要大量乳制品进口[1]。奶制品消费量低、奶农和奶企的利益机制不健全、奶牛养殖成本高、利润低[2]等问题阻碍了我国奶业绿色发展[3]。与此同时, 中国奶牛养殖的养分利用效率低、粪污管理水平差, 还导致了养分环境损失持续增加、温室气体排放逐年升高[4-5]等一系列资源环境问题。2018 年, 我国出台了《国务院办公厅关于推进奶业振兴保障乳品质量安全的意见》, 以推进奶业振兴和提升奶业竞争力, 其中促进全产业链融合与农业绿色发展是关键[6]。因此, 定量分析中国奶业全产业链的绿色发展水平, 剖析中国奶业与发达国家的差距及限制因素, 探索全产业链绿色发展的实现途径, 是实现我国奶业振兴亟需解决的重要科学问题。

目前, 国际上已经开展了关于不同尺度奶产业绿色可持续发展评估的研究。Meul 等[7]选取经济、生态和社会可持续 3 方面共 47 项指标, 定量评估了比利时佛兰德地区奶牛场的可持续发展状况, 为监测区域奶牛养殖业的可持续发展提供了方法。Aarts 等[8]利用农场养分流动模型(Annual Nutrient Cycle Assessment, ANCA), 计算了荷兰奶牛场能量利用及氮、磷损失和利用效率等生态环境指标, 作为奶企从奶农收购牛奶的重要依据。Capper 等[9]利用生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)建立了美国奶牛养殖业绿色发展指标体系, 用于评估 2007—2017 年间美国奶牛养殖业资源环境代价的变化特征。综上所述, 国际上已经开始关注奶业可持续发展和资源环境代价的定量分析, 但是主要关注奶牛养殖环节, 尚缺少对全产业链的全方面的分析。

在国内, 陆昌华[10]通过层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP), 建立了奶牛养殖小区养殖模式的环境、社会和经济指标评估体系。高倩倩[11]阐述了河北省牛奶"生产—加工—消费"产业链的发展现状, 但缺少对奶业发展环境问题的分析。甘泉[12]通过文献综述和对比分析, 阐述了全球发达国家和中国奶业产业链的特征, 但该研究缺乏对资源投入、生态环境、经济效益等方面指标的定量分析。上述研究更多地关注了奶牛养殖和产业链发展的定性分析, 缺少定量指标体系和分析。Bai 等[13]分析了中国牛奶生产系统的氮、磷流动状况, Zhang 等[14]分析 1980—2010 年中国牛奶生产的氮素利用效率、

氮素损失和温室气体排放代价, 但仅定量分析了中国奶业资源环境代价, 未能反映奶业发展的社会和经济效益。此外, 国内对奶业可持续发展的分析主要以奶牛养殖环节为研究重点, 尚缺少针对绿色发展在全产业链的分析, 更缺少涉及社会、经济、生产和资源环境多方面指标的系统性定量分析, 且与国际的对标分析不足。

针对农业绿色发展研究, 马文奇等[15]提出了中国农业绿色发展的科学内涵和发展理论, 通过调控政策、资本、服务、技术、产品、知识和工程等 7 个途径, 以协调中国农业绿色发展中经济增长与环境友好的总体目标。基于上述理论, 金欣鹏等[16]确定了中国农业绿色发展“自上而下”与“自下而上”相结合的系统定量研究思路, 构建了农业绿色发展模型耦合分析系统。在此基础上, 张建杰等[17]构建了一套适合开展定量研究和评价中国农业绿色发展的指标体系, 进一步为农业绿色发展研究提供了定量研究的工具。基于上述研究的理论、定量方法和评价工具, 本文立足全产业链, 发展和完善了中国奶业绿色发展指标体系, 定量分析了奶业绿色发展现状及影响因素, 揭示了奶牛生产全产业链发展的瓶颈问题和优化途径, 为我国奶业振兴和绿色发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究边界与指标体系构建原则

本文基于中国农业绿色发展指标体系, 以“饲料种植—奶牛养殖—奶制品加工—奶制品销售—奶制品消费”作为奶业全产业链研究的边界, 从社会发展、经济效益、产品生产、资源投入和生态环境 5 个方面选取 28 项指标(表 1), 发展和完善了中国奶业全产业链绿色发展指标体系。该指标体系的构建充分体现系统性、科学性和可行性原则。其中, 系统性主要体现在对从饲料生产到奶制品消费的全产业链以及从社会、经济、生产、资源和环境多方位的研究; 科学性是指该指标体系采用食物链养分模型(NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use, NUFER)-animal 模型进行定量分析, 且充分考虑了《全国奶业发展规划(2016—2020)》中奶业可持续发展问题和目标; 可行性主要表现在各指标数据有可靠的文献来源, 且较容易获得。鉴于缺少区域调研数据, 本文仅选取其中 21 项主要指标(图 1) , 定量分析我国奶业绿色发展的时空变化特征。奶牛场饲料自给率、粪污循环利用率、体细胞数等指标, 由于暂时没有公开发表的省级统计数据, 需要后续的研究中通过调研和跟踪继续完善。

1.2　指标体系的分级标准

本文各指标分级标准的划分充分考虑了我国不同类型奶牛养殖场的发展现状和优化目标, 对标美国、欧盟(以荷兰为代表)、日本、亚洲和全球平均水平等, 由优到差分为 Ⅰ~Ⅳ 4 个等级。具体分级标准见表 1。

1.2.1　社会发展指标

社会发展指标主要反映奶业产业链终端的奶产品消费水平。人均奶制品消费量的分级充分考虑了亚洲人群普遍乳糖耐受程度低于欧美人群水平, 从优到差依次以亚洲、日本和韩国人均奶制品消费量为分级依据[1]。

1.2.2　经济效益指标

经济效益指标主要反映奶业产业链的经济效益状况。牛奶生产总成本和牛奶生产净利润分别反映奶牛养殖环节生产单位质量牛奶投入的现金、实物、劳动力和土地等所有资源的总成本与净利润, 从优到差分别以文献[18]中全球低、中、高成本以及荷兰[19]、日本[20]和美国最低利润门槛值[21]为分级依据。奶牛产业产值占养殖业产值比重主要反映奶牛养殖业在畜牧生产中的地位, 从优到差依次以欧盟、美国和全球平均[1]为分级依据。奶制品加工成本和利润分别反映奶制品加工系统的资金投入和回报(此处指现金成本和利润)。奶制品产值占食品加工业产值比重反映奶制品加工在食品加工业的地位。奶制品销售总成本和净利润反映奶制品销售环节各种费用投入和净回报。

1.2.3　产品生产指标

产品生产指标在奶业绿色发展中反映牛奶(奶制品)的生产水平。种养系统氮素利用效率反映种养系统的氮素转化效率, 从优到差以美国[22]、荷兰[23]和全球平均水平[24]种养结合奶牛场氮素利用效率为分级依据。奶牛单产反映奶牛养殖的生产力水平, 以美国、欧盟和全球平均奶牛单产[1]为分级依据。人均牛奶占有量主要反映原料奶自给能力, 从优到差以欧盟、美国和全球平均[1]为分级依据。人均奶制品占有量反映加工后奶制品的自给能力。体细胞数主要以单位体积牛奶中体细胞总数量反映牛奶质量, 乳脂肪率主要以牛奶中脂肪的质量占比反映牛奶质量, 蛋白率主要以牛奶中蛋白质的质量占比反映牛奶的质量。

表 1　中国奶业绿色发展评价指标体系

Table 1　Indexes system of green development of dairy industry chain in China

类别 Category	序号 Code	指标 Indicator	单位 Unit	指标分级标准 Standard of indicator grading				产业环节 Industrial sector	指标含义 Implication of indicators
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ		
社会发展 Social development	S1	人均奶制品消费量 Milchigs consumption per capita	kg·cap.$^{-1}$·a^{-1}	>50.0	46.1~50.0	7.3~46.1	<7.3	奶制品消费 Milchigs consumption	居民每人每年牛奶及奶制品的消费量 Consumption of dairy products per capita per year
经济效益 Economic benefits	E1	牛奶生产总成本 Total cost of milk production	¥·kg^{-1}	<1.9	1.9~2.6	2.6~3.9	>3.9	奶牛养殖 Dairy farming	奶牛养殖系统生产单位质量牛奶耗费的现金及劳动力等所有资源的成本总和 Total cost of all resources (e.g. cash, labor) per unit quantity of milk in the dairy farming system
	E2	牛奶生产净利润 Net production profit of milk	¥·kg^{-1}	>1.4	1.0~1.4	0.5~1.0	<0.5	奶牛养殖 Dairy farming	奶牛养殖系统生产单位质量牛奶产生的净回报 Net profit per unit milk in dairy farming system
	E3	奶牛产业占养殖业产值比重 Proportion of production value of dairy industry in livestock industry	%	>33	25~33	21~25	<21	奶牛养殖 Dairy farming	奶牛养殖业(牛奶生产)产值占养殖业产值的百分比 Percentage of production value of dairy industry (milk production) in livestock industry
	E4	奶制品加工成本 Cost of milchigs processing	¥·kg^{-1}	—	—	—	—	奶制品加工 Milchigs processing	奶制品加工系统加工单位质量牛奶的现金成本总和 Total cash input per unit quantity of milchigs in milchigs processing system
	E5	奶制品加工利润 Processing profit of milchigs	¥·kg^{-1}	—	—	—	—	奶制品加工 Milchigs processing	奶制品加工系统加工单位质量牛奶的现金利润 Cash profit per unit quantity of milk in milchigs processing system
	E6	奶制品产值占食品加工业产值比重 Proportion of production value of milchigs industry in food processing industry	%	—	—	—	—	奶制品加工 Milchigs processing	奶制品加工业产值占食品加工业产值的百分比 Percentage of the output value of milchigs processing industry in the total output value of food processing industry
	E7	奶制品销售总成本 Total cost of milchigs sales	¥·kg^{-1}	—	—	—	—	奶制品销售 Milchigs sales	奶制品销售系统售卖单位质量牛奶耗费的现金、劳动力等所有资源的成本 Cost of all resources (e.g. cash, labor) per unit quantity of milk sales in the milchigs sales system
	E8	奶制品销售净利润 Net profit of milchigs sales	¥·kg^{-1}	—	—	—	—	奶制品销售 Milchigs sales	奶制品销售系统售卖单位质量牛奶产生的净回报 Net return per unit quantity of milk by dairy sales system
产品生产 Production	P1	种养系统氮素利用效率 Nitrogen use efficiency of crop-livestock system	%	>28.6	24.8~28.6	16.0~24.8	<16.0	饲料种植+奶牛养殖 Feed planting + dairy farming	“饲料种植-奶牛养殖”系统牛奶、牛肉等的氮素携出量与化肥氮投入、生物固氮、大气氮沉降和进口饲料氮素投入之和的比值 Ratio of nitrogen in milk and beef to nitrogen in chemical fertilizer, biological nitrogen fixation, atmospheric nitrogen deposition and imported feed nitrogen in feed planting and dairy farming
	P2	奶牛单产 Milk yield per cow	t·head^{-1}·a^{-1}	>9.6	6.2~9.6	2.3~6.2	<2.3	奶牛养殖 Dairy farming	单位泌乳牛全年牛奶产量 Annual milk production per lactating cow
	P3	人均牛奶占有量 Milk per capita	kg·cap.$^{-1}$	>294	283~294	87~283	<87	奶牛养殖 Dairy farming	当年区域内牛奶总产量与人口的比值 Ratio of total milk production to population in the whole year
	P4	人均奶制品占有量 Milchigs per capita	kg·cap.$^{-1}$	—	—	—	—	奶制品加工 Milchigs processing	当年区域内奶制品加工总产量与人口的比值 Ratio of total production of milchigs to population in the whole year

