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

中国农业绿色发展指标体系的构建与例证

张建杰，崔石磊，马林，孟凡磊，宋晨阳，李雨濛，马文奇

引用本文:
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, 28(8): 1113−1126.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200069

(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

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

中国奶业全产业链绿色发展指标的时空变化特征

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

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1181−1199 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200471

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

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

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200069

张建杰, 崔石磊, 马林, 孟凡磊, 宋晨阳, 李雨濛, 马文奇. 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, 28(8): 1113−1126
ZHANG J J, CUI S L, MA L, MENG F L, SONG C Y, LI Y M, MA W Q. Construction of a green development index system for agriculture in China and examples[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1113−1126

中国农业绿色发展指标体系的构建与例证*

张建杰[1,2], 崔石磊[1], 马 林[3], 孟凡磊[4], 宋晨阳[5], 李雨濛[1], 马文奇[1**]

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 2. 山西农业大学资源环境学院 太原 030031; 3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 4. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 5. 海南大学生态与环境学院/海南省农林环境过程与生态调控重点实验室 海口 570228)

摘 要: 构建指标体系是开展不同尺度农业绿色发展定量分析的基础, 可为农业绿色发展的度量评价、系统设计和实现路径探索等科学研究提供方法支撑。本文立足农业和整个食物“生产-加工-消费”系统, 以农业绿色发展的科学内涵和实现目标为导向, 围绕社会、经济和生态环境 3 个维度, 以“食物生产-加工-消费”全链条为边界, 构建了 1 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。在收集统计数据和文献资料、计算社会和经济类指标的基础上, 引入食物链养分流动模型(NUtrient flows in Food chains, Environmente and Resources use, NUFER), 实现了对生产、资源与环境类指标的定量计算; 此外, 本研究还确立了指标选取原则、计算过程和分级标准等。基于该指标体系, 采用“自上而下”的研究思路, 从全国尺度, 通过定量分析氮素, 描述了中国农业绿色发展的总体特征, 揭示了存在的问题, 并探讨了未来的优化策略; 从省域尺度, 解析了海南省热带岛屿农业绿色发展的特色问题; 从县域尺度, 分析了河北省各县域农业发展的现状及资源环境代价, 为农业绿色发展提供科学支撑和依据; 通过对标分析剖析了中国奶业产业发展的差距, 探讨了产业挖潜的路径。上述实证研究表明, 利用本研究建立的农业绿色发展指标体系与分析模型, 能够定量解析不同尺度的农业绿色发展水平和特征, 进行农业绿色发展的资源环境代价定量分析; 通过对标分析明确产业发展的差距, 阐明产业绿色发展的瓶颈问题和限制因素, 进而挖掘产业绿色发展的潜力。此外, 该指标体系还可用于系统设计农业绿色发展实现路径的研究, 为区域农业绿色发展关键技术的开发以及相关政策的制定提供科学支撑。

关键词: 农业绿色发展; 指标体系; 定量分析; 系统设计; 实现路径

中图分类号: S19; S158.5 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

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

ZHANG Jianjie[1,2], CUI Shilei[1], MA Lin[3], MENG Fanlei[4], SONG Chenyang[5], LI Yumeng[1], MA Wenqi[1**]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 4. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 5. College of Ecology and Environment, Hainan University / Key Laboratory of A&F Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Haikou 570228, China)

* 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-25)资助

** 通信作者: 马文奇, 研究方向为养分资源管理。E-mail: mawq1963@126.com
张建杰, 研究方向为区域养分资源管理。E-mail: zhangjianjie@yeah.net

收稿日期: 2020-02-05 接受日期: 2020-04-02

* This study was supported by the Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (2019-XZ-25).

** Corresponding author, E-mail: mawq1963@126.com

Received Feb. 5, 2020; accepted Apr. 2, 2020

Abstract: Quantitative indicators are crucial for analyzing agricultural green development (AGD). Accordingly, the present study aimed to develop a system of indicators to serve for goals of AGD in China based on agriculture and the whole food production-processing-consumption chain. The indicator system included five aspects (society, economy, productivity, resources, and environment) and a total of 53 indicators (27 direct, 14 indirect, and 12 optional). The indicators enabled quantitative analyses of AGD at different scales. Social and economic indicators were calculated using collect statistical data and literature; and then, production, resource, and environmental indicators were calculated using the NUFER (nutrient flows in food chains, environmental, and resources use) model. Criteria for indicator selection, calculation process, and grading standards were also established. Based on the index system, a "top-down" research approach was adopted, and the spatial and temporal characteristics of AGD indicators were quantitatively analyzed at different scales. At the national scale, nitrogen flow in China was quantitatively analyzed, and the overall characteristics, problems, and future optimization strategies for AGD in China were described. From 1980 to 2017, the N use intensity, N production ability, crop protein yield and animal protein yield increased; while the N use efficiency of crop production first decreased and then increased, livestock manure use efficiency decreased and environmental emission cost of resources increased sharply in China. The main reasons for these changes were irrational use of N in crop-livestock production systems, changes in crop and livestock structure, separation of crop production and livestock husbandry, and uneven development of economy and society. At the provincial scale, the characteristics of AGD in the tropical islands of Hainan Province were analyzed. The intensive use of pesticides and N fertilizer was the main limitation of AGD in Hainan. The main impact factors were the high proportion of tropical fruits and vegetables and high density of livestock and poultry breeding At the county scale, both the current status of agricultural development and the resource and environmental costs of Hebei Province were analyzed. High inputs of agricultural chemicals were the main limiting factor for AGD in Hebei. Besides, the disconnection between crop and livestock production was the main limiting factor of AGD. Through benching marking, the spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China was discussed to distinguish the development gap, bottleneck problems and limiting factors. This empirical research indicated that the AGD index system and the NUFER model were useful for quantitatively analyzing the characteristics and costs of AGD at different scales in China.

Keywords: Agricultural green development; Indicator system; Quantitative analysis; System design; Realization pathway

中国农业在确保粮食安全进而推动社会经济发展方面做出了重大贡献, 同时也付出了巨大的生态环境代价, 水体富营养化[1]、土壤酸化[2]、大气污染[3]、生物多样性减少[4]等一系列环境问题日渐突出。因此, 中国农业迫切需要转变其农业发展方式, 推进农业绿色发展。目前, 推进农业绿色发展已经成为实施乡村振兴战略和满足人民美好生活需求的重大国家需求。然而, 农业绿色发展如何进行科学地定量表征？如何对不同尺度的农业绿色发展进行定量评价？如何系统设计农业绿色发展的实现路径？上述问题的存在表明亟需从科学视角构建农业绿色发展指标体系和定量分析方法。国际上为了定量评价农业可持续发展, 围绕社会、经济和生态环境等 3 个维度, 分别从农场[5-7]、区域[8]、国家[9-10]尺度建立了农业可持续发展指标体系。2015 年启动的联合国可持续发展行动则为全球农业可持续发展指明了方向和具体的借鉴指标[11]。这些都为我国建立农业绿色发展指标体系提供了重要参考。有研究指出, 一套科学的评价指标体系应该具备几个方面的特征: 1)指标容易监测; 2)对系统的压力敏感; 3)指标可以对压力做出响应; 4)能够预测, 并通过预测可以做出改变; 5)综合全面等[12]。然而, 国际研究多以生态环境作为约束指标, 研究边界大多围绕农业生产环节, 很少从农业生产-消费全链条来进行分析, 在社会层面缺乏饮食消费和人体健康的指标。此外, 已有指标体系主要是对现状定量评价的静态指标, 而缺乏各指标间关联和动态响应的定量分析。

