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

中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征

崔石磊，张建杰，佟丙辛，马林，马文奇

引用本文:
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, 28(8): 1141–1155.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200159

(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

河北省县域农业绿色发展指标时空变化特征

Temporal and spatial characteristics of agricultural green development indica–tors in counties of Hebei Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1168–1180 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200483

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

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

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

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 8 月 第 28 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2020, 28(8): 1141−1155

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200159

崔石磊, 张建杰, 佟丙辛, 马林, 马文奇. 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, 28(8): 1141−1155

CUI S L, ZHANG J J, TONG B X, MA L, MA W Q. Spatiotemporal variation of nitrogen indicators related to agricultural green development in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(8): 1141−1155

中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征*

崔石磊[1], 张建杰[1,2], 佟丙辛[1], 马 林[3], 马文奇[1**]

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000; 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)

摘 要: 氮素在农业和食物系统中的行为关乎资源、环境、食物安全和人体健康等重要问题, 是反映农业绿色发展的关键指标。本文选取 18 个与农业绿色发展密切相关的氮素指标, 并按照农业绿色发展程度从高到低分成Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级, 基于统计数据和文献资料, 通过食物链养分流动模型(NUFER)定量相关氮素指标, 分析其时空变化特征, 探讨相关氮素指标的影响因素, 为农业绿色发展提供改善意见和建议。结果表明, 1980—2017 年间全国氮素使用强度、环境排放及整体利用效率均呈现由Ⅰ级向Ⅳ级水平转变的下降趋势, 秸秆循环利用效率、大部分氮素生产类以及食物消费类的指标均呈现由Ⅳ级向Ⅰ级水平转变的上升趋势。从空间分布看, 氮素投入和环境损失较高的区域主要分布在华北地区、华东地区、华中地区以及华南地区; 食物消费水平在各地区均有提升, 其中东部地区提升更明显; 东部和北部地区的单位植物和动物蛋白产量水平相对较高, 但仍处于Ⅲ级水平; 效率类指标在 31 个省份中, 大部分地区处于Ⅲ和Ⅳ级水平。与 1980 年相比, 2017 年全国氮素指标Ⅳ级和Ⅲ级水平占比变化不大, 但Ⅰ级水平占比由 27.1%降低至 8.3%, 农业绿色发展水平整体呈下降趋势。七大地区中各个地区Ⅰ级水平占比均降低, 并且大部分地区均低于 30.0%, Ⅲ级和Ⅱ级水平的占比明显增加。在指标类型方面, 与 1980 年相比, 2017 年氮素生产类和食物消费类指标等级在Ⅳ级水平占比降低, 农业绿色发展水平呈上升趋势; 氮素环境排放类和效率类指标等级在Ⅰ级和Ⅱ级水平占比之和也在降低, 农业绿色发展水平呈下降趋势。这是由种植业和畜牧业氮素资源投入高、种植以及养殖结构改变、农牧系统生产脱节严重、社会经济发展不平衡等因素造成的。因此, 需要针对不同类型指标的时空变化特征, 通过测土配方施肥、改变种养结构和应用氮素减排技术与政策等手段实现氮素指标的优化, 推动中国农业绿色发展。

关键词: 农业绿色发展; NUFER 模型; 氮素指标; 时空变化特征

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

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

CUI Shilei[1], ZHANG Jianjie[1,2], TONG Bingxin[1], MA Lin[3], MA Wenqi[1**]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, 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)

* “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200403)资助

** 通信作者: 马文奇, 主要从事养分资源管理与利用研究。E-mail: mawq@hebau.edu.cn
崔石磊, 研究方向为植物营养调控与养分高效管理。E-mail: acuishilei@163.com

收稿日期: 2020-03-04 接受日期: 2020-05-21

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0200403).