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

类别 Category	序号 Code	指标 Indicator	单位 Unit	指标分级标准 Standard of indicator grading				产业环节 Industrial sector	指标含义 Implication of indicators
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ		
产品生产 Production	P5	体细胞数 Somatic cell count	$\times10^4\cdot mL^{-1}$	—	—	—	—	奶牛养殖 Dairy farming	单位体积牛奶中体细胞总数量 Total number of somatic cells per unit volume of milk
	P6	乳脂肪率 Milk fat percentage	%	—	—	—	—	奶牛养殖 Dairy farming	牛奶中脂肪的质量占比 Amount of fat in the milk by weight
	P7	蛋白率 Milk protein percentage	%	—	—	—	—	奶牛养殖 Dairy farming	牛奶中蛋白质的质量占比 Amount of protein in the milk by weight
资源投入 Resource input	R1	生产单位牛奶蓝水足迹 Blue water footprint per unit milk	$m^3\cdot kg^{-1}$	<0.04	0.04~0.06	0.06~0.09	>0.09	饲料种植 Feed planting	生产单位质量牛奶所需饲料的地表、地下水投入 Input of surface and underground water into feed production for producing 1 kg milk
	R2	生产单位牛奶耕地资源投入量 Land use per unit milk	$m^2\cdot kg^{-1}$	<1.9	1.9~2.5	2.5~4.0	>4.0	饲料种植 Feed planting	用于生产单位质量牛奶所消费饲料需要的土地面积 Land requirement for the feed production for producing 1 kg milk
	R3	生产单位牛奶饲料干物质投入量 Feed dry matter input per unit milk	$kg(DM)\cdot kg^{-1}$	<0.6	0.6~0.7	0.7~1.5	>1.5	奶牛养殖 Dairy farming	生产单位质量牛奶所消耗的饲料干物质 Feed dry matter consumption for producing 1 kg milk
	R4	生产单位牛奶化肥氮投入量 Fertilizer nitrogen input per unit milk	$g(N)\cdot kg^{-1}$	—	—	—	—	饲料种植 Feed planting	生产单位质量牛奶所需作物饲料的化肥氮素投入 Chemical nitrogen fertilizer requirement of feed production for producing 1 kg milk
	R5	饲料自给率 Self-sufficiency rate of feed	%	—	—	—	—	奶牛养殖 Dairy farming	区域自产饲料消费量与饲料总消费量的百分比 Ratio of consumption of home-grown feed to total feed consumption
生态环境 Ecological environment	EN1	养殖系统氨挥发 NH_3 volatilization in farming system	$g(N)\cdot kg^{-1}$	<1.9	1.9~2.5	2.5~12.0	>12	奶牛养殖 Dairy farming	养殖系统生产单位质量牛奶由氨气挥发导致的氮素损失 Nitrogen losses via ammonia volatilization from dairy farming system to produce 1 kg milk
	EN2	养殖系统氮盈余 Nitrogen surplus in farming system	$g(N)\cdot kg^{-1}$	<9.4	9.4~14.2	14.2~27.0	>27.0	奶牛养殖 Dairy farming	养殖系统生产单位质量牛奶导致的氮素损失 Nitrogen losses from dairy farming system to produce 1 kg milk
	EN3	养殖系统温室气体排放 Greenhouse gases emissions in farming system	$kg(CO_2\ eq)\cdot kg^{-1}$	<0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6	奶牛养殖 Dairy farming	养殖系统生产单位质量牛奶产生的温室气体(CO_2 当量)排放 Greenhouse gas (CO_2 equivalent) emissions from dairy farming system to produce 1 kg milk
	EN4	种植系统氨挥发 NH_3 volatilization in planting system	$g(N)\cdot kg^{-1}$	—	—	—	—	饲料种植 Feed planting	饲料种植系统为生产单位质量牛奶所需作物饲料由氨气挥发导致的氮素损失 Nitrogen losses via ammonia volatilization from feed production system to produce 1 kg milk
	EN5	种植系统氮盈余 Nitrogen surplus in planting system	$g(N)\cdot kg^{-1}$	—	—	—	—	饲料种植 Feed planting	饲料种植系统为生产单位质量牛奶所需作物饲料导致的氮素损失 Nitrogen losses from feed production system for producing 1 kg milk
	EN6	种植系统温室气体排放 Greenhouse gases emissions in planting system	$kg(CO_2\ eq)\cdot kg^{-1}$	—	—	—	—	饲料种植 Feed planting	生产单位质量牛奶所需作物饲料的种植过程中温室气体(CO_2 当量)排放 Greenhouse gases (CO_2 equivalent) emissions from feed production system for producing 1 kg milk
	EN7	粪尿循环利用率 Manure recycling rate	%	—	—	—	—	奶牛养殖 Dairy farming	奶牛粪尿还田量与总粪尿产生量的比值 Ratio of amount of manure applied to the field to the total manure excretion of dairy cattle

http://www.ecoagri.ac.cn

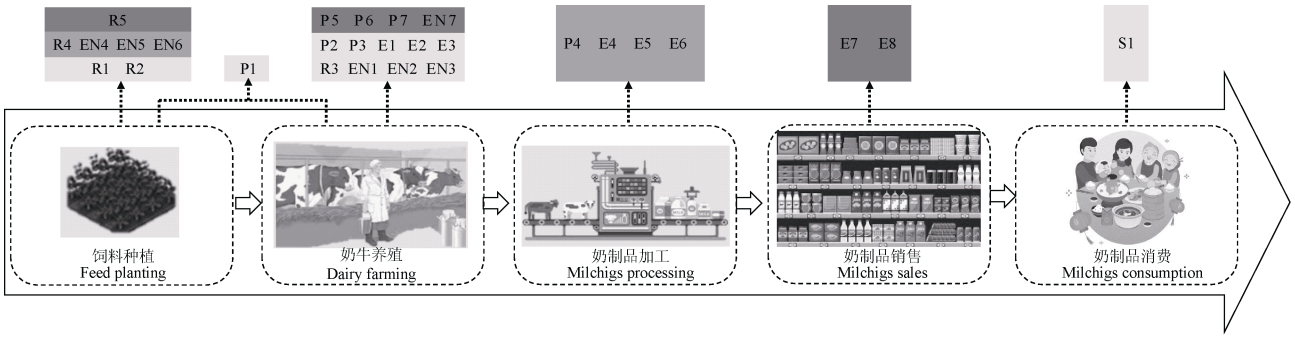

图 1 奶业产业链研究边界与指标体系

Fig. 1 Research boundary and indicators of the whole dairy industry chain

图中字母含义如表 1 所示，颜色由深到浅分别表示本文中未计算指标、未分级指标和分级指标。The meaning of the letters in the figure is shown in the table 1. Indicators in boxes that color from dark to light are the uncalculated, ungraded and graded indicators, respectively.

1.2.4 资源投入指标

资源投入指标是指饲料生产和奶牛养殖的资源投入。生产单位牛奶蓝水足迹反映作物饲料种植系统地表、地下水资源的投入状况(由于奶牛养殖系统蓝水数据较难获取且占比小，因此本文未考虑)，从优到差依次以文献[25]中荷兰、美国和全球平均为分级依据。生产单位牛奶耕地资源投入量反映牛奶生产所需饲料生产的土地需求状况，从优到差依次以美国[26]、欧盟[27]和世界平均水平[28]为依据。生产单位牛奶饲料干物质投入量反映奶牛养殖的饲料转化效率，从优到差依次以美国[29]、欧盟[29]和世界平均水平[24]为依据。生产单位牛奶化肥氮投入量反映生产奶牛所需饲料的氮肥投入状况。饲料自给率反映奶牛饲料的本地自给水平。

1.2.5 生态环境指标

生态环境指标指生产牛奶(奶制品)的氮素环境排放、温室气体排放等。养殖系统氨挥发指奶牛养殖系统生产单位质量牛奶以氨气挥发形式导致的氮素损失，从优到差依次以美国[30]、荷兰[31]和全球平均水平[32]为分级依据。养殖系统氮盈余指奶牛养殖系统生产单位质量牛奶导致的氮素表观损失，NUFER-animal 模型中表现为奶牛粪污氮排泄量，即饲料氮投入与奶牛增重和牛奶氮素携出量的差值，主要反映牛奶生产的氮素环境代价，从优到差依次以美国、欧盟和全球平均[1]为分级依据。养殖系统温室气体排放反映奶牛养殖系统反刍作用和粪污产生的温室气体数量，从优到差依次以美国、欧盟和全球平均[1]为分级依据。种植系统氨挥发主要反映奶牛饲料种植环节由于氨气挥发导致的氮素环境损失。种植系统氮盈余主要反映奶牛饲料种植环节导致的氮素环境表观损失。种植系统温室气体排放主要反映饲料种植系统饲料生产的温室气体排放量。粪尿循环利用率反映奶牛粪尿还田比率和种养结合程度。

1.3 数据来源与计算方法

本研究数据获取主要基于统计年鉴与奶产业发展的各类行业统计资料。人均奶制品消费量和人均牛奶占有量来源于《中国统计年鉴》，奶牛养殖业和养殖业产值来源于 FAO 数据库和《中国畜牧兽医年鉴》，牛奶生产总成本和牛奶生产净利润来源于《全国农产品成本收益汇编》，奶制品加工成本、奶制品加工利润、奶制品产值占食品加工业产值比重、人均奶制品占有量来源于《中国奶业统计摘要》，奶牛单产来源于《中国奶业统计资料》。

采用 NUFER-animal 模型[33]计算了种养系统氮素利用效率、生产单位牛奶产品的蓝水足迹、耕地资源投入、饲料干物质投入、化肥氮投入、养殖系统氨挥发、养殖系统氮盈余、养殖系统温室气体排放、种植系统氨挥发、种植系统氮盈余和种植系统温室气体排放等指标。

2 结果与分析

2.1 中国奶业社会发展指标时空变化特征

1990—2017 年中国人均奶制品消费量稳步提高(图 2a)，已由Ⅳ级(2.0 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})提升至Ⅲ级(12.5 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})，但仍与日本(46.1 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})存在较大差距。城乡居民消费差异显著，城镇人均奶制品消费量快速增加(图 2b)，于 2000 年达到Ⅲ级(11.6 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})，2010 年达到峰值(18.1 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})，后小幅度下降；农村人均奶制品消费量变化呈现先平稳后增加的趋势(图 2c)，但是依旧处于Ⅳ级水平(6.9 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})。

2017 年中国多数省份人均奶制品消费量处于Ⅲ级，西南和华中地区更低(Ⅳ级)(图 3a)；海南城镇人均奶制品消费量处于Ⅳ级水平(6.6 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1})，其余省份均为Ⅲ级水平(图 3b)；农村人均奶制品消费量在华北、华东、西北和西南地区北部的大部分省份达到Ⅲ级水平(图 3c)。

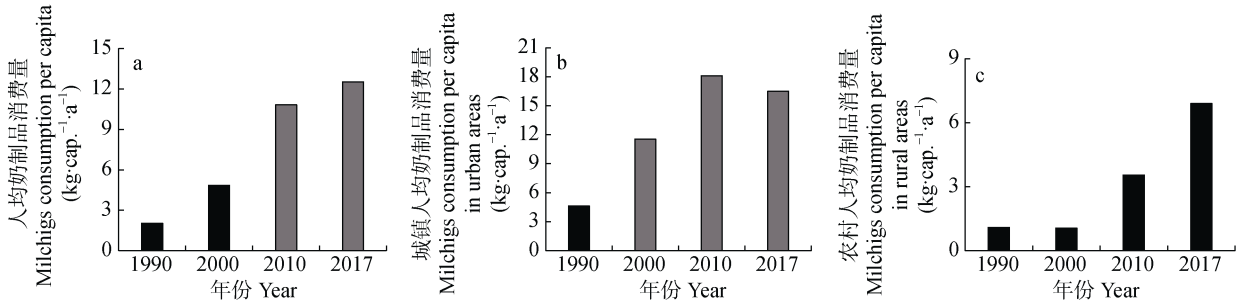

图 2　1990—2017 年中国奶业社会发展指标历史变化特征

Fig. 2　Temporal characteristics of social development indicators of dairy industry in China in 1990–2017

深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级。The dark grey and black mean levels Ⅲ and Ⅳ, respectively.