国内学者也对中国农业绿色发展指标进行了研究[13-14], 多是根据国家政策和综合农业发展的战略目标构建了我国农业绿色发展评价指标体系, 并以统计数据为主对国家和区域尺度的农业绿色发展状况进行了定量评估[12]。国内研究多强调政府目标的实现, 在指标选择上注重农业生产过程, 指标获取多直接或间接采用统计资料, 缺乏环境监测指标和对农业加工和消费环节的考量。研究目标也多是试图为区域农业绿色发展评价提供定量工具, 缺乏从理论和科学研究角度进行指标体系的构建。然而, 农业绿色发展的研究边界不仅仅是农业生产, 而是涵盖了"食物生产-加工/包装-运输-销售-消费"环节

的完整食物系统[15-16], 其目标不仅仅是解决粮食安全问题, 还要考虑资源环境代价, 更要兼顾食品安全和人体健康。为此, 本文根据农业绿色发展的科学内涵、基本特征和主要目标[15], 从社会、经济和生态环境等 3 个维度入手, 建立了 1 套适用于科学研究的指标体系, 涵盖社会、经济、生产力、资源、环境等 5 个方面。旨在实现对我国农业绿色发展现状的定量评估, 为定量设计区域农业绿色发展的实现路径研究提供方法[16]。

1　指标体系构建方法

1.1　指标体系构建原则

基于中国农业绿色发展的科学内涵和要义, 本文在构建农业绿色发展指标体系时, 主要体现了系统性、完整性、协同性、科学性和可行性的原则。系统性主要是突出了整个食物系统(“食物生产—加工—消费”全链条)和“绿色”与“发展”协调的系统目标, 并具体体现在社会发展、经济增长、生产高效、资源节约和环境友好等全方位目标; 完整性则明确了农业绿色发展的研究边界是从生产环节、加工环节到最终的消费环节, 指标的选择覆盖了从“生产-加工-消费”整个链条的主要因素, 指标的评价对象则涉及到山、水、林、田、湖、草等整个生命共同体; 协同性强调了指标之间的响应、联动关系, 通过对指标体系中指标的优化和调控, 来协调整个食物系统的良性发展; 科学性则强调指标对农业绿色发展内涵、特征和目标的科学表达, 有利于解析农业绿色发展的瓶颈问题、制约因素及其实现途径; 可行性主要考虑了数据可得性和基础数据获取的难易程度, 确保每个指标都有可靠的数据来源和科学的计算过程。

1.2　指标体系构建过程

首先根据农业绿色发展的概念与总体目标, 对相关的指标元素进行列单; 然后从社会、经济、生产、资源和环境等 5 个方面定义、选取和分类指标; 进一步剔除数据不易获取和相关性很强的指标, 部分生态环境指标虽然暂时无法获取数据, 但对于评价农业绿色发展意义重大, 因此进行了保留; 并多次通过专家论证的方式对指标进行进一步的筛选, 最终建立了相对完善的中国农业绿色发展评价指标体系。考虑到各个指标的特征及其在指标体系中的作用, 进一步将每一类指标细化为 3 个子类, 即直接指标、间接指标和可选指标。直接指标是能够直接表征农业发展在社会、经济、生产、资源和生态环境方面特征, 并对农业绿色发展的基本性状进行评价的一类指标, 譬如农业资源使用强度、生产效率、环境代价、饮食结构等直接反映食物生产-消费特征的指标; 间接指标本身不直接反映农业绿色发展的特征, 却是国际公认的农业可持续发展的重要驱动或影响因素类指标, 如人均 GDP、城镇化率等社会经济指标, 或者反映农业绿色发展产生的间接效应, 如水体、土壤与大气的环境质量等; 可选指标则为了体现区域特色, 并根据区域自然条件与社会经济发展条件进行设定, 例如在反映区域植被覆盖时, 建议在山区选择森林覆盖率, 而在牧区或半牧区则优先选择草地覆盖率(表 1)。

1.3　指标数据获取来源与计算

农业绿色发展指标体系中各项指标均可从《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国农业统计年鉴》《中国畜牧统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国休闲农业年鉴》《环境公报》等年鉴资料获取, 对于区域尺度的农业绿色发展研究, 可以从相应区域的对应年鉴资料获取基础数据。社会、经济指标的计算依赖于统计资料, 而生产、资源和环境指标的计算, 涉及食物“生产—加工—消费”系统的物质流动与养分平衡, 需要借助于食物链养分流动模型[17] (NUtrient flows in Food chains, Environmente and Resources use, NUFER)计算区域的资源投入、利用效率、生产力水平和环境损失等指标。

1.4　农业绿色发展水平分级

在确定指标后, 以联合国可持续发展目标、中国政府发布的农业发展行动纲要和发展目标以及国际先进国家的环境减排水平等作为分等定级的原则和依据, 通过查阅文献、分析区域发展水平、结合专家咨询的方式将每个入选指标的绿色发展程度分为 4 个等级: Ⅰ级表示绿色发展程度最好, Ⅱ级次之, Ⅲ级较差, Ⅳ级表征绿色发展程度最差(具体分级依据见表 1)。

1.5　资源投入与环境排放类指标的计算

考虑到农业生产过程中资源投入和环境排放涉及到耕地、园地和草地等多种类型, 本研究为了尽量准确评估资源投入强度和环境排放强度, 在计算氮、磷、农药、农膜等使用强度时, 使用了农作物播种总面积作为分母; 在计算灌溉水的单位用量时, 则考虑的是农田灌溉面积; 而在考虑氮盈余、氮淋洗、氮径流、氨挥发、N_2O 排放与温室气体(GHG)排放等环境损失时, 考虑了耕地、园地和草地等多种土地利用方式, 在内蒙、宁夏、甘肃、西藏和新疆等 5 个牧区, 则进一步考虑了天然草地的贡献。

2 指标体系概况

2.1 社会发展指标

社会发展指标主要反映区域农业生产的基本条件和发展水平、社会发展对农业生产的驱动作用和农业发展如何满足人类消费需求、对促进民生福祉的作用。所有指标的具体含义及分级依据如表 1 所示。

农业投入占财政总支出比例(S-D-1)为直接指标，用于反映区域内政府对农业的重视程度和支持力度。卡路里作为能量标准单位，任何动植物产品都可以进行折算，而蛋白也是常用的营养标准单位，且与食物氮素含量有很好的相关性，因此将人均卡路里摄入量(S-D-2)和人均蛋白摄入量(S-D-3)作为直接指标，分别从粮食需求和营养角度反映了农业发展对民生福祉的影响。农业机械化水平(S-D-4)和农田灌溉水平(S-D-5)作为农业发展的基础保障，在不同农业自然条件和生态类型都具有普遍适用性，将二者作为直接指标来反映区域的农业生产条件。农民受教育程度(S-D-6)可以直接表征区域农民的知识水平和接受新科学、新技术的能力，且数据可以从统计年鉴中获取，将其设定为直接指标。

城镇化率(S-I-1)本身不能反映农业绿色发展水平，但是城镇化率是一个国际公认的驱动食物系统饮食消费的重要因素，因此将其纳入到间接指标中。人均耕地占有水平(S-I-2)是反映农业发展条件的重要指标，但主要受区域自然条件约束，不易改变，因此将其设定为间接指标。动物蛋白消费比例(S-I-3)用于评价人体动物营养的摄入情况，间接反映饮食消费结构，因此也将其归入间接指标中。