** Corresponding author, E-mail: mawq@hebau.edu.cn

Received Mar. 4, 2020; accepted May 21, 2020

Abstract: Nitrogen is an important indicator of green development of agriculture, which is related to resources, environment, food security and human health in agricultural and food production systems. In this study, the model of NUtrient Flows in food chains, Environmental and Resources use (NUFER) was used to quantify 18 nitrogen indicators related to agricultural green development in China based on collected statistics and data from the scientific literature. Based on the potential values and thresholds reported in the literature, the levels of agricultural green development of each indicator were divided, from high to low, into levels Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ. These were used to evaluate and analyze the variations in the spatiotemporal characteristics of the nitrogen indicators, and to identify the factors influencing the relevant nitrogen indicators, which allowed us to suggest improvements for agricultural green development. From 1980–2017, the nitrogen use intensity indicators, environmental emission indicators and most of the efficiency use indicators decreased from level Ⅰ to level Ⅳ. The straw recycling efficiency indicator, most of the nitrogen production indicators and the food consumption indicators increased over time from level Ⅳ to Ⅰ. From the spatial distribution perspective, nitrogen input and environmental losses increased in the north, east, central, and south regions of China. The diet consumption level increased in all regions and was more pronounced in the eastern regions. Compared with 1980, the unit animal protein production and unit area plant protein production levels in the east and north of China were higher in 2017, but still at level Ⅲ. The levels of the efficiency indicators of agricultural green development in all regions of China were low, and most regions were still at level Ⅲ and Ⅳ in 2017. Compared to 1980, the nationwide proportion of nitrogen indicators at levels Ⅳ and Ⅲ were relatively stable in 2017, and the proportion of indicators at level Ⅰ decreased from 27.1% to 8.3%. From 1980 to 2017, the levels of agricultural green development across the whole China decreased. Among the seven major regions, the proportion of level Ⅰ in each region decreased (with most areas below 30.0%), while the proportion of levels Ⅲ and Ⅱ significantly increased. In terms of indicator types, the proportion of nitrogen production and food consumption indicators at level Ⅳ decreased in 2017 compared with 1980, and the sum of the proportion of nitrogen environmental emissions and efficiency indicators at levels Ⅰ and Ⅱ also decreased. The reasons for these trends include the irrational use of nitrogen resources in crop-livestock systems, changes in planting and breeding structures, inadequate integration of agriculture and livestock husbandry, and uneven development of the economy and society. Therefore, based on the characteristics of the spatiotemporal changes of these different types of indicators, it is necessary to optimize the use of nitrogen to improve the nitrogen indicators by means of soil fertilization, changing the cultivation structure, applying nitrogen emission reduction technologies and policies, and promoting agricultural green development in China.

Keywords: Agricultual green development; NUFER model; Nitrogen indicators; Spatiotemporal variation characteristics

中国作为世界农业大国之一，用仅占世界 7%的耕地满足了全球约 22%人口的粮食需求[1]，为解决全球粮食安全问题做出重要贡献。过去几十年，为了保证农产品有效供给，集约化农业快速发展，化肥、农药、农膜等资源投入大幅增加，同时也付出了巨大的环境代价[2-3]。因此，转变农业发展方式、实现农业绿色发展势在必行[4]。氮素作为维持农业生产的基础，在农业绿色发展中发挥着不可替代的作用。目前，因氮素管理不当导致的水体富营养化、土壤酸化以及温室气体大量排放等一系列环境问题十分突出[5-7]，并且存在较强的时空差异性[8]，成为农业绿色发展不可忽视的因素。由此可见，利用相关氮素指标来评价中国农业绿色发展对中国农业未来发展具有重要意义。

氮素一直是国内外农业资源与环境领域的研究热点。在国际上，联合国提出了 2030 年可持续发展议程，列出 17 个可持续发展目标[9]，其中有 8 个涉及农业和食物系统。欧洲、美国以及印度等也开展了国家尺度的氮评估工作，以食物系统氮素为研究对象，从经济、政策、环境、人文、资源、生物多样性等方面进行整体评价[10-12]。国际上指出氮素已经超越了地球生物化学元素流动的安全阈值[13]。在国内，Cui 等[14]利用模型对国家尺度的氮素进行了分析，结果表明 1980 年以来中国大量的氮素投入导致了严重的环境影响，在未来几十年氮素负面环境影响仍可能会加剧。Gu 等[15-16]评估了氮素在中国农业、森林、草地等 7 个重要系统的氮素流动，得出快速增加的氮素对人类健康、耕地的可持续性以及中国及其周边环境造成了日益严重的威胁；并且运用质量平衡方法，分析了中国农田、圈养牲畜饲养场和放牧草地 3 个农业子系统的氮素利用效率对粮食安全和环境的影响，并指出未来农业发展面临着提高生产力和减少氮素损失的多重挑战。Ma 等[17]的研究结果表明，在食物链系统中，氮素的利用效率和损失在区域尺度存在较大差异。Wang 等[18]的研究表明，在县域尺度，热点区域粮食生产更密集的

同时, 氮素的损失占总损失量的一半以上, 并提出了针对不同区域的污染控制技术。中国畜禽业的发展虽然提高了动物源蛋白产量, 但同时也导致了温室气体排放加重和水体氮素损失增加[19]。在张建杰等[20]构建的农业绿色发展指标体系中, 与氮相关的指标占到 1/3 以上。可见, 农业和食物系统氮素行为特征已经成为农业发展的重要衡量指标[4], 然而, 目前氮素的研究工作多集中在评价氮素本身对农业的贡献和环境影响, 少有研究以氮素作为核心指标进行农业可持续发展或农业绿色发展的评价[21]。

DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)框架能够全面反映研究系统各个环节存在的问题, 被广泛应用于解决可持续发展、环境管理、水土资源等方面的问题, 具有可行性和可操作性[22]。为此, 本文从农业和食物系统氮素流动特征出发, 结合 DPSIR 框架, 选择与农业绿色发展密切相关的氮素指标并按照农业绿色发展程度进行分级, 研究中国农业绿色发展相关氮素指标的时空变化特征, 以期为中国农业绿色发展的氮素优化管理提供依据。