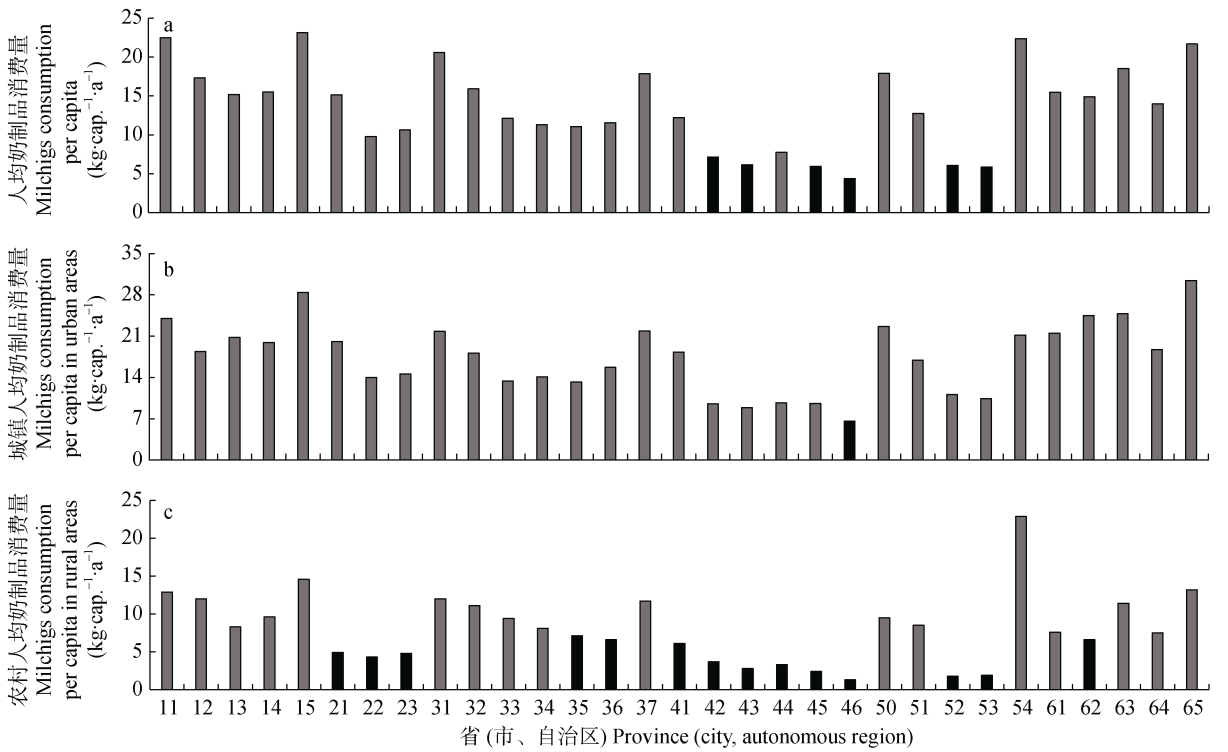

图 3　2017 年中国奶业社会发展指标空间分布特征

Fig. 3　Spatial characteristics of social development indicators of dairy industry in China in 2017

深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级。各个省、直辖市、自治区划的代码分别为: 11, 北京市; 12, 天津市; 13, 河北省; 14, 山西省; 15, 内蒙古自治区; 21, 辽宁省; 22, 吉林省; 23, 黑龙江省; 31, 上海市; 32, 江苏省; 33, 浙江省; 34, 安徽省; 35, 福建省; 36, 江西省; 37, 山东省; 41, 河南省; 42, 湖北省; 43, 湖南省; 44, 广东省; 45, 广西省; 46, 海南省; 50, 重庆市; 51, 四川省; 52, 贵州省; 53, 云南省; 54, 西藏自治区; 61, 陕西省; 62, 甘肃省; 63, 青海省; 64, 宁夏回族自治区; 65, 新疆维吾尔族自治区。未包含台湾省、香港特别行政区、澳门特别行政区数据。The dark grey and black mean levels Ⅲ and Ⅳ, respectively. The province (city, autonomous region) name of each code is: 11, Beijing; 12, Tianjin; 13, Hebei; 14, Shanxi; 15, Inner Mongolia; 21, Liaoning; 22, Jilin; 23, Heilongjiang; 31, Shanghai; 32, Jiangsu; 33, Zhejiang; 34, Anhui; 35, Fujian; 36, Jiangxi; 37, Shandong; 41, Henan; 42, Hubei; 43, Hunan; 44, Guangdong; 45, Guangxi; 46, Hainan; 50, Chongqing; 51, Sichuan; 52, Guizhou; 53, Yunnan; 54, Tibet; 61, Shaanxi; 62, Gansu; 63, Qinghai; 64, Ningxia; 65, Xinjiang. The data of Taiwan, Hong Kong and Macao are not included in this paper.

2.2　中国奶业经济效益指标时空变化特征

中国奶业发展存在利润低、成本高、产业发展水平低的特征。2000 年以来，中国牛奶生产总成本在逐年增加，由Ⅰ级(1.6 ¥·kg^{-1})降低至Ⅲ级水平(2.9 ¥·kg^{-1})，与全球其他国家相比，属于牛奶生产高成本水平(图 4a)。牛奶生产净利润有所增加，由Ⅳ级(0.4 ¥·kg^{-1})提升至Ⅲ级水平(0.8 ¥·kg^{-1})(图 4b)，距日本水平(1.0 ¥·kg^{-1})相差 0.2 ¥·kg^{-1}。奶牛产业产值占养殖业产值比重先增加后降低(图 4c)，2010 年达到峰值(5.9%)，但未突破Ⅳ级水平。奶制品加工系统经济效益指标的变化趋势与奶牛养殖系统相似(图 4d-4f)，但奶制品加工成本和奶制品产值占食品加工业产值比重更高，奶制品加工利润较低。

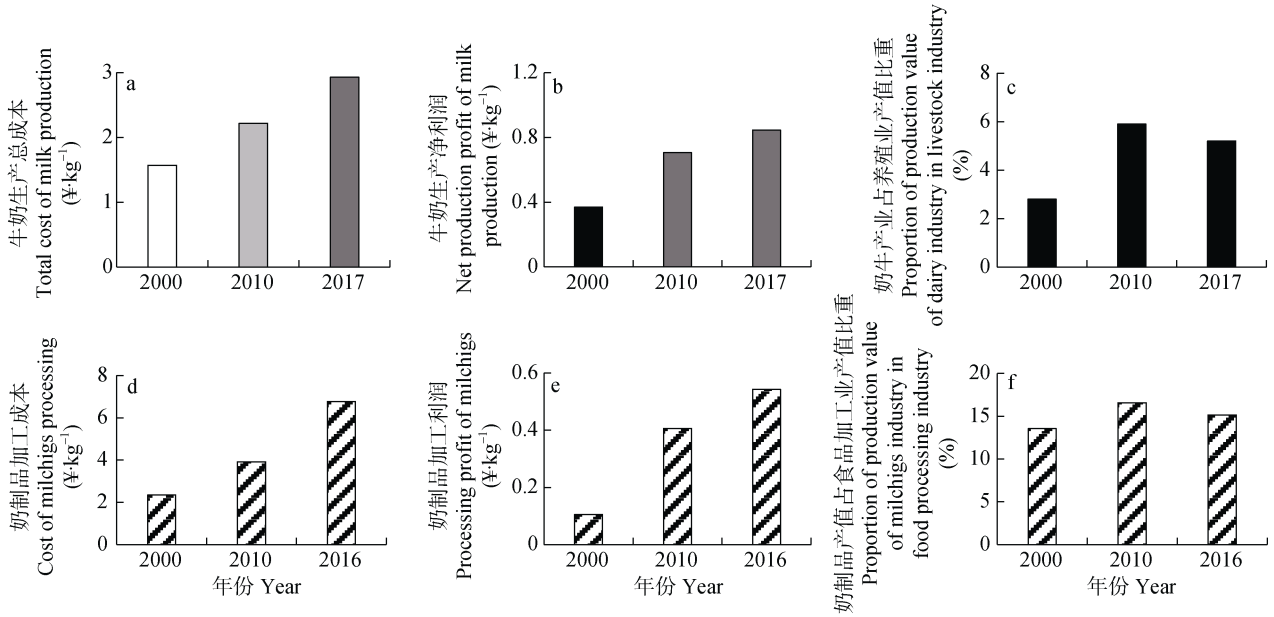

图 4 2000—2017(2000—2016)年中国奶业经济效益指标历史变化特征

Fig. 4 Temporal characteristics of economic benefits indicators of dairy industry in China in 2000–2017 (2000–2016)

白色表示Ⅰ级，浅灰色表示Ⅱ级，深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。The white, light grey, dark grey and black mean levels Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively; the oblique line means ungraded indicators.

2.3 中国奶业产品生产指标时空变化特征

近 30 年来，中国奶业产品生产指标总体状况有较大改善，但与发达国家相比，产品生产整体水平较低。1990—2017 年奶牛单产水平不断提高，由Ⅲ级(2.4 t·head^{-1}·a^{-1})提升至Ⅱ级水平(7.0 t·head^{-1}·a^{-1})，但与美国(9.6 t·head^{-1}·a^{-1})相比，还存在较大差距(图 5a)。种养系统氮素利用效率由 8.4%提升至 14.4%(图 5b)，但依旧低于荷兰(17%)，未突破Ⅳ级水平。人均牛奶占有量先大幅度升高后小幅度下降(图 5c)，2010 年达到最高值(22.7 kg·cap.$^{-1}$)，依旧处于Ⅳ级水平，仅为全球平均水平(87 kg·cap.$^{-1}$)的 1/4。2000—2017 年人均奶制品占有量不断增加(由 6.3 kg·cap.$^{-1}$增加至 33.4 kg·cap.$^{-1}$)(图 5d)，增加了 4.3 倍，但 2010 年后增长速度变缓。

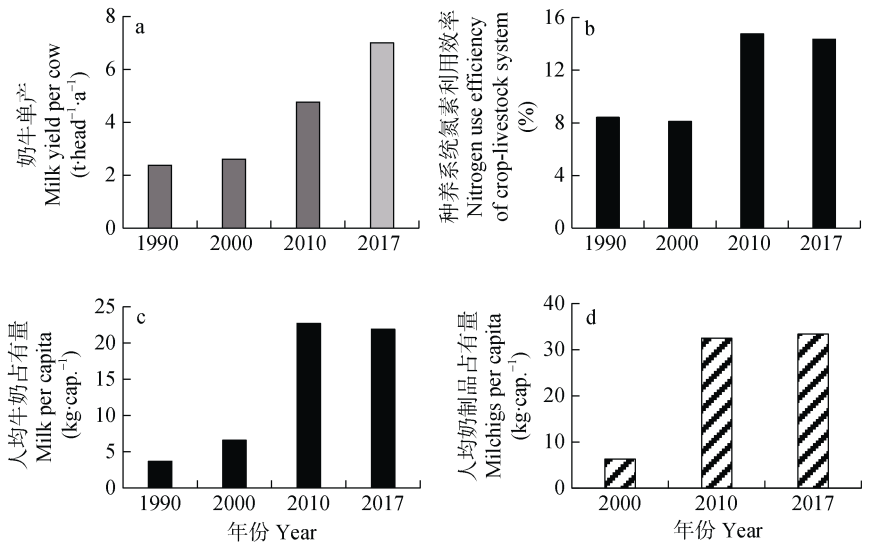

图 5 1990—2017 年中国奶业生产指标历史变化特征

Fig. 5 Temporal characteristics of production indicators of dairy industry in China in 1990–2017

浅灰色表示Ⅱ级，深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。The light grey, dark grey and black mean levels Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively; the oblique line means ungraded indicators.