食物自给率(S-O-1)反映一个国家(区域)的食物生产是否能够满足本国(区)消费，在国家尺度上体现战略需求，但是在区域尺度上，食物的供需可以通过国内贸易来协调，因此作为可选指标。土地流转比例(S-O-2)反映区域农业集约化水平，考虑到地区间数据获取的难易程度将其设定为可选指标。

2.2 经济增长指标

经济增长指标主要评价农业生产的经济效益、农业发展对于经济的贡献和经济发展如何影响农业绿色发展(表 1)。

单位耕地面积农业产值(E-D-1)能够直接表征当地农业的经济发展水平，具有普遍适用性，设定为直接指标。

人均 GDP(E-I-1)是国际公认的影响饮食消费的重要因素，设定为间接指标。食品工业化水平(食品工业与农业产值的比例，S-I-2)可以用于间接反映农业产业链发展水平，将其归入间接指标。

恩格尔系数在国际上常用于表征居民饮食消费支出，即一个家庭收入越低，用于购买食物支出所占的比例就越大。本文用农村恩格尔系数(E-O-1)来反映农村家庭的经济收入水平，归入可选指标。农村人均可支配收入(E-O-2)用于评价农村人口的经济收入水平，农业产值占 GDP 比例(E-O-3)则可以反映农业产业在当地整个经济产业中的地位，因此将这两个指标归入可选指标。

2.3 农业生产指标

农业生产指标反映农业绿色发展的生产水平，一方面强调农产品的数量与质量并重，在直接指标中选取单位面积卡路里产量(P-D-1)来表征农产品产量水平(数量)，用单位面积植物蛋白产量(P-D-2)来表征农作物产品营养生产能力，用单位动物蛋白产量(P-D-3)来表征畜牧的营养生产力水平(质量)；另一方面注重资源的利用效率，将农田系统氮素利用效率(P-D-4)、畜牧系统氮素利用效率(P-D-5)和食物链系统氮素利用效率(P-D-6)分别表示 3 种系统的氮素利用效率(表 1)。

农业生产指标中未设定间接指标。根据区域发展水平与农业种植结构的特点，将蔬菜单产水平(P-O-1)和水果单产水平(P-O-2)设定为可选指标(表 1)。

2.4 资源投入指标

资源投入指标是指贯穿整个农业产业链的各种能量、物质与劳动力的投入(其中机械投入作为机械化水平已经在社会发展类指标体现，在此不再重复)。农田氮、磷、农药、农膜、灌溉水和劳动力是基本的农业生产投入，将氮素使用强度(R-D-1)、磷素使用强度(R-D-2)、农药使用强度(R-D-3)、农膜使用强度(R-D-4)、灌溉水使用强度(R-D-5)和农业劳动力投入水平(R-D-6)作为直接指标。畜禽粪尿、秸秆等属于二次利用的资源而非直接投入的资源，粪尿循环利用效率(R-I-1)、秸秆循环利用效率(R-I-2)体现农牧生产系统内部农业废弃物资源循环利用程度，将二者设定为间接指标。相对于灌溉水投入强度，农业水足迹(R-I-3)不能直接反映水资源利用强度，因此将其归入间接指标。根据区域间产业发展差异，将单位农业产值能耗(R-O-1)和单位动物抗生素投入(R-O-2)作为可选指标(表 1)。

2.5 生态环境指标

生态环境主要考虑水体、土壤和大气以及整个农业生态系统的环境质量。单位面积农田氮素盈余(EN-D-1)、农田氮素径流(EN-D-2)、农田氮素淋洗

表 1　中国农业绿色发展评价指标体系与分级标准

Table 1　Indicators system and grading criteria of China agricultural green development

分类 Category	编号 No.	指标 Indicator	分级标准 Grading criteria				分级依据 Reference	指标含义 Indicator implication	数据获取途径 Data get way
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ			
社会发展 Social development	S-D-1	农业财政投入比例 Proportion of agricultural financial investment (%)	>20	15~20	10~15	<10	[18]	区域当年农业财政投入占政府总财政支出的百分比，反映政府对农业发展的支持力度 Percentage of regional agricultural financial input in total financial input of the government in the current year, reflecting the government's support for agricultural development	统计年鉴，农村统计年鉴 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook
	S-D-2	人均热量摄入量 Per capita calorie consumption ($kcal \cdot cap.^{-1} \cdot d^{-1}$)	2 200~2 300	1 700~2 200, 2 300~2 800	1 200~1 700, 2 800~3 800	<1 200, >3 800	[19-20]	区域当年人均每日消费各种食物的能量总和 Total energy consumption of various foods per capita in the region in the current year	统计年鉴，农村统计年鉴，食物链养分流动模型 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook, NUFER
	S-D-3	人均蛋白质摄入量 Per capita protein consumption ($g \cdot cap.^{-1} \cdot d^{-1}$)	>23.7	21.3~23.7	19~21.3	<19	[21]	区域当年人均每年消费各种食物的蛋白总和 Total protein amount of various foods consumed per capita in the region in the current year	统计年鉴，农村统计年鉴，食物链养分流动模型 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook, NUFER
	S-D-4	农业机械化水平 Agricultural mechanization level ($\times 10^4$ $kW \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	>5	3~5	1~3	<1	[22]	区域当年单位耕地面积机械动力投入量 Mechanical power input per unit area of arable land in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	S-D-5	农田灌溉水平 Irrigation lever of farmland (%)	>50	30~50	10~30	<10	专家咨询 Expert consulting	区域当年有效灌溉面积占耕地面积的百分比 Percentage of effective irrigation area in total arable land in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	S-D-6	农业人口受教育程度 Education level of agricultural population (%)	>50	30~50	10~30	<10	专家咨询 Expert consulting	区域当年农民家庭劳动力中高中及以上学历数量占农业劳动力的百分比 Percentage of agricultural labor force with high school education or above in the current year	统计年鉴，农村统计年鉴 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook
	S-I-1	城镇化率 Urbanization rate (%)	>60	40~60	20~40	<20	[23]	区域当年城镇人口与总人口的百分比 Percentage of urban population in total population in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	S-I-2	人均耕地占有水平 Per capita cultivated land ($hm^2 \cdot cap.^{-1}$)	>2.5	0.79~2.5	0.2~0.79	<0.2	专家咨询 Expert consulting	区域当年单位农村劳动力所拥有的耕地面积 Per capita arable land area owned by agricultural labor force in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	S-I-3	动物蛋白消费比例 Proportion of animal protein in protein consumption (%)	30~35	25~30 35~40	20~25 40~45	<20 >40	专家咨询 Expert consulting	区域当年动物性食品蛋白摄入量占总蛋白摄入量的百分比 Percentage of animal protein intake in total protein intake in the current year	统计年鉴，农村统计年鉴，食物链养分流动模型 Statistical Yearbook, Rural statistical yearbook, NUFER
	S-O-1	食物自给率 Food self-sufficiency rate (%)	>100	75~100	50~75	<50	[20]	以氮为指示指标，区域内当年所生产各种食物的氮素产生量总和与所消费食物的氮素总和的百分比 Taking N as an indicator, the percentage of the total amount of N produced by various foods in the total N consumption in the current year	统计年鉴，农村统计年鉴，食物链养分流动模型 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook, NUFER

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

分类 Category	编号 No.	指标 Indicator	分级标准 Grading criteria				分级依据 Reference	指标含义 Indicator implication	数据获取途径 Data get way
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ			
社会发展 Social development	S-O-2	土地流转比例 Proportion of land transfer (%)	>50	30~50	10~30	<10	专家咨询 Expert consulting	当年区域内流转土地与耕地总面积的百分比 Percentage of land transfer area in total arable land area in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
经济增长 Economic growth	E-D-1	单位面积农业产值 Agricultural output value per unit cultivated land area (10^4¥·hm^{-2})	>16.3	5.1~16.3	1.3~5.1	<1.3	专家咨询 Expert consulting	区域当年农业总产值与耕地、园地和人工草地总面积之和的比值 Ratio of the total agricultural output value to the total area of arable land, garden land and artificial grassland	统计年鉴、农村统计年鉴 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook
	E-I-1	人均 GDP Per capita GDP (10^4¥·cap.$^{-1}$)	>9	3~9	0.7~3	<0.7	[24]	区域当年地区生产总值与总人口的比值 Ratio of regional GDP to total population in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	E-I-2	食品工业化水平 Level of food industrialization (%)	>3	2~3	1~2	<1	[25]	区域当年食品工业产值与农业生产总值的比值 Ratio of regional food industrial output value to agricultural output value	食品工业年鉴 Food Industry Yearbook
	E-O-1	农村恩格尔系数 Rural Engel coefficient (%)	<30	30~40	40~50	>50	[26]	区域当年农村居民用于食品消费支出与消费总支出的百分比 Percentage of food consumption spending in total consumption spending of rural residents in the current year	统计年鉴、农村统计年鉴 Statistical Yearbook, Rural Statistical Yearbook
	E-O-2	农村居民人均可支配收入 Rural disposable income (10^4¥·cap.$^{-1}$)	>3.8	1.18~3.8	0.3~1.18	<0.3	[27]	区域当年农村居民人均可支配收入 Per capita disposable income of rural residents in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	E-O-3	农业产值占 GDP 比例 Percentage of agricultural output value in GDP (%)	>35	25~35	15~25	<15	专家咨询 Expert consulting	区域当年农业生产总值占地区生产总值的百分比 Percentage of regional agricultural output value in GDP in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
农业生产 Agricultural production	P-D-1	单位面积热量产量 Caloric production per unit cultivated land ($\times10^4$ kcal·hm^{-2})	>2 827	2 262~2 827	1 696~2 262	<1 696	专家咨询 Expert consulting	区域内当年各种作物与动物产品的热量总产量与耕地面积的比值 Ratio of total caloric production of crop and animal products to arable land area in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	P-D-2	单位面积植物蛋白产量 Protein production per unit cultivated land (kg·hm^{-2})	>1 125	750~1 125	450~750	<450	专家咨询 Expert consulting	区域内当年各种作物蛋白总产量与耕地面积的比值 Ratio of total protein production of various crops to arable land area in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	P-D-3	单位动物蛋白产量 Protein production per livestock unit (kg·LU^{-1})	>60	40~60	20~40	<20	专家咨询 Expert consulting	区域内当年各种动物蛋白的总产与标准动物单位总数的比值 Ratio of total animal protein production to livestock units in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	P-D-4	农田系统氮素利用效率 N use efficiency in crop production (%)	>70	50~70	30~50	<30	[28-29]	区域内当年作物系统各种作物氮素携出量与氮素投入总量的百分数 Percentage of N uptake of various crops in total N inputs of crop production in the current year	食物链养分流动模型 NUFER

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

分类 Category	编号 No.	指标 Indicator	分级标准 Grading criteria Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	分级依据 Reference	指标含义 Indicator implication	数据获取途径 Data get way
农业生产 Agricultural production	P-D-5	畜牧系统氮素利用效率 N use efficiency in animal production (%)	>19	15~19	10~15	<10	[29]	区域内当年畜牧系统各种动物产品(肉、蛋和奶)的氮素携出量与氮素投入总量的百分数 Percentage of N uptake of various animal products (meat, egg and milk) in total N inputs of animal production in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	P-D-6	食物系统氮素利用效率 N use efficiency in food system (%)	>30	25~30	18~25	<18	[29]	区域内当年生产食物的氮素携出量与整个食物系统氮素投入量的百分数 Percentage of N uptake of various food products in total N inputs of the whole food system in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	P-O-1	蔬菜单产水平 Vegetables yield ($t \cdot hm^{-2}$)	>52	42~52	31~42	<31	专家咨询 Expert consulting	区域内当年单位面积的蔬菜产量 Regional vegetables yield per unit cultivated land in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	P-O-2	水果单产水平 Fruits yield ($t \cdot hm^{-2}$)	>28	22~28	17~22	<17	专家咨询 Expert consulting	区域内当年单位面积的水果产量 Regional fruits yield per unit cultivated land in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
资源投入 Resources inputs	R-D-1	氮素使用强度 N use intensity ($kg \cdot hm^{-2}$)	<180	180~225	225~315	>315	[30]	区域内当年作物生产系统氮素投入总量与总播种面积的比值 Ratio of total N inputs of crop production to total sown area in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-D-2	磷素使用强度 P use intensity ($kg \cdot hm^{-2}$)	<35	35~50	50~65	>65	[31]	区域内当年作物生产系统磷投入总量与总播种面积的比值 Ratio of total P inputs of crop production to total sown area in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-D-3	农药使用强度 Pesticides use intensity ($kg \cdot hm^{-2}$)	<3.5	3.5~5.3	5.3~7	>7	[32]	区域内当年农药投入总量与总播种面积的比值 Ratio of regional total pesticides inputs to total sown area in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-D-4	农膜使用强度 Agricultural film use intensity ($kg \cdot hm^{-2}$)	<9.78	9.78~12.70	12.70~26.62	>26.62	专家咨询 Expert consulting	区域内当年农膜使用总量与总播种面积的比值 Ratio of regional total agricultural film use to total sown area in the current years	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-D-5	灌溉水使用强度 Irrigation water use intensity ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	<1 350	1 350~2 025	2 025~2 700	>2 700	专家咨询 Expert consulting	区域内当年灌溉用水总量与总灌溉面积的比值 Ratio of regional total irrigation water consumption to total irrigation area in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-D-6	农业劳动力投入水平 Labor input per unit cultivated land (persons·hm^{-2})	>5	1.26~5.0	0.4~1.26	<0.4	专家咨询 Expert consulting	区域内当年农业劳动力总数与耕地、园地面积之和的比值 Ratio of regional total number of agricultural labor force to the area sum of arable land and garden land in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-I-1	粪尿循环利用率 Manure recycling rate (%)	>75	55~75	35~55	<35	专家咨询 Expert consulting	区域内当年畜禽粪尿氮还田量与总产生量的百分比 Percentage of the regional amount of manure N returned to the field in the total manure N production in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	R-I-2	秸秆循环利用效率 Straw recycling rate (%)	>80	65~80	50~65	<50	专家咨询 Expert consulting	区域内当年秸秆氮还田量与饲用量总和与秸秆产生总量的百分比 Percentage of the regional amount of straw N to filed and feed in the total straw N production in the current year	食物链养分流动模型 NUFER