2017 年中国奶业产品生产指标空间差异较大, 发展水平较低。如图 6a 所示, 除湖南、新疆和西藏外, 其他地区奶牛单产均达到III级水平, 其中, 上海(9.8 $t \cdot head^{-1} \cdot a^{-1}$)是唯一达到 I 级水平的地区; 农牧交错带及东部沿海地区基本达到 II 级; 种养系统氮素利用效率较低(图 6b), 农牧交错带大部分省份达到III级水平, 其他地区基本处于IV级水平; 人均牛奶占有量仅黑龙江、内蒙古、宁夏和西藏地区达到III级(图 6c), 其他地区均处于IV级; 人均奶制品占有量华北地区明显高于其他地区(图 6d), 其次为西北和华东部分地区, 华中、华南和西南地区相对较低。西北地区人均牛奶占有量高于人均奶制品占有量, 东部沿海地区人均奶制品占有量略高于人均牛奶占有量。

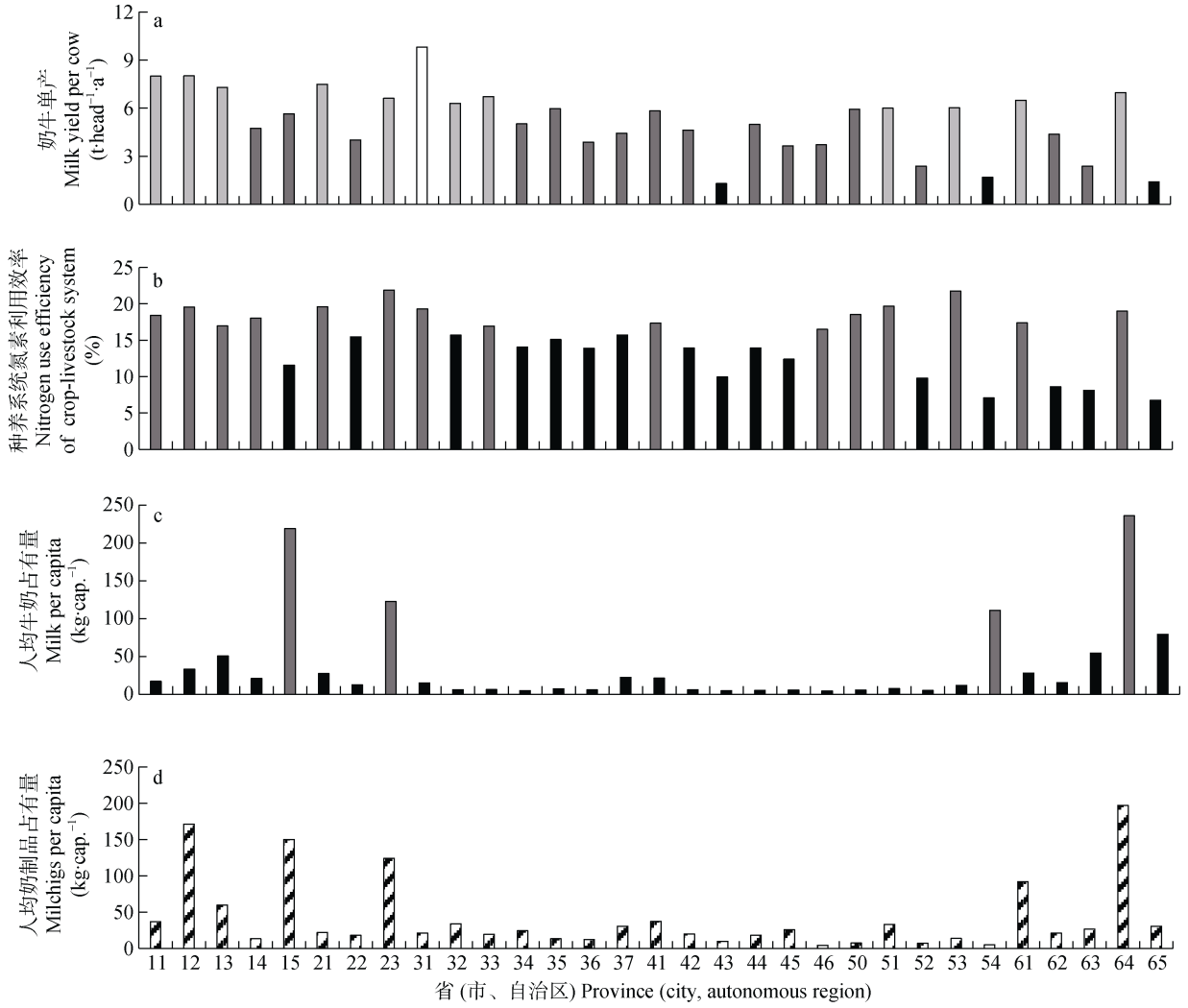

图 6　2017 年中国奶业产品生产指标空间分布特征

Fig. 6　Spatial characteristics of production indicators of dairy industry in China in 2017

白色表示 I 级, 浅灰色表示 II 级, 深灰色表示III级, 黑色表示IV级, 斜线表示未分级指标。各省、直辖市、自治区划的代码见图 3。The white, light grey, dark grey and black mean levels Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively. The oblique line means ungraded indicators. The code of each province (city, autonomous region) is shown in the figure 3.

2.4　中国奶业资源投入指标时空变化特征

1990—2017 年, 中国牛奶生产向资源节约型发展, 生产单位牛奶的资源投入均呈下降的趋势, 在 1990—2010 年间大幅度下降, 2010—2017 年下降速度变缓或出现小幅度提升。如图 7a, 生产单位牛奶蓝水足迹虽然不断下降(由 0.5 $m^3 \cdot kg^{-1}$ 下降至 0.2 $m^3 \cdot kg^{-1}$), 但依旧处于IV级水平, 是美国(0.06 $m^3 \cdot kg^{-1}$)的 3.3 倍。如图 7b, 生产单位牛奶耕地资源投入量由IV级(18.5 $m^2 \cdot kg^{-1}$)提升至III级水平(3.3 $m^2 \cdot kg^{-1}$), 是欧盟(2.5 $m^2 \cdot kg^{-1}$)的 1.3 倍。如图 7c, 生产单位牛奶饲料干物质投入量不断下降[由 5.8 $kg(DM) \cdot kg^{-1}$ 降低至 2.0 $kg(DM) \cdot kg^{-1}$], 始终处于IV级水平。如图 7d, 生产单位牛奶产品的化肥氮投入量呈现降低的趋势[由 27.4 $g(N) \cdot kg^{-1}$ 下降至 19.2 $g(N) \cdot kg^{-1}$, 降幅约 30%]。

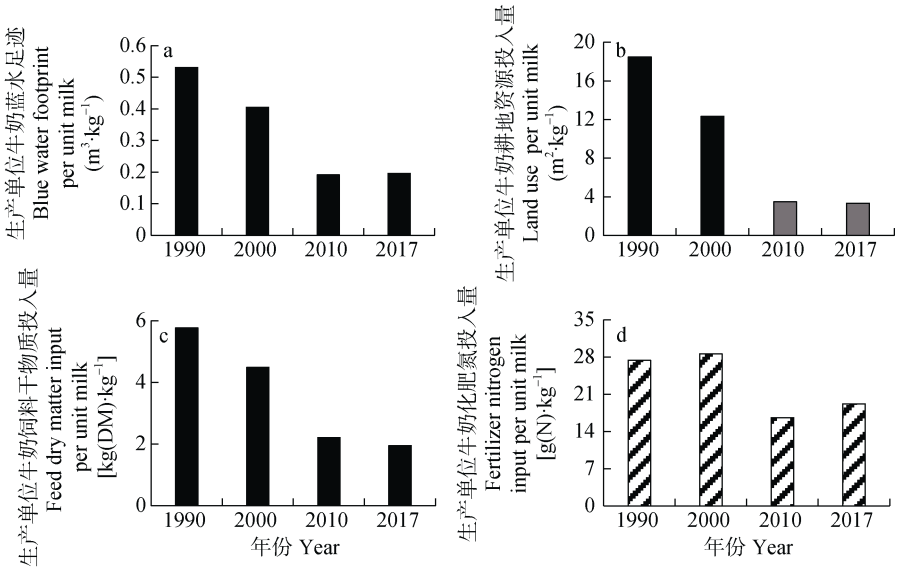

图 7 1990—2017 年中国奶业绿色发展资源投入指标的历史变化特征

Fig. 7 Temporal characteristics of resource input indicators of dairy industry in China in 1990–2017

深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。The dark grey and black mean levels Ⅲ and Ⅳ, respectively. The oblique line means ungraded indicators.

2017 年中国农牧交错带(即“人口分界线”周边)省份资源投入相对较少，但奶业资源投入量总量偏高。全国范围内，生产单位牛奶蓝水足迹和饲料干物质投入水平较低，区域差异较小，前者全国均处于Ⅳ级(图 8a)，后者仅东部部分地区达到Ⅲ级(图 8c)；单位牛奶耕地资源投入区域差异大(图 8b)，仅牧区依旧处于Ⅳ级，其他大部分地区达到Ⅰ级，农牧交错带地区基本低于 1.0 $m^2 \cdot kg^{-1}$；如图 8d 所示，单位牛奶化肥氮投入指标在东北、华北、西南部分地区发展水平相对较高，华南和华中地区普遍偏低。

2.5 中国奶业生态环境指标时空变化特征

1990—2017 年中国奶业生态环境代价不断降低，其趋势为前期(尤其是 2000—2010 年)下降幅度大，后期变缓。如图 9a，养殖系统氨排放量由Ⅳ级[21.9 $g(N) \cdot kg^{-1}$]提升至Ⅲ级[7.0 $g(N) \cdot kg^{-1}$]；养殖系统氮盈余和温室气体排放分别由 86.3 $g(N) \cdot kg^{-1}$ 和 2.8 $kg(CO_2\ eq) \cdot kg^{-1}$ 下降至 31.8 $g(N) \cdot kg^{-1}$ 和 0.8 $kg(CO_2\ eq) \cdot kg^{-1}$ (图 9b 和图 9c)，但两项指标始终处于Ⅳ级水平；种植系统生态环境指标的变化趋势与养殖系统相似，均是先快速下降后趋于平稳或略有回升，但其环境效应明显低于养殖系统。1990—2017 年间，单位牛奶产品生产导致的氨挥发、氮盈余和温室气体排放 3 项生态环境指标中，养殖系统分别占 56%~66%、58%~66%和 71%~82%，是牛奶生产的主要环境污染环节。

2017 年中国奶业生态环境指标状况较差，省域差异相对较小，其中，农牧交错带、东部沿海地区水平相对较高。如图 10a，青藏地区和新疆、湖南的养殖系统氨挥发指标依然为Ⅳ级水平，其他地区均达到Ⅲ级；养殖系统氮盈余和养殖系统温室气体排放在大多省份位于Ⅳ级(图 10b 和图 10c)，而农牧交错带部分省份和浙江、上海处于Ⅲ级，达到全球平均水平；种植系统生态环境指标在农牧交错带、东部沿海水平明显高于周边地区(10d-10f)。