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

分类 Category	编号 No.	指标 Indicator	分级标准 Grading criteria Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	分级依据 Reference	指标含义 Indicator implication	数据获取途径 Data get way
资源投入 Resources inputs	R-I-3	农业水足迹 Footprint of agricultural water (m^3·cap.$^{-1}$·a^{-1})	540	590	640	690	[33]	区域内当年人均农业水足迹 Per capita agricultural water footprint in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	R-O-1	单位农业产值能耗 Energy consumption per unit agricultural output value [kW·(10^4¥)$^{-1}$]	2 450	5 000	7 500	13 370	专家咨询 Expert consulting	区域内当年各种农业能耗(机械能耗、用电能耗)总和与农业生产总值的比值 Ratio between the sum of various agricultural energy consumption (mechanical energy consumption, power consumption) and the gross agricultural product in the current year	统计年鉴 Statistical Yearbook
	R-O-2	单位动物抗生素投入 Antibiotic input per livestock unit (kg·LU^{-1})	0.02	0.07	0.12	0.17	[34]	区域内当年动物抗生素投入总量与标准动物单位总数的比值 Ratio of regional animal antibiotic use to the amount of livestock units in the current year	畜牧统计年鉴 Animal Husbandry Statistical Yearbook
生态环境 Ecological environment	EN-D-1	农田氮素盈余 N surplus in farmland (kg·hm^{-2})	<80	80~160	160~240	>240	[28,35]	区域内当年作物系统氮素盈余总量与耕地、园地和人工草地总面积之和的比值 Ratio of regional total N surplus of crop system to total area of cultivated land, garden land and artificial grassland in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	EN-D-2	农田氮素径流 N runoff in farmland (kg·hm^{-2})	<9	9~13.5	13.5~18	>18	[36]	区域内当年农田氮素径流总量与耕地、园地和人工草地总面积的比值 Ratio of regional total N runoff of crop system to total area of cultivated land, garden land and artificial grassland in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	EN-D-3	农田氮素淋洗 N leaching in farmland (kg·hm^{-2})	<6.4	6.4~12.8	12.8~19.2	>19.2	专家咨询 Expert consulting	区域内当年农田氮素淋洗总量与耕地、园地和人工草地总面积的比值 Ratio of regional total N leaching of crop system to total area of cultivated land, garden land and artificial grassland in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	EN-D-4	农业系统氨挥发 NH_3 volatilization in agricultural system (kg·hm^{-2})	<30	30~60	60~120	>120	专家咨询 Expert consulting	区域内当年农牧生产系统的氨挥发总量与耕地、园地和人工草地面积的比值 Ratio of regional total NH_3 emission of crop system to total area of cultivated land, garden land and artificial grassland in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	EN-D-5	生产单位食物氮素环境代价 Reactive N losses per unit food N [kg(N)·kg^{-1}(N)]	<3	3-4.5	4.5-6	>6	专家咨询 Expert consulting	区域内当年整个食物系统的活性氮损失总量与食物氮生产总量的比值 Ratio of regional total losses of reactive N to total food N production in the current year	食物链养分流动模型 NUFER
	EN-D-6	农业源温室气体排放强度 Greenhouse gases emission intensity per unit cultivated land [kg(CO_2 eq)·hm^{-2}]	<1 785	1 785~2 680	2 680~3 570	>3 570	[37]	区域内当年整个食物系统的各种温室气体排放当量总和与耕地、园地和人工草地面积的比值 Ratio of regional total greenhouse gases emission of food system to total area of cultivated land, garden land and artificial grassland in the current year	食物链养分流动模型 NUFER

http://www.ecoagri.ac.cn

续表 1

分类 Category	编号 No.	指标 Indicator	分级标准 Grading criteria Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	分级依据 Reference	指标含义 Indicator implication	数据获取途径 Data get way
生态环境 Ecological environment	EN-D-7	土壤有机质水平 Soil organic matter level (%)	>75	50~75	25~50	<25	[38]	区域内当年测土施肥数据土壤有机质 3 级水平以上的样点数与样点总数的比值 Ratio of the number of samples above the third level of soil organic matter to the total number of samples	全国科学施肥网(测土配方数据集) National Scientific Fertilization Network (Soil Testing Formula Data Set)
	EN-D-8	土壤侵蚀模数 Modulus of soil erosion ($t \cdot hm^{-2}$)	<1 000	1 000~2 500	2 500~5 000	>5 000	[39]	区域内当年水土流失总量与国土面积的比值 Ratio of regional total amount of soil and water losses to geographical area in the current year	水利部(局) Ministry (Department) of Water Resources
	EN-I-1	地表水质量 Surface water quality (%)	>90	70~90	50~70	<50	[40]	区域内当年地表水安全质量 Regional surface water safe quality in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-I-2	地下水质量 Ground water quality (%)	>90	70~90	50~70	<50	[40]	区域内当年地下水安全质量 Regional ground water safe quality in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-I-3	空气质量 Atmosphere quality (%)	>80	50~80	20~50	<20	[40]	区域内当年空气质量 Regional atmosphere safe quality in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-I-4	生态环境质量 Ecological environment quality (%)	>75	55~75	35~55	<35	[40]	区域内当年生态环境质量 Regional ecological environment safe quality in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-I-5	农村污水处理率 Rural sewage treatment rate (%)	>90	70~90	45~70	<45	专家咨询 Expert consulting	区域内农村污水处理总量与污水产生总量的百分数 Percentage of regional total amount of rural sewage treatment in total amount of sewage produced in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-I-6	农村垃圾处理率 Rural waste treatment rate (%)	>90	70~90	45~70	<45	专家咨询 Expert consulting	区域内当年农村垃圾处理总量与垃圾产生总量的百分数 Percentage of regional total amount of rural waste treatment in total amount of waste produced in the current year	中国生态环境状况公报 Bulletin of China's Ecological Environment
	EN-O-1	森林覆盖率 Forest coverage rate (%)	>30	22.5~30	15~22.5	<15	[41]	区域内当年森林面积与国土面积的百分比(为山区评价指标) Percentage of regional forest area in geographical area in the current year (as the evaluation indicator of mountainous area)	统计年鉴 Statistical Yearbook
	EN-O-2	草地覆盖率 Grass coverage rate (%)	>30	22.5~30	15~22.5	<15	专家咨询 Expert consulting	区域内当年草地面积与国土面积的百分比(为牧区、半牧区评价指标) Percentage of regional grassland area in geographical area in the current year (as the evaluation indicator of pastoral area and semi-pastoral area)	统计年鉴 Statistical Yearbook
	EN-O-3	畜禽承载量 Livestock capacity per unit cultivated land ($LUs \cdot hm^{-2}$)	<2	2~4	4~6	>6	[42]	区域内当年标准畜禽单位总量与耕地面积的比值 Ratio of regional amount of livestock units to total arable land area in the current year	食物链养分流动模型 NUFER

表中指标分级标准值采取下含上不含的原则；内蒙古、甘肃、青海、西藏和新疆等 5 大牧区在计算环境排放时，还应考虑天然草地的面积。NUFER: NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use.

The grading standard values of the indicators in the table are based on the principle of "including below but not including above"; the area of natural grassland should also be considered in the calculation of environmental emissions in the five pastoral areas of Inner Mongolia, Gansu, Qinghai, Tibet and Xinjiang.

http://www.ecoagri.ac.cn

(EN-D-3)、农业系统氨挥发(EN-D-4)、生产单位食物氮素环境代价(EN-D-5)、农业源 GHG 排放强度(EN-D-6)、土壤有机质水平(EN-D-7)、土壤侵蚀模数(EN-D-8)等作为直接指标，将地表水质量(EN-I-1)、地下水质量(EN-I-2)、空气质量(EN-I-3)、生态环境质量(EN-I-4)、农村污水处理率(EN-I-5)和农村垃圾处理率(EN-I-6)作为间接指标。考虑到区域农业产业发展的差异性，将森林覆盖率(EN-O-1)、草地覆盖率(EN-O-2)和畜禽耕地承载力(EN-O-3)作为可选指标(表 1)。

3 指标体系的应用例证

3.1 国家尺度的农业绿色发展时空特征及特征分析

本研究所建立的农业绿色发展指标体系，能够定量分析中国农业发展过程中的资源环境代价。过去几十年，氮素在中国农业集约化进程中总体呈现投入不断增加、农田利用效率开始回升，资源环境代价加剧的特征。本研究所构建的农业绿色发展指标体系，涵盖了作物种植、动物生产、食品加工与食物消费环节的氮素投入、循环利用及各种环境损失等方面，实现了对整个食物系统氮素流动的定量分析。一方面可以用氮素指标来表征农业绿色发展的水平，另一方面可以通过分析指标间关系来调控氮素的管理，进而探明农业绿色发展的实现路径。崔石磊等[43]选取了其中与氮素相关的 18 个指标，定量阐明了中国 1980—2017 年食物系统氮素的时空变化特征：氮素使用强度总体增加，由 121.2 $kg·hm^{-2}$ 增加至 309.3 $kg·hm^{-2}$；氮素生产能力稳步提升，单位动物蛋白产量和单位面积植物蛋白产量分别由 11.0 $kg·LU^{-1}$ 和 231.2 $kg·hm^{-2}$ 提高到 28.7 $kg·LU^{-1}$ 和 582.7 $kg·hm^{-2}$；农田氮素利用效率呈现先下降后回升的变化趋势，由 1980 年的 30.53%下降至 2003 年的 23.89%，之后出现回升的趋势，于 2017 年达 30.14%；环境排放急剧增加，农业源 GHG 排放由 2 362.5 $kg(CO_2\ eq)·hm^{-2}$ 增加至 4 018.5 $kg(CO_2\ eq)·hm^{-2}$。研究进一步系统分析了经济增长、饮食结构改变、农业生产方式转变等因素对氮素指标的影响和驱动作用[43]。该研究是立足国家尺度，选取食物系统绿色发展中氮素相关指标，开展时空变化特征和影响因素分析应用研究的一个案例；该指标体系可为开展国家尺度农业绿色发展相关指标评价、影响因素解析和动态关联分析提供方法。

3.2 区域农业绿色发展关键问题解析

中国幅员辽阔，地域之间自然条件、资源禀赋和农业生产特征存在明显差异，制约各个区域农业绿色发展的瓶颈问题和影响因素也不尽相同。基于本文构建的农业绿色发展指标体系，通过定量分析指标的变化特征，可以解析出不同区域制约农业绿色发展的各自特色鲜明的瓶颈问题。

宋晨阳等[44]选取了该指标体系中 20 个指标，其中直接指标 15 个，间接指标 1 个，可选指标 4 个，定量分析了海南岛农业绿色发展现状和特征，并解析了热带特色农业绿色发展存在的主要问题。海南省制约农业绿色发展的主要瓶颈问题是农药、氮素使用强度过高，2017 年分别达 47.1 $kg·hm^{-2}$ 和 411.7 $kg·hm^{-2}$；农牧系统环境排放较高，2017 年农业源氨排放达 131.4 $kg·hm^{-2}$，其主要驱动因素是种植业结构中热带水果和蔬菜种植比例过高(2017 年二者的种植面积占农作物播种面积的 68.9%)，以及畜禽养殖密度过高(2017 年达 7.4 $LUs·hm^{-2}$，远高于本研究所规定的Ⅳ级水平)等。

李雨濛等[45]则选取了 27 项指标，包含直接指标 18 个，间接指标 6 个，可选指标 3 个，定量分析了河北省县域尺度农业绿色发展的时空变化特征及主要影响因素。结果表明影响河北省农业绿色发展的主要问题是农业化学品投入过高，区域氮素平均投入水平达 330 $kg·hm^{-2}$，农业源环境排放较高，2017 年农业源氨排放达 156 $kg·hm^{-2}$，而农田与畜牧生产环节严重脱节是主要的影响因素。

上述研究是针对不同区域尺度，通过指标体系定量分析各个区域的农业绿色发展指标的时空变化特征；该指标体系可以解析各自区域农业绿色发展的瓶颈问题，以期为区域农业绿色发展的落地实现提供科学支撑。

3.3 产业发展对标分析与综合挖潜

产业发展是推进农业绿色发展的重要支撑，产业兴旺也是乡村振兴战略的重中之重。借助于本文所构建的农业绿色发展指标体系，可以实现全产业链的对标分析，找出差距，进而提出挖掘产业潜力的途径。高巍等[46]以中国奶业为例，基于该指标体系，从社会发展、经济效益、产品生产、资源投入和生态环境 5 个方面选择 28 个指标，进一步丰富和完善了奶业发展指标体系，通过分析中国奶业绿色发展指标的时空变化特征，阐述了中国奶业发展水平大幅度提升，但依然存在社会发展缓慢、经济效益差、生产水平低、资源投入高和环境代价大的问题；进一步对标国际奶业发展水平，找出了中国奶业发展在饲料生产、奶牛养殖和奶制品消费等各个

环节与国际发展水平的差距, 解析了奶业产业发展过程中存在的瓶颈问题与限制因素: 1)饲料种植环节的资源过量投入, 生产单位牛奶的蓝水、耕地、化肥等投入水平远高于国际先进水平, 化肥、人工和机械费用投入是影响奶牛饲料生产的主要因素; 2)奶牛养殖环节的产品生产水平低、资源投入和生态环境代价大, 牛奶生产成本高、效益低, 其主要影响因素为饲料种植和奶牛养殖技术、管理水平低, 种养分离以及不合理的定价机制; 3)此外, 受居民收入、乳品质量、销售渠道和乳糖耐受性等因素影响, 中国奶制品消费远低于亚洲平均水平。通过上述指标的对标分析和瓶颈问题诊断, 提出了在前端饲料生产优化产业布局和生产结构, 降低农业化学品投入; 而在奶牛养殖环节建议适当增加养殖规模, 降低饲料等投入成本、注重环境质量控制; 在末端消费环节则建议通过“居民营养计划”等政策制度创新拉动消费需求, 促进产业升级。该研究的全产业链指标分析和瓶颈问题诊断, 可以为我国“奶业振兴”计划提供定量科学依据[46]。此外, 该指标体系可以用于剖析奶企和奶农全产业链中的主要瓶颈问题与具体环节的限制因素, 作为奶业升级和优化的重要工具。同时该案例也可为其他农业产业问题诊断、探明优化措施提供借鉴。

4　农业绿色发展指标体系的特点与未来研究展望

4.1　农业绿色发展指标体系的科学创新性

在前人研究的基础上, 本研究在构建农业绿色发展指标体系时不仅考虑了农业的生产功能, 同时强调了农业绿色发展对资源环境代价、经济效益、民生福祉的影响, 在指标的设置上涵盖了从农业生产到食品消费整个环节; 在功能与作用上不仅停留在对于农业生产的现状评价, 更注重对农业绿色发展的理论研究和定量方法的传承与探索, 为农业绿色发展的实现路径提供科学依据和方法支撑。本研究构建的指标体系具备如下特点:

4.1.1　指标体系建立的系统性、完整性、协同性、科学性和可行性

构建的农业绿色发展指标体系突出了农业“绿色”和“发展”统筹协调发展的特点, 强调了系统性; 除了农业生产环节外, 食品加工、饮食消费、农业政策等都对资源环境代价、人体健康等方面有着不同程度的影响[47-48], 因此指标选取覆盖了整个食物系统的“食物生产-加工-消费”的全链条, 涵盖了社会、经济、生产、资源和环境等 5 个方面, 体现了完整性。未来农业绿色发展的系统设计, 需要兼顾绿色生产方式、绿色发展方式和绿色生活方式等多个目标的同时实现[49], 而国际上经济合作与发展组织(OECD)[50]、欧盟[51]等制定的农业可持续发展指标体系主要关注优质农产品生产与资源环境保护, 本研究构建的指标体系实现了指标之间互相联动, 通过改变部分指标, 相应指标可以发生变化并做出反馈, 有利于从整体上进行系统设计, 突出了协同性。国内学者基于政府目标, 分别从“资源节约、环境友好、生态保育、质量高效”[13]和“资源利用、产地环境、生态系统、绿色供给”[14]的角度建立了农业绿色发展指标体系, 一方面在指标设置缺乏环境评价的直接监测指标, 另一方面采用权重打分的方法进行评价, 强调了应用性, 而忽视了指标体系的科学性; 本研究选取的指标对于农业绿色发展的内涵、特征和目标进行了科学表达, 并根据文献资料和国际、国内产业发展水平对每个指标进行了分等定级, 设定了绿色发展目标, 有利于从科学层面分析瓶颈问题与限制因素, 体现了科学性。对于每个指标均考虑了基础数据获取的具体途径和方法, 确保每个数据都有可靠的数据来源, 体现了可行性。

4.1.2　指标选取的归类性、层次性、灵活性、普适性和关联性

在指标的选取与分类上, 将指标分为直接指标、间接指标和可选指标。直接指标直接表征区域农业绿色发展的现状、水平与特征, 具有较强的普适性。间接指标则一方面用来识别区域农业绿色发展的类型, 另一方面用来分析区域农业绿色发展的驱动机制和影响因素, 对区域农业绿色发展进行分类和评价。可选指标则考虑中国幅员辽阔、自然资源禀赋差异较大的特点, 设置能够反映区域特色的指标, 在对区域农业发展评价时根据区域自然特点和社会经济发展水平进行选择, 进一步体现了指标体系的灵活性。在指标选取时先考虑“绿色”与“发展”相协调的总体目标, 进而从社会发展、经济增长、农业生产、资源投入和生态环境等 5 个子目标入手, 来设置、选取具体的指标, 体现了指标体系的层次性。关联性则强调了指标之间的联动关系, 指标之间可以互相影响、相互作用, 进而可以通过改变指标来调控整个体系。

4.1.3　指标体系应用实例研究适用范围广

上述研究案例在不同区域的应用情况表明, 首先使用该指标体系可以剖析过去几十年中国农业发展进程中“氮素投入增加、利用效率降低、环境排放

上升”特征背后的驱动机制；其次可以系统解析中国区域尺度农业绿色发展各自的特色关键问题，分析区域特色问题针对性强；进而通过对标分析，明确产业发展与国际先进水平的差距，找出产业发展的瓶颈问题和限制因素，为产业升级和转型提供具体的改进措施并明确重要的抓手，对于产业分析的科学性强。

4.2 未来研究展望

4.2.1 指标体系的完善与国家基础数据的监测和采集

农业绿色发展本身是一个综合性的复杂系统，本文力求从科学层面进行尝试性的探索，构建一个全面、系统、定量化的评价指标体系，然而就目前指标的选取、计算和目标值的确定仍然有很大的完善和提升空间。关于指标的选取，考虑到数据可获取性的原则，本研究所确立的绝大多数指标可以通过统计数据和文献资料来获取并进行计算。但是，尽管一些生态环境指标对于农业绿色发展的意义重大，却暂时无法获取，建议未来国家科技管理部门通过设置重点研究专项予以支持。此外，建议国家加强农业生态环境监测与数据采集，并通过特定渠道进行数据公开，为农业绿色发展的评价与系统分析提供基础数据支撑。

除了依赖统计数据作为获取指标的主要来源之外，有些指标譬如杀虫剂和抗生素的使用可能需要在区域有代表性的农场进行实地调研，生物多样性则可能需要借助于遥感的手段来进行监测[10]。另外，国家尺度的指标可能不适用于区域尺度和农场尺度[52]，譬如食物自给率，在国家尺度上升为一个战略问题，但在区域尺度则仅仅反映一个区域的农业发展类型。而考虑到中国幅员辽阔，地域之间自然条件、资源禀赋和农业生产特征差异较大，今后可以尝试通过 benchmarking 的方法[35]并结合区域特点来确定各个指标的区域目标值。

4.2.2 指标体系的应用与对政策制定和产业发展的支撑

未来可首先基于本研究构建的指标体系分析中国农业绿色发展现状水平，通过对标分析阐明中国农业绿色发展的差距；然后通过 DPSIR 理论框架进一步分析指标间关系[53]，明确农业绿色发展的影响因素及驱动响应机制，为中国农业绿色发展这项国家战略的政策制定提供决策依据；进而通过 backcasting 的方法[54]，来定量农业绿色发展过程中的瓶颈问题，同时提出解决具体问题的“撬动杠杆”；最终通过指标体系与系统方法论、数学模型的结合，构建多目标的系统分析方法，系统设计中国农业绿色发展的实现路径。

5 结论

本研究基于农业绿色发展的总体目标，以食物系统的整个链条为研究边界，围绕社会、经济和生态环境等 3 个维度，基于系统性、完整性、协同性、科学性和可行性等原则，构建了 1 套中国农业绿色发展指标体系；涵盖了社会、经济、生产力、资源和环境等 5 个方面，共 53 个指标，包括 27 个直接指标、14 个间接指标和 12 个可选指标。中国农业绿色发展指标体系的构建，能够定量分析不同尺度和区域类型的农业绿色发展主要问题，剖析农业产业发展过程中主要的瓶颈问题和限制因素，最终为系统设计农业绿色发展实现路径提供研究方法。

参考文献 References

[1] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014–1015

[2] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[3] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462

[4] STOLL-KLEEMANN S, SCHMIDT U J. Reducing meat consumption in developed and transition countries to counter climate change and biodiversity loss: A review of influence factors[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(5): 1261–1277

[5] TAYLOR D C, MOHAMED Z A, SHAMSUDIN M N, et al. Creating a farmer sustainability index: A Malaysian case study[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1993, 8(4): 175–184

[6] RIGBY D, CÁCERES D. Organic farming and the sustainability of agricultural systems[J]. Agricultural Systems, 2001, 68(1): 21–40

[7] POPPE K, VROLIJK H, DOLMAN M, et al. FLINT- Farm-level indicators for new topics in policy evaluation: An introduction[J]. Studies in Agricultural Economics, 2016, 118(3): 116–122

[8] NAMBIAR K K M, GUPTA A P, FU Q L, et al. Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 87(2): 209–214

[9] VAN CALKER K J, BERENTSEN P B M, ROMERO C, et al. Development and application of a multi-attribute sustainability function for Dutch dairy farming systems[J]. Ecological Economics, 2006, 57(4): 640–658

[10] LYNCH J, DONNELLAN T, FINN J A, et al. Potential development of Irish agricultural sustainability indicators for current and future policy evaluation needs[J]. Journal of En-

vironmental Management, 2019, 230: 434–445

[11] TOLLEFSON J. UN sets out next development goals[J]. Nature, 2015, 525(7570): 434−435

[12] ZHEN L, ROUTRAY J K. Operational indicators for measuring agricultural sustainability in developing countries[J]. Environmental Management, 2003, 32(1): 34–46

[13] 魏琦, 张斌, 金书秦. 中国农业绿色发展指数构建及区域比较研究[J]. 农业经济问题, 2018, (11): 11−20
WEI Q, ZHANG B, JIN S Q. A study on construction and regional comparison of agricultural green development index in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2018, (11): 11−20