3 讨论

本文在中国农业绿色发展指标体系的基础上，从全产业链视角建立了中国奶业绿色发展指标体系，定量分析了我国奶业全产业链绿色发展的时空特征，进一步分析了与发达国家与地区的差距，揭示了其影响因素、优化策略和产业发展建议，可为我国奶业振兴和绿色发展提供科学依据(图 11)。

3.1 中国奶业全产业链绿色发展指标时空特征

3.1.1 中国奶业社会发展指标时空特征

中国人均奶制品消费量稳步提高，但仍低于发达国家水平，农村居民消费更低，南方地区远低于北方。1990—2017 年间，人均奶制品消费量已从Ⅳ级提升至Ⅲ级水平，但仅为亚洲平均水平的 1/4。城镇居民奶制品消费低于农村，最高相差 5 倍，但 2010 年后增长停滞。空间上，北方地区居民人均奶制品消费量明显高于南方。

3.1.2 中国奶业经济效益指标时空特征

中国奶业经济效益指标具有利润低、成本高、产业发展水平低的特征。中国牛奶生产总成本不断提高，由Ⅰ级下降至Ⅲ级水平，是埃及、阿根廷、印度尼西亚等国的 1.7 倍有余[18]。牛奶生产净利润由

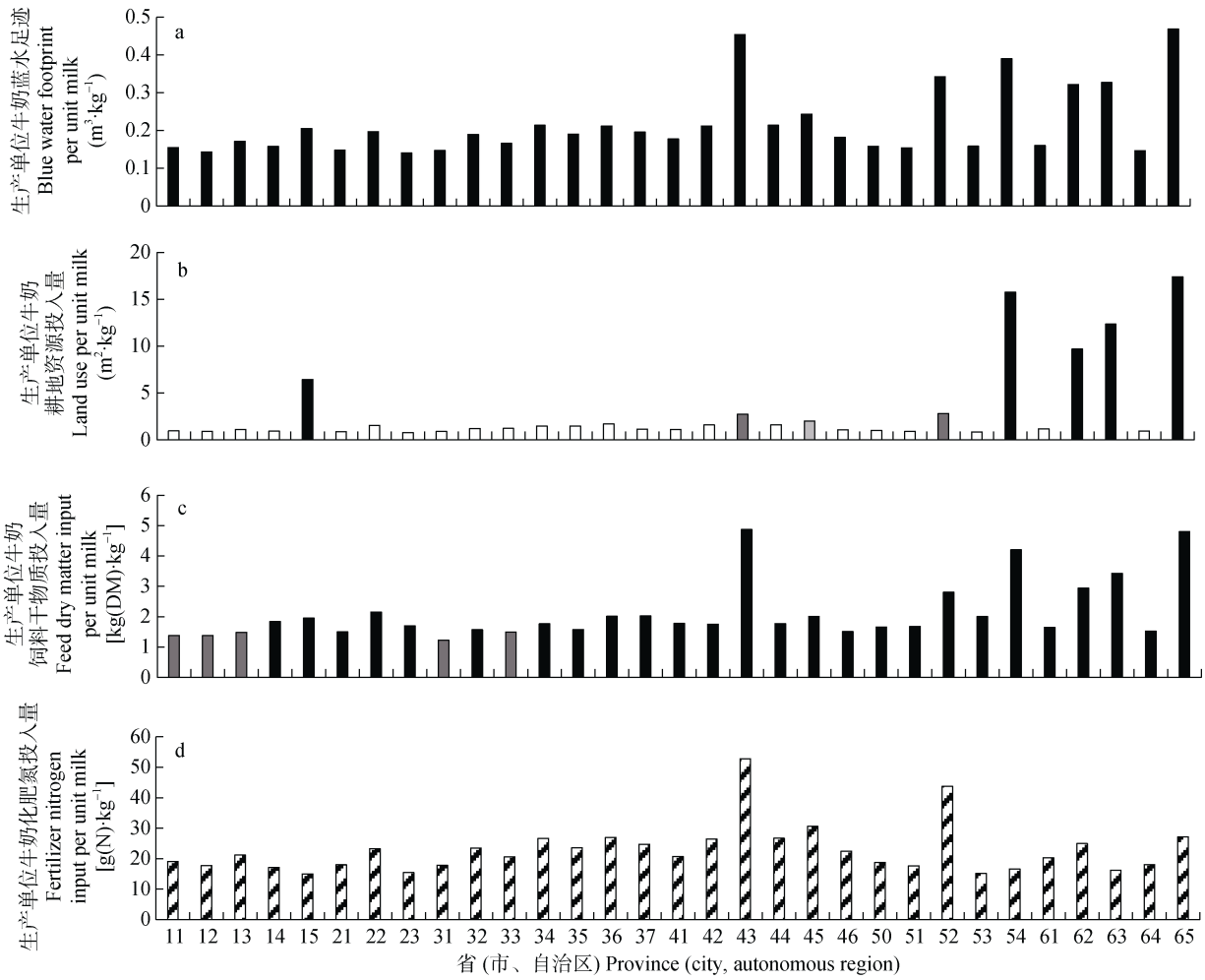

图 8　2017 年中国奶业资源投入指标空间分布特征

Fig. 8　Spatial characteristics of resource input indicators of dairy industry in China in 2017

白色表示Ⅰ级，浅灰色表示Ⅱ级，深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。各省、直辖市、自治区划的代码见图 3。The white, light grey, dark grey and black mean levels Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively. The oblique line means ungraded indicators. The code of each province (city, autonomous region) is shown in the figure 3.

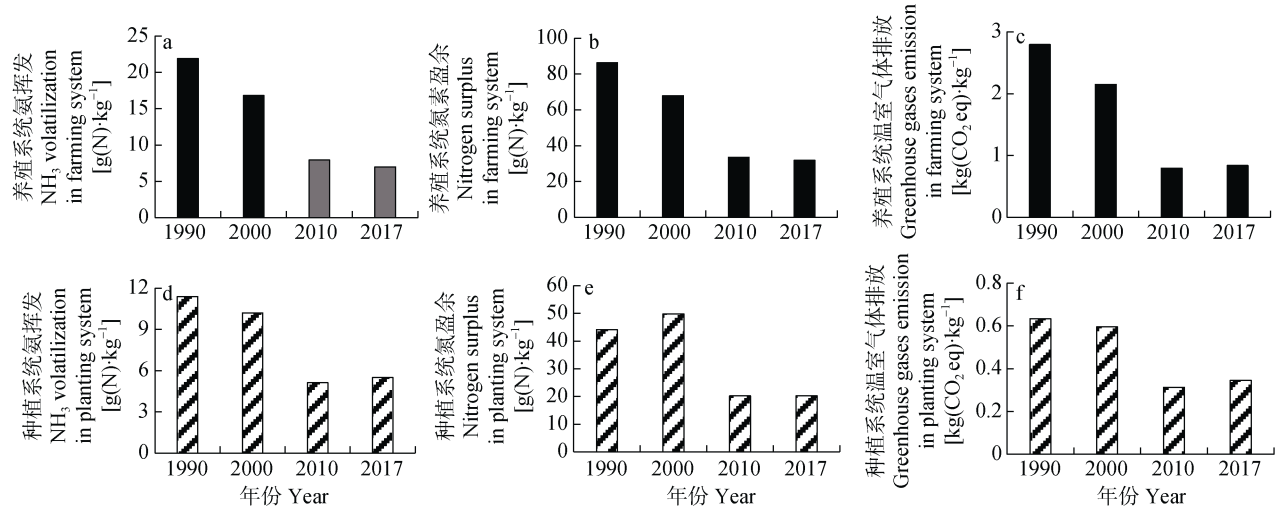

图 9　1990—2017 年中国奶业生态环境指标历史变化特征

Fig. 9　Temporal characteristics of ecological environment indicators of dairy industry in China in 1990–2017

深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。The dark grey and black mean levels Ⅲ and Ⅳ, respectively. The oblique line means ungraded indicators.

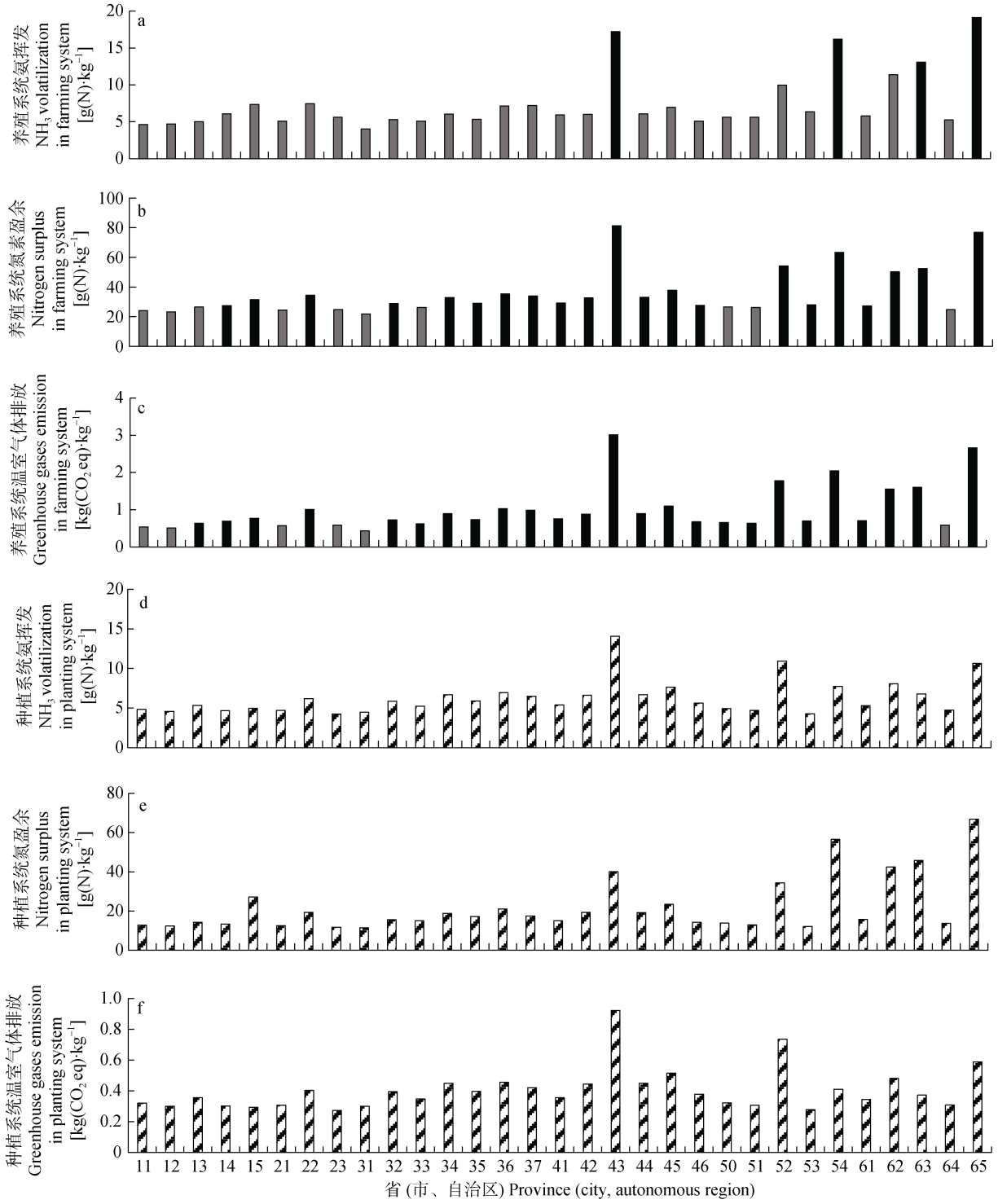

图 10　2017 年中国奶业生态环境指标空间分布特征

Fig. 10　Spatial characteristics of ecological environment indicators of dairy industry in China in 2017

深灰色表示Ⅲ级，黑色表示Ⅳ级，斜线表示未分级指标。各省、直辖市、自治区划的代码见图 3。The dark grey and black mean levels Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively. The oblique line means ungraded indicators. The code of each province (city, autonomous region) is shown in the figure 3.

Ⅳ级提升至Ⅲ级水平，是荷兰的 3/5。奶牛养殖业产值占养殖业产值比重始终处于Ⅳ级水平，仅为全球平均水平的 1/5[1]。

3.1.3　中国奶业产品生产指标时空特征

中国奶业产品生产指标有所改善,奶牛单产达到欧盟平均水平，但是种养系统氮素利用效率、人均牛奶占有量与发达国家相比整体水平较低；农牧交错带地区奶牛单产和种养系统氮素利用效率明显高于其他地区，北方地区人均牛奶占有量和奶制品占有量高于南方。奶牛单产于 2000 年后快速提升，

现已由III级达到II级水平, 高于欧盟水平的 10%, 农牧交错带地区基本达到II级, 但其他地区依旧处于III级或IV级水平; 种养系统氮素利用效率有所提升, 但是始终处于IV级水平, 本文种养系统氮素利用效率略低于马骁远[34](个体水平氮利用效率)和 Zhao 等[35](种养结合奶牛场)的研究, 但与魏莎等[36]研究基本相同。人均牛奶占有量呈现增加的趋势, 但依旧处于IV级水平, 仅为全球平均水平的 1/4, 且南方大部分地区不足全球平均水平的 1/9。人均奶制品占有量与人均牛奶占有量的时空分布规律基本一致。

3.1.4　中国奶业资源投入指标时空特征

中国牛奶生产向资源节约型发展, 生产单位牛奶的资源投入均呈下降趋势, 但远高于发达国家; 农牧交错带省份资源投入相对较少。目前我国生产单位牛奶蓝水足迹尚处于IV级水平, 高于 Mekonnen 等[25]和 Lu 等[37]的研究, 但低于 Wang 等[38]的结果, 部分原因是研究边界的差异, 本文未考虑饮水和圈舍清洗等服务性用水。生产单位牛奶耕地资源投入量达到III级水平, 依旧远低于发达国家, 尤其五大牧区略高于东亚地区放牧模式下耕地投入, 但其他地区均达到 I 级水平, 与东亚种养结合状况下相同[28]。生产单位牛奶饲料干物质投入量不断减少, 尚处于IV级水平, 高于乔雨[39]的研究(个体水平饲料干物质投入)。生产单位牛奶化肥氮投入量的时空变化规律与蓝水足迹基本一致。

3.1.5　中国奶业生态环境指标时空特征

中国奶业生态环境代价不断降低, 但是还远远高于全球平均水平; 区域间差异较小, 农牧交错带、东部沿海地区水平相对较高。养殖系统氨排放已经由IV级提升至III级水平, 而养殖系统氮盈余和养殖系统温室气体排放依旧处于IV级水平, 3 项指标在农牧交错带和东部沿海地区的水平相对较高, 氮盈余和温室气体的时空分布规律与 Zhang 等[14]和王效琴等[40]研究结果一致。种植系统的生态环境指标变化与养殖系统相似, 但数值相对较低。

3.2　中国奶业绿色发展指标的影响因素

针对上述我国奶业全产业链绿色发展指标时空特征, 各类指标的影响因素如下(图 11):

3.2.1　中国奶业社会发展指标的影响因素

20 世纪 90 年代以来,在技术进步和政策双重驱动下, 中国奶业快速与稳定发展。随着经济水平、营养膳食观念的改善, 奶制品消费量逐步提高[41], 但受到乳糖不耐症[42]等影响, 奶制品消费水平依旧较低。受低收入、消费习惯和乳品流通渠道不畅等因素的影响[43], 农村奶制品消费始终低于城镇, 且受三聚氰胺奶制品安全的影响, 2010 年后城镇居民奶制品消费数量没有增加[44]。因此, 当前奶制品消费面临的主要问题包括: 奶制品质量、奶制品销售渠道、消费习惯和乳糖耐受程度。

3.2.2　中国奶业经济效益指标的影响因素

牛奶生产总成本和牛奶生产净利润上升, 主要原因在于饲料和原料奶价格上涨[45-46]。与美国相比, 中国饲草种植环节高昂的土地成本、机械租赁和人工成本[45]、养殖户缺少定价权利[47]、种植结构与养殖需求的不匹配[5]等因素阻碍了中国奶牛养殖业的发展。此外, 奶制品需求、产业经济效益[47]、奶制品进口[48]、生产格局的变化[49]、“三聚氰胺”等安全事件[50]等也会影响奶业发展。而奶制品加工企业间竞争激烈, 销售环节压价使得奶制品加工利润和产值减低, 产业发展受到影响[51]。

3.2.3　中国奶业产品生产指标的影响因素

早期中国牛奶生产以黄牛为主[52], 单产较低, 2000 年后良种奶牛引进[53]提高了奶牛单产, 但是在动物营养、遗传学、管理和健康等方面的进步不足, 使其水平远低于美国等畜牧业发达的国家[9]。奶牛单产的增加提高了种养系统氮素利用效率(图 12a), 但2010—2017年间集约化模式下较高的饲料粮投入和种养分离[33]使种养系统氮素利用效率略有降低。由于奶制品需求的增加拉动了牛奶总产量和进口的增长(图 12b), 人均牛奶和奶制品占有量均呈现增加的趋势。2000—2010 年, 奶牛数量的大幅度增加, 极大地促进了牛奶产量的增长[14,20], 但2010—2017 年间, 受“三聚氰胺”事件、生产的高成本和低利润、散养户退出市场等因素影响, 牛奶产量未见增加[49,54-55]。因此, 奶牛育种和养殖技术、种养分离是影响奶业生产效率的重要因素。

3.2.4　中国奶业资源投入和生态环境指标的影响因素

如图 12c 和 12d, 当前生产单位牛奶所需资源环境代价受奶牛单产影响, 随着奶牛单产提高, 奶牛养殖的生产效率、资源投入、生态环境代价等指标水平也逐步提高[9]。因此, 中国奶业资源投入与生态环境指标的时空变化规律与奶牛单产相似。集约化种养分离的养殖模式下, 受粪污管理水平低和环保费用高等因素影响[47], 奶牛养殖业的养分和温室气体环境排放高, 对生态环境的负面影响较大。

3.3　中国奶业全产业链绿色发展建议和优化策略

针对我国奶业全产业链绿色发展指标时空特征和影响因素的分析, 本文提出的优化策略如下(图 11):

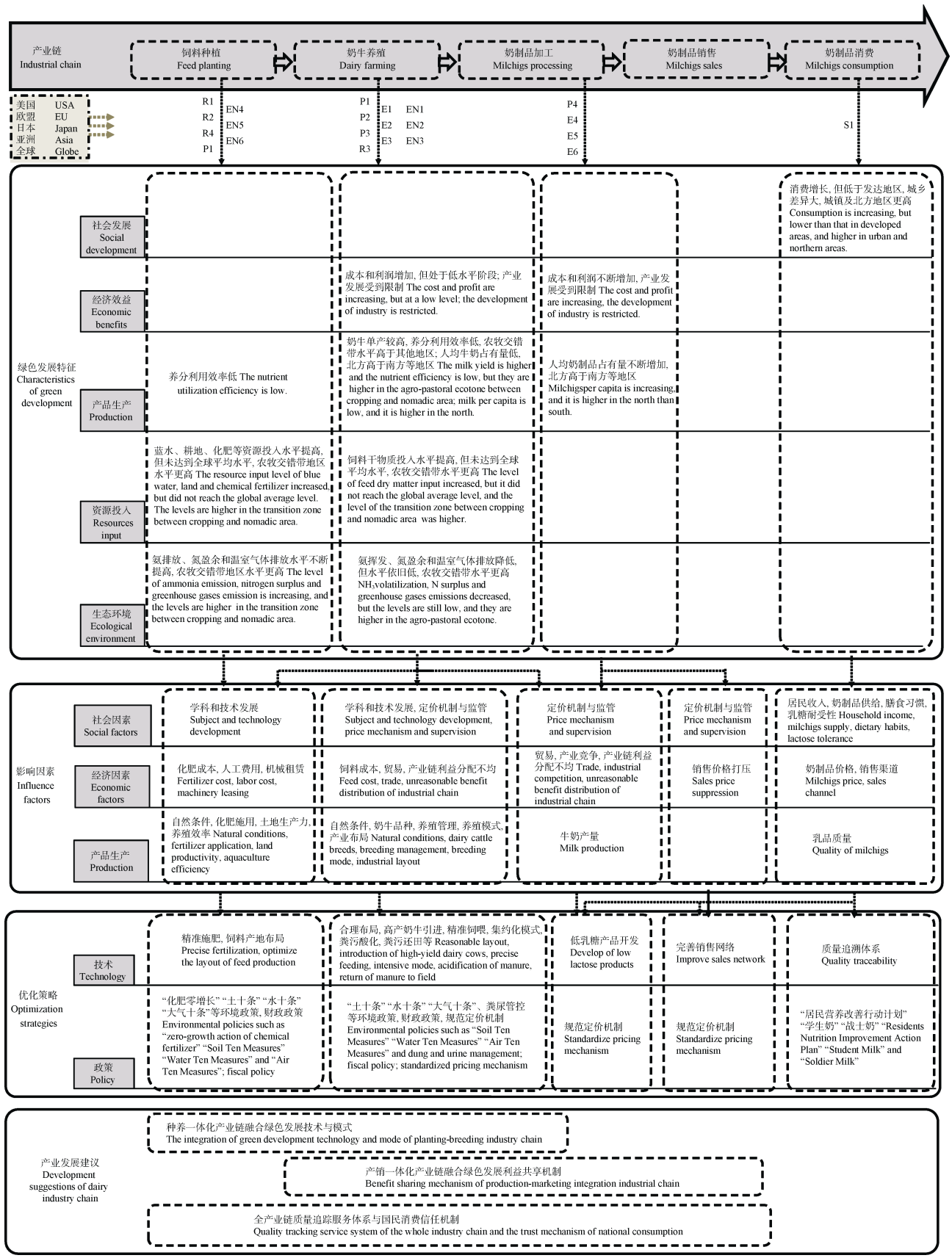

图 11 中国奶业产业链绿色发展的特征、影响因素和优化策略

Fig. 11 Characteristics, influence factors, and optimization strategies of green development of dairy industry chain in China