[14] 孙炜琳, 王瑞波, 姜茜, 等. 农业绿色发展的内涵与评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(4): 14−21
SUN W L, WANG R B, JIANG Q, et al. Study on connotation and evaluation of the agricultural green development[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(4): 14−21

[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] MA L, MA W Q, VELTHOF G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1279−1289

[18] 马晟祯. 中国财政农业投入的效应及规模分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014
MA C Z. Effects and scale analysis of China's fiscal agriculture input[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014

[19] CHAUDHARY A, GUSTAFSON D, MATHYS A. Multi- indicator sustainability assessment of global food systems[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 848

[20] 喻朝庆. 水-氮耦合机制下的中国粮食与环境安全[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 2018−2036
YU C Q. The coupled effects of water and nitrogen on China's food and environmental securities[J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(12): 2018−2036

[21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. WS/T 578.1—2017 中国居民膳食营养素参考摄入量 第 1 部分: 宏量营养素[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China. WS/T 578.1—2017 Chinese Dietary Reference Intakes — Part 1: Macronutrient[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018

[22] 李安宁. 聚焦重大问题 推进农业机械化供给侧结构性改革[J]. 农村牧区机械化, 2017, (4): 9−10
LI A N. Focus on major issues and promote supply side structural reform of agricultural mechanization[J]. Mechanization of Rural Pastoral Areas, 2017, (4): 9−10

[23] 联合国经济和社会事务部人口司. 世界城市化展望[R]: 纽约: 联合国经济和社会事务部人口司, 2014
United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs. The World Urbanization Prospects[R]. New York: United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 2014

[24] The World Bank. World bank open data[EB/OL]. (2019-12-26). https://data.worldbank.org/

[25] 戴小枫, 张德权, 武桐, 等. 中国食品工业发展回顾与展望[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 133−142
DAI X F, ZHANG D Q, WU T, et al. Historical review and future prospect of China's food industry development[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 133−142

[26] 温鑫. 基于 IFMOP 模型的四平市水环境承载力及环境经济系统综合规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015
WEN X. Research on water environment carrying capacity and integrated environment-economy planning of Siping City based on INMOP[D]. Changchun: Jilin University, 2015

[27] 车文斌, 潘兴扬, 周淼葭. "规划十三五, 冲刺全面小康"我们离全面小康还有多远? 山区县域篇[J]. 当代县域经济, 2015, (11): 28−31
CHE W B, PAN X Y, ZHOU M J. "Plan for the 13th five year plan, sprint to a moderately prosperous society in all respects". How far are we from a moderately prosperous society in all respects? Mountain county[J]. County Economy of the Contemporary Era, 2015, (11): 28−31

[28] EU Nitrogen Expert Panel. Nitrogen Use Efficiency (NUE) — An Indicator for the Utilization of Nitrogen in Agriculture and Food Systems[R]. Wageningen, Netherlands: Wageningen University, 2015

[29] MA L, VELTHOF G L, WANG F H, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005[J]. Science of the Total Environment, 2012, 434: 51−61

[30] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778−783
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778−783

[31] OENEMA O, VAN LIERE E, PLETTE S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. Water Science & Technology, 2004, 49(3): 101−108

[32] 王禹昕. 豫南雨养区麦田肥料和农药使用现状、存在问题及科学施用对策[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017
WANG Y X. Present situation, problems and scientific application of fertilizer and pesticide in wheat field in rainfed area south of Henan Province[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017

[33] 操信春, 吴普特, 赵西宁, 等. 1998—2008 年中国农业水足迹演变分析及评价[C]//2011 年国际智能信息技术应用学会会议论文集. Kota Kinabalu, Malaysia: AASRI, 2011: 62−67
CAO X C, WU P T, ZHAO X N, et al. Evolution analysis and evaluate of agricultural water footprint in China during 1998–2008[C]//Proceedings of 2011 AASRI Conference on

Applied Information Technology. Kota Kinabalu, Malaysia: AASRI, 2011: 62−67

[34] ZHANG Q Q, YING G G, PAN C G, et al. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: Source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6772−6782

[35] ZHANG C, JU X T, POWLSON D, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6678−6687

[36] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486−489

[37] 姚波, ROSS K, 朱晶晶, 等. 全面减排 迈向净零排放目标——中国非二氧化碳温室气体减排潜力研究[R]. 华盛顿: 世界资源研究所, 2016
YAO B, ROSS K, ZHU J J, et al. Opportunities to Enhance Non-carbon Dioxide Greenhouse Gas Mitigation in China[R]. Washington: World Resource Institute, 2016

[38] 刘军, 刘松忠, 鲁韧强, 等. 北京地区梨园土壤养分状况调查与分析[J]. 山东农业科学, 2014, 46(1): 73−75
LIU J, LIU S Z, LU R Q, et al. Investigation and analysis of soil nutrient in pear orchards in Beijing area[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(1): 73−75

[39] 中华人民共和国环境保护部. HJ 192—2015 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 192—2015 Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015

[40] 中华人民共和国生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2018 Bulletin of China's Ecological Environment[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2019

[41] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国森林法[EB/OL]. (2005-09-13) [2019-10-08]. http://www.gov.cn/banshi/2005-09/13/content_68753.htm
Central People's Government of the People's Republic of China. Forest Law of the People's Republic of China[EB/OL]. (2005-09-13) [2019-10-08]. http://www.gov.cn/banshi/2005-09/13/content_68753.htm

[42] 董红敏, 左玲玲, 魏莎, 等. 建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 180−189
DONG H M, ZUO L L, WEI S, et al. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 180−189

[43] 崔石磊, 张建杰, 佟丙辛, 等. 中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200159
CUI S L, ZHANG J J, TONG B X, et al. Spatiotemporal variation of nitrogen indicators related to agricultural green development in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200159

[44] 宋晨阳, 张建杰, 刘玲, 等. 海南岛农业绿色发展指标时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200011
SONG C Y, ZHANG J J, LIU L, et al. Spatial and temporal characteristics of agricultural green development indicators in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200011

[45] 李雨濛, 张建杰, 崔石磊, 等. 河北省县域农业绿色发展指标时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200483
LI Y M, ZHANG J J, CUI S L, et al. Temporal and spatial characteristics of agricultural green development indicators in counties of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200483

[46] 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, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200471
GAO W, ZHANG J J, ZHANG Y F, et al. Spatiotemporal characteristics of green development indicators in the whole dairy industry chain in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, DOI: 10.13930/j. cnki. cjea. 200471

[47] SPRINGMANN M, CLARK M, MASON-D'CROZ D, et al. Options for keeping the food system within environmental limits[J]. Nature, 2018, 562(7728): 519−525

[48] MA L, BAI Z H, MA W Q, et al. Exploring future food provision scenarios for China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(3): 1385−1393

[49] LIU J G, HULL V, GODFRAY H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development[J]. Nature Sustainability, 2018, 1: 466−476

[50] OECD. Agriculture and the environment[EB/OL]. (2019-10-14) [2019-12-25] http://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/agrienvironmentalindicators.htm

[51] European Environment Agency. Agriculture and Environment in EU-15 — the IRENA Indicator Report[R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2005

[52] VAN CAUWENBERGH N, BIALA K, BIELDERS C, et al. SAFE — a hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 120(2/4): 229−242

[53] OESTERWIND D, RAU A, ZAIKO A. Drivers and pressures — untangling the terms commonly used in marine science and policy[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 181: 8−15

[54] KANTER D R, SCHWOOB M H, BAETHGEN W E, et al. Translating the Sustainable Development Goals into action: A participatory backcasting approach for developing national agricultural transformation pathways[J]. Global Food Security, 2016, 10: 71−79