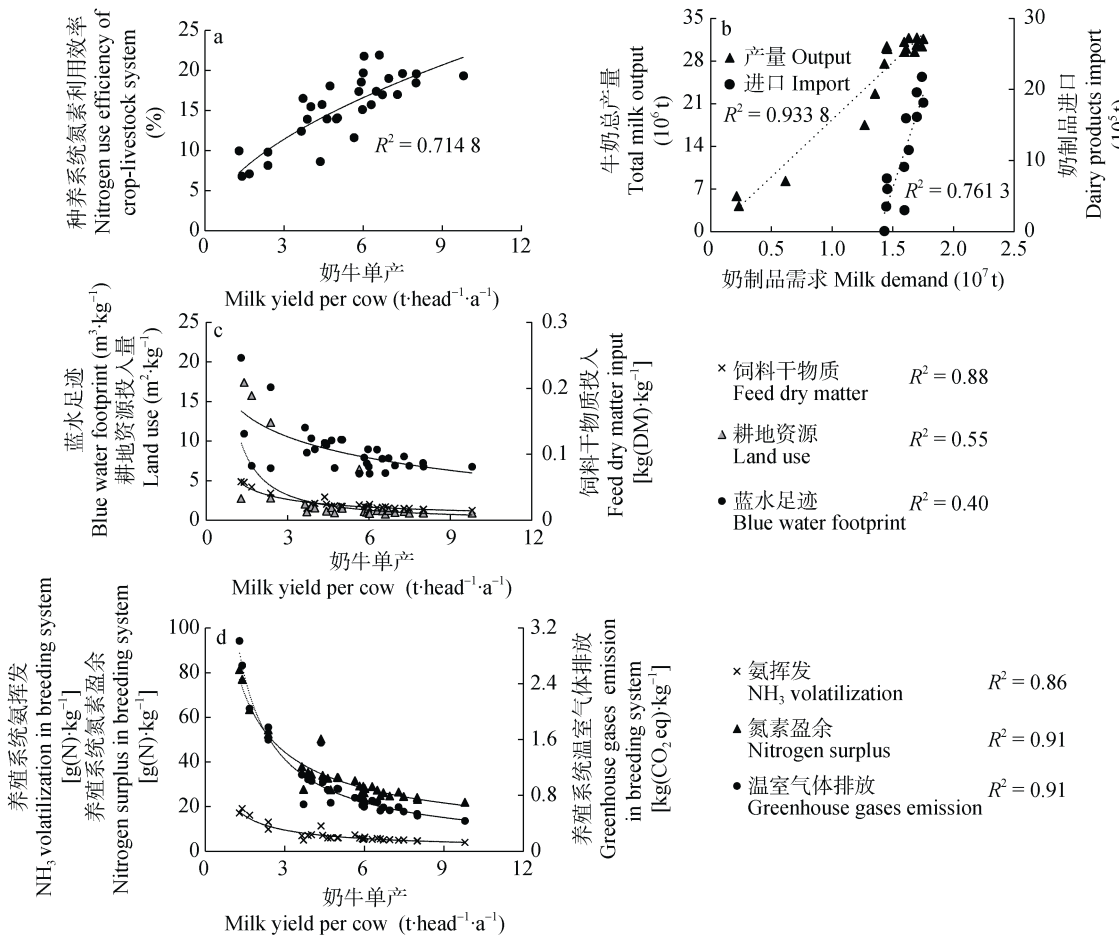

图 12　中国奶业绿色发展驱动因素分析

Fig. 12　Driving factors of the green development of dairy industry in China

3.3.1　种养一体化产业链融合绿色发展技术与模式

当前，我国牛奶生产种养系统氮素利用效率尚低于全球平均水平，使得生产单位牛奶化肥氮投入量、种植系统氮盈余、养殖系统氮盈余和环境排放等过高，种养分离是中国奶业发展中系统养分利用降低的重要原因[33]，促进粪污还田不仅可以提高养分的循环率，还可以减少粪尿养分损失和化肥的投入。荷兰 De Marke 农场采用“土地利用-作物管理-畜禽养殖-粪尿管理”的综合管理技术，真正实现种养一体化产业融合[56]。荷兰的畜禽粪尿管理政策及欧盟《硝酸盐指令》(Nitrate Directive, ND)中，规定了有机肥施用方法、用量、时间等，促进种养一体化[57]。美国通过《综合养分管理计划》(Comprehensive Nutrient Management Plan, CNMP)等充分利用有机肥料，减少化肥投入，提高土壤肥力[58]。中国应该构建基于绿色发展的种养一体化的技术与模式，促进养分在种植和养殖环节的循环，提高养分利用效率，减少资源环境代价。具体优化建议为: 1)加强奶牛养殖育种和生产技术的研究和人才培养，合理布局奶牛养殖区域，引入高产奶牛，精准饲喂[59]，集约化和标准化发展[60]；2)设定合理的养殖密度，合理安排粪污存储条件和时间，采用漏缝地板、覆盖、酸化、干湿分离和粪肥还田等措施[61-64]，有效降低氮磷损失和温室气体排放；3)合理布局优质苜蓿等饲料种植方案[65]，依靠土壤-作物系统综合管理技术，保障作物产量、减少饲料种植环节资源投入和污染[66]，并结合“化肥零增长”等政策促进畜禽粪尿养分循环，真正实现种养一体化的绿色生产模式[67]。

3.3.2　产销一体化产业链融合绿色发展利益共享机制

牛奶生产净利润不断上升，但依旧低于国际领先水平。奶制品加工企业在很大程度上控制了原料奶定价主动权，而超市对奶制品的压价等不合理价格机制使得奶牛养殖户处于被动地位，影响了牛奶生产净利润和产业的健康发展[68]。同时，奶制品销售环节过多[69]也是增加奶制品销售价格的重要原因，进而影响奶制品消费。新西兰的奶农和乳品企业股份共享机制很好地缓解了奶牛养殖和奶制品加工之

间利益分配的矛盾, 实现了合理的利润分配[69]。荷兰奶牛养殖场与乳企也紧密关联, 建立了合理且较为完善的定价体制, 根据牛奶质量、奶牛饲养方式和环境指标等确定原料奶价格, 也缓解了奶牛养殖场和奶制品加工企业的利益关冲突, 同时促进奶业绿色发展[70]。实现牛奶生产、奶制品加工和奶制品销售全产业链融合、利益共享和绿色发展, 不仅可以减少奶业产业链各主体的利益冲突, 保障奶源质量稳定, 还能提高奶产业的国际竞争力, 促进我国奶业绿色发展[11,71]。

3.3.3 全产业链质量追踪服务体系与国民消费信任机制

牛奶及奶制品质量是影响奶制品消费量和牛奶产量的重要因素, 进而影响奶牛养殖业和奶制品加工业。20 世纪末期, 美国构建了“农场到餐桌”的食品安全监管体系, 以保障农产品消费安全。2006 年欧盟开始关注食品生产、存储、运输和销售的全程监控[72]。中国的山东、北京、上海等地区对蔬菜、水果、畜产品等增加生产信息和企业标签, 以保障消费者了解产品的质量安全信息[72]。建立奶业全链条的质量追踪服务系统, 统筹乳业产业链均衡发展, 推进产业链的优化升级, 保证产业良好的信息传递渠道, 以保障乳品质量[71], 赢得国民的消费信心, 促进产业健康和绿色发展。建议通过完善销售网络、提高乳产品质量和加工水平、奶制品健康理念宣传、“居民营养改善行动计划”[52,73]、开发低乳糖产品等措施, 促进居民(尤其是农村和南方地区)奶制品消费, 实现全民饮奶。

4 结论

本文所构建的中国奶业绿色发展指标体系可以作为奶业全产业链绿色发展的评价工具, 能够定量分析奶业资源投入、产品生产、生态环境、经济效益和社会发展等 5 个方面的时空变化特征。我国奶业绿色发展特征包括: 1)人均奶制品消费量稳步提高, 从 2.0 kg·cap.$^{-1}$·a^{-1} 增加到 12.5 kg·cap^{-1}·a^{-1}; 2)奶牛单产水平不断提高, 从 2.4 t·head^{-1}·a^{-1} 增加到 7.0 t·head^{-1}·a^{-1}, 种养系统氮素利用效率由 8.4%提升至 14.4%; 3)单位牛奶的资源投入和环境代价均呈现下降的趋势, 生产单位牛奶蓝水足迹由 0.5 m^3·kg^{-1} 降低到 0.2 m^3·kg^{-1}, 耕地资源投入量由 18.5 m^2·kg^{-1} 降低到 3.3 m^2·kg^{-1}; 4)养殖系统氨挥发量指标由 21.9 g(N)·kg^{-1} 降低到 7.0 g(N)·kg^{-1}; 5)牛奶生产和加工成本逐年增加; 6)空间特征分析表明: 农牧交错带和东部沿海地区产品生产、资源投入和生态环境绿色发展水平相对较高, 北方地区牛奶及奶制品的生产、消费水平均高于南方地区。基于上述奶业全产业链指标体系的分析, 本文提出实行种养一体化产业链融合绿色发展技术与模式、构建产销一体化产业链融合绿色发展利益共享机制、形成全产业链质量追踪服务体系与国民消费信任机制是促进中国奶业振兴和绿色发展的有效途径。

参考文献 References

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO).Data[DB/OL]. (2020-6-16) [2020-7-1]. http://www.fao. org/faostat/en

[2] 李胜利, 刘长全, 夏建民, 等. 2018 年我国奶业形势回顾与展望[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(3): 129–132
LI S L, LIU C Q, XIA J M, et al. Review and prospect of China dairy industry in 2018[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(3): 129–132

[3] 中华人民共和国工业和信息化部. 全国奶业发展规划(2016—2020 年)[EB/OL]. (2016-12-27)[2017-01-11]. http:// www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757019/c5458461/content.html
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. National dairy development plan (2016–2020) [EB/OL]. (2016-12-27)[2017-01-11]. http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757019/c5458461/content.html

[4] 李胜利. 中国奶业竞争力提升——中国奶业的供给侧改革[J]. 饲料与畜牧, 2016, (7): 18–23
LI S L. Improving the competitiveness of dairy industry — supply side reform of dairy industry in China[J]. Feed and animal Husbandry, 2016, (7): 18–23

[5] BAI Z H, LEE M R F, MA L, et al. Global environmental costs of China's thirst for milk[J]. Global Change Biology, 2018, 24(5): 2198–2211

[6] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于推进奶业振兴保障乳品质量安全的意见[EB/OL]. (2018-06-03) [2018-06-11]. http://www. gov. cn/zhengce/content/2018-06/11/content_5297839.htm
The Central People's Government of the People's Republic of China. Opinions of the general office of the State Council on promoting the revitalization of dairy industry and ensuring the quality and safety of dairy products[EB/OL]. (2018-06-03) [2018-06-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-06/11/content_5297839.htm

[7] MEUL M, VAN PASSEL S, NEVENS F, et al. MOTIFS: A monitoring tool for integrated farm sustainability[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(2): 321–332

[8] AARTS H F M, DE HAAN M H A, SCHRÖDER J J, et al. Quantifying the environmental performance of individual dairy farms — the annual nutrient cycling assessment (ANCA) [C]// Proceedings of the 18th Symposium of the European Grass-

land Federation. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2015: 377–380

[9] CAPPER J L, CADY R A. The effects of improved performance in the U.S. dairy cattle industry on environmental impacts between 2007 and 2017[J]. Journal of Animal Science, 2020, 98(1): 1–14

[10] 陆昌华. 奶牛养殖小区适度发展规模评价的指标体系[J]. 乳业科学与技术, 2007, 30(6): 320–323
LU C H. The appropriate development scale evaluation system for cows breeding area[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2007, 30(6): 320–323

[11] 高倩倩. 基于产业链视角的河北省奶业发展问题研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015
GAO Q Q. Research on dairy industry in Hebei Province based on the industrial chain perspective[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015

[12] 甘泉. 我国乳制品企业全球产业链优化研究——以伊利集团为例[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018
GAN Q. Research on the optimization of global industrial chain of Chinese dairy enterprises — Based on Yili Group[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018

[13] BAI Z H, MA L, OENEMA O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 990–1001

[14] ZHANG N N, BAI Z H, LUO J F, et al. Nutrient losses and greenhouse gas emissions from dairy production in China: Lessons learned from historical changes and regional differences[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 1095–1105

[15] 马文奇, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展理论框架和实现路径的思考[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200238
MA W Q, MA L, ZHANG J J, et al. Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200238

[16] 金欣鹏, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展系统研究思路与定量方法[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200241
JIN X P, MA L, ZHANG J J, et al. Systematic research and quantitative approach for assessing agricultural green development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200241

[17] 张建杰, 崔石磊, 马林, 等. 中国农业绿色发展指标体系的构建与例证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069
ZHANG J J, CUI S L, MA L, et al. Construction of a green development index system for agriculture in China and examples[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069

[18] 史枢卿. 世界奶业的供求分析[J]. 中国乳业, 2011, (1): 28–31
SHI S Q. Supply and demand analysis of dairy industry in the world[J]. China Dairy, 2011, (1): 28–31

[19] 陈秀凤. 中荷牧场牛奶生产成本效益比较研究[J]. 中国农业会计, 2017, (2): 37–41
CHEN X F. Comparative study on cost and benefit of dairy production between China and Holland[J]. Chinese Agricultural Accounting, 2017, (2): 37–41

[20] 豆明. 2018 中国奶业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019
DOU M. 2018. China Dairy Data Report[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019

[21] 王占禄. 美国奶业收入支持政策[J]. 中国农业信息, 2017, (10): 55–57
WANG Z L. Revenue support policy of dairy industry in the United States[J]. China Agricultural Informatics, 2017, (10): 55–57

[22] SPEARS R A, KOHN R A, YOUNG A J. Whole-farm nitrogen balance on western dairy farms[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(12): 4178–4186

[23] OENEMA J, VAN KEULEN H, SCHILS R L M, et al. Participatory farm management adaptations to reduce environmental impact on commercial pilot dairy farms in the Netherlands[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58(1/2): 39–48

[24] POWELL J M, MACLEOD M, VELLINGA T V, et al. Feed–milk–manure nitrogen relationships in global dairy production systems[J]. Livestock Science, 2013, 152(2/3): 261–272

[25] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 401–415

[26] ESHEL G, SHEPON A, MAKOV T, et al. Partitioning United States' feed consumption among livestock categories for improved environmental cost assessments[J]. The Journal of Agricultural Science, 2015, 153(3): 432–445

[27] LESSCHEN J P, VAN DEN BERG M, WESTHOEK H J, et al. Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors[J]. Animal Feed Science and Technology, 2011, 166/167: 16–28

[28] GERSSEN-GONDELACH S J, LAUWERIJSSEN R B G, HAVLÍK P, et al. Intensification pathways for beef and dairy cattle production systems: Impacts on GHG emissions, land occupation and land use change[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 240: 135–147

[29] APPUHAMY J A D R N, FRANCE J, KEBREAB E. Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3039–3056

[30] HRISTOV A N, HANIGAN M, COLE A, et al. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots[J]. Canadian Journal of Animal Science, 2011, 91(1): 1–35

[31] ROTZ C A, OENEMA J, VAN KEULEN H. Whole farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: a simulation study[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(5): 773–784

[32] DENTENER F J, CRUTZEN P J. A three-dimensional model of the global ammonia cycle[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1994, 19(4): 331–369

[33] 柏兆海. 我国主要畜禽养殖体系资源需求、氮磷利用和损失研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
BAI Z H. The resources requirement, nitrogen and phosphorus use and losses in the main livestock production system in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015

[34] 马骁远. 奶牛—农田生产体系氮素流动特征与调控途径[D]. 保定: 河北农业大学, 2014
MA X Y. Characterization of nitrogen flow of dairy-farmland system and management approaches[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014

[35] ZHAO Z Q, BAI Z H, WEI S, et al. Modeling farm nutrient flows in the North China Plain to reduce nutrient losses[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 108(2): 231–244

[36] 魏莎, 柏兆海, 吴迪梅, 等. 北京“土壤-饲料-奶牛”系统氮磷流动及环境损失时空特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 316–327
WEI S, BAI Z H, WU D M, et al. Temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus cycling and environmental losses in the “soil-feed-dairy” production system in Beijing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 316−327

[37] LU Y, PAYEN S, LEDGARD S, et al. Components of feed affecting water footprint of feedlot dairy farm systems in Northern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 208–219

[38] WANG X Q, LEDGARD S, LUO J F, et al. Environmental impacts and resource use of milk production on the North China Plain, based on life cycle assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 486–495

[39] 乔雨. CPM 评估奶牛日粮营养价值及生产性能的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
QIAO Y. Study on CPM evaluation of nutritional value and performance of dairy cattle diet[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019

[40] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179–184
WANG X Q, LIANG D L, WANG X D, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(13): 179–184

[41] 萨班. 中国的牛奶消费调查[J]. 陆颖, 译. 楚雄师范学院学报, 2015, 30(10): 11–16
SABBAN. A survey on China’s milk consumption[J]. LU Y, trans. Journal of Chuxiong Normal University, 2015, 30(10): 11–16

[42] 吴晖, 牛晨艳, 黄巍峰, 等. 乳糖不耐受症的现状及解决方法[J]. 现代食品科技, 2006, 22(1): 152–155
WU H, NIU C Y, HUANG W F, et al. The actuality and solution of lactose intolerance[J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(1): 152–155

[43] 陈甜甜. 中国城乡居民乳品消费研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010
CHEN T T. The study on consumption of urban and rural residents in China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010

[44] 董晓霞, 李哲敏, 许世卫, 等. 乳品安全事件情境下城镇居民消费风险感知研究[J]. 上海农业学报, 2015, 31(4): 135–141
DONG X X, LI Z M, XU S W, et al. Perception of consumption risk of Chinese urban residents to the dairy products[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2015, 31(4): 135–141

[45] 国家发展和改革委员会. 全国农产品成本收益资料汇编—2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018
National Development and Reform Commission. Compilation of National Agricultural Product Cost-Benefit Data — 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018

[46] 李志强. 西部奶业与牧草产业的协调发展[J]. 畜禽业, 2002, (11): 48–49
LI Z Q. Coordinated development of dairy industry and forage industry in Western China[J]. Livestock and Poultry Industry, 2002, (11): 48–49

[47] 栾敬东, 张兴宇. 基于产业链视角的奶业支持政策优化研究——以安徽省为例[J]. 农业经济与管理, 2015, (4): 79–87
LUAN J D, ZHANG X Y. Study on dairy industry support policy based on industrial chain perspective: Take Anhui Province as an example[J]. Agricultural Economics and Management, 2015, (4): 79–87

[48] 葛园, 范云琳, 丁可可. 进口奶制品对我国奶业发展的影响及对策[J]. 农村经济与科技, 2019, (14): 100–101
GE Y, FAN Y L, DING K K. Influence and countermeasures of imported dairy products on the development of dairy industry in China[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2019, (14): 100–101

[49] 李胜利, 姚琨, 曹志军, 等. 2016 年奶牛产业技术发展报告[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(1): 156–164
LI S L, YAO K, CAO Z J, et al. Dairy industry and technical development report in 2016[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(1): 156–164

[50] 宋鹏. 呼伦贝尔市有机奶业发展政策研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2017
SONG P. Study on the development policy of organic dairy industry in Hulunbeier[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2017

[51] 杨伟民, 胡定寰. 食品安全背景下的乳业产业链与组织模式创新研究[J]. 内蒙古大学学报: 哲学社会科学版, 2010, 42(6): 32–37
YANG W M, HU D H. Research on the dairy industry chain and organization pattern innovation under the background of food safety[J]. Journal of Inner Mongolia University: Humanities and Social Sciences, 2010, 42(6): 32–37

[52] 陈代娣. 中国乳业结构实证分析及对资源基础论的理论思考[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2004
CHEN D D. Empirical analysis of China’s dairy industry structure and theoretical thinking on resource based theory[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2004

[53] 吴井峰. 中国奶牛业发展研究[D]. 济南: 山东大学, 2005
WU J F. Study on the development of dairy industry in China[D]. Jinan: Shandong University, 2005

[54] 李胜利, 周鑫宇, 刘玉满, 等. 2010 年中国奶业回顾与展望[J].

中国畜牧杂志, 2011, 47(2): 33–37
LI S L, ZHOU X Y, LIU Y M, et al. Review and prospect of China dairy industry in 2010[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2011, 47(2): 33–37

[55] 李胜利, 刘玉满, 毕研亮, 等. 2013 年中国奶业回顾与展望[J]. 中国奶牛, 2014, (5): 1–6
LI S L, LIU Y M, BI Y L, et al. Review and prospect of China dairy industry in 2013[J]. China Dairy Cattle, 2014, (5): 1–6

[56] 张福锁, 崔振岭, 陈新平, 等. 最佳养分管理技术列单[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010
ZHANG F S, CUI Z L, CHEN X P, et al. List of best nutrient management techniques[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010

[57] 曾韵婷, 向玥皎, 马林, 等. 欧盟养分管理政策法规对中国的启示[J]. 世界农业, 2011, (4): 39–43
ZENG Y T, XIANG Y J, MA L, et al. Enlightenment of nutrient management policies and regulations in European Union to China[J]. Word Agriculture, 2011, (4): 39–43

[58] 向玥皎, 王方浩, 覃伟, 等. 美国养分管理政策法规对中国的启示[J]. 世界农业, 2011, (3): 51–55
XIANG Y J, WANG F H, QIN W, et al. Enlightenment of nutrient management policies and regulations in the United States to China[J]. Word Agriculture, 2011, (3): 51–55

[59] 朱静. 奶牛场精准管理与资源匹配研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010
ZHU J. Dairy farm precision management and resource matching[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010

[60] 吴强, 孙世民, 李全海. 中国乳品消费特征、影响因素及趋势判断[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(4): 43–47
WU Q, SUN S M, LI Q H. Analysis on the present situation of China's dairy consumption and its factors[J]. China Dairy Industry, 2018, 46(4): 43–47

[61] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 566–580
CAO Y B, XING X X, BAI Z H, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 566–580

[62] 刘娟, 柏兆海, 曹玉博, 等. 家畜圈舍粪尿表层酸化对氨气排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(5): 677–685
LIU J, BAI Z H, CAO Y B, et al. Impact of surface acidification of manure on ammonia emission in animal housing[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(5): 677–685

[63] CHADWICK D R, WILLIAMS J R, LU Y L, et al. Strategies to reduce nutrient pollution from manure management in China[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 45–55

[64] TAMMINGA S. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production[J]. Livestock Production Science, 2003, 84(2): 101–111

[65] 中华人民共和国农业部. 全国苜蓿产业发展规划(2016—2020)[N]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. National alfalfa industry development plan (2016–2020)[N]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2016

[66] CUI Z L, DOU Z X, YING H, et al. Producing more with less: reducing environmental impacts through an integrated soil-crop system management approach[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 14–20

[67] LU Y L, NORSE D, POWLSON D. Agriculture Green Development in China and the UK: Common objectives and converging policy pathways[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 98–105

[68] 栾颖. 黑龙江省原料乳价格波动影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018
LUAN Y. Study on the influential factors of price of raw milk in Heilongjiang[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018

[69] 张玉玲. 黑龙江省乳业稳定性影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012
ZHANG Y L. Study on factors that affect dairy stability in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012

[70] 胡定寰, DE KONING K, SCHAAP A. 牧场到奶粉的故事: 中国人眼中的荷兰奶业链[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015
HU D H, DE KONING K, SCHAAP A. Milk Stories from Grass to Glass, the Dutch Dairy Chain: A Chinese View[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015

[71] 于海龙. 基于质量安全的乳业产业链优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
YU H L. Optimization of milk industrial chain based on food safety[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014

[72] 万宝刚. 农业产品质量追踪溯源系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014
WAN B G. Design and implementation of agricultural products quality retrospective system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014

[73] 刘锐, 王莉. 中国乳品消费及影响因素研究[J]. 农业展望, 2013, 9(3): 71–75
LIU R, WANG L. Study on China's dairy consumption and influencing factors[J]. Agricultural Outlook, 2013, 9(3): 71–75