1　材料与方法

1.1　指标的选取、分类原则以及分级依据

本研究基于 DPSIR 框架, 借助中国农业绿色发展指标体系及其分级标准[20], 选取了涵盖整个食物系统的 18 个与氮素相关的指标, 并按照食物系统的氮素流向把指标分为生产类、利用效率类、环境排放类和食物消费类 4 个类别(表 1)。

中国农业绿色发展指标体系是张建杰等[20]根据农业绿色发展的科学内涵、基本特征和主要目标, 从社会、经济和生态环境等 3 个维度入手, 建立的适用于科学研究的指标体系。指标的分级标准原则是通过查阅文献、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, 用Ⅰ级表示绿色发展程度最好、Ⅱ级次之、Ⅲ级较差、Ⅳ级最差。

1.2　氮素指标的定义

本文所选 18 个氮素指标全部来源于张建杰等[20]建立的中国农业绿色发展指标体系, 其定义和详细的说明见表 1 和张建杰等[20]文章。

1.3　数据来源

本研究数据来源包括统计数据和文献数据两部分, 具体各个指标的数据来源见表 1。

统计数据: 1980—2017 年全国(不包括香港、澳门、台湾地区)及 31 个省(市、自治区)人口、化肥投入量、耕地面积、农作物播种面积及产量、畜禽存栏量和出栏量以及畜禽产品产量, 来自于中国统计年鉴[23]、中国畜牧兽医年鉴[24]、中国农村统计年鉴[25]及中国农业统计资料[26]、国家统计局官方网站发布的数据[27]。

文献数据: 1980—2017 年期间全国(不包括香港、澳门、台湾地区)以及 31 个省份种植业不同作物养分含量、生物固氮, 土壤氮沉降、反硝化、氮淋溶、径流排放系数, 农牧业的 NH_3 和 N_2O 排放系数、反硝化系数, 畜禽产品分配系数、畜禽产品氮养分含量、畜禽排泄系数, 来源于 Ma 等研究结果[17,28-29]。

1.4　指标计算方法

本文使用 NUFER(NUtrient flows in Food chains, Environment and Resources use)模型[28], 对氮素指标进行定量计算。具体计算方法参照张建杰等[20]的研究。NUFER 模型是 Ma 等[28]开发的国家和区域尺度食物链系统氮磷流动模型, 模型以“土壤-作物生产-畜禽生产-家庭消费”为边界, 计算系统中氮磷流动特征、利用效率以及环境损失。

指标的标准化处理: 为了便于分析氮素指标在时间维度的变化特征, 本文定义了氮素指标变化率。氮素指标变化率是以 1980 年数值为基准值(100%), 计算 1981—2017 年氮素指标相对于基准值的变化率, 以此来表征氮素指标的变化, 计算公式(1)如下:

$$A_{ij}=B_{ij}/C_{1980}\times100\% \quad (j=1980, 1981, 1982, \cdots, 2017) \quad (1)$$

式中: $A_{i,j}$ 为指标 i 相对于 1980 年在 j 年的变化率, $B_{i,j}$ 为指标 i 在 j 年的数值, C_{1980} 为 1980 年指标的数值。

本文把全国分成 7 大分区[30], 进行全国氮素 4 大类(生产类、利用效率类、环境排放类、食物消费类)指标及其农业绿色发展水平的比较, 具体把 7 大分区、全国和 4 大类指标所包含的所有省、市、自治区的每个指标按照 4 个农业绿色发展等级进行统计, 计算 4 个等级的占比, 计算公式如下:

$$D_{mn}=E_{mn}/F_n\times100\% \quad (2)$$

式中: D 为 m 地区或指标类别 n 等级所处百分比, E 为所处等级省、市、自治区的个数, F 为所有等级省、市、自治区的个数, m 为地区或指标类别名称(m=华北地区、东北地区、华东地区、华中地区、华南地区、西南地区、西北地区、全国、生产类、利用效率类、环境排放类、食物消费类); n 为等级(n=Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ)。

表 1 中国农业绿色发展相关氮素指标

Table 1 Nitrogen indicators related to agriculture green development in China

分类 Category	氮素指标 Nitrogen indicator	计算方法 Calculation method	数据来源文献 Data source reference	分级标准 Grading standard			
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
生产类 Production	氮素使用强度 N use intensity (kg·hm^{-2})	氮素总投入量/总播种面积 Total N input/total planting area	[23,25]	<180	180~225	225~315	>315
	单位动物蛋白产量 Protein production per livestock unit (kg·LU^{-1})	畜禽动物蛋白产量(肉、蛋、奶)/标准动物单位总数 Livestock and poultry protein production (meat, eggs, milk)/total number of standard animal units	[24,27]	>60	40~60	20~40	<20
	单位面积植物蛋白产量 Protein production per unit cultivated land (kg·hm^{-2})	种植业植物蛋白产量/耕地面积 Planting plant protein yield/cultivated area	[23,25,27]	>1 125	750~1 125	450~750	<450
利用效率类 Use efficiency	畜牧农业源饲料氮自给率 Feed N self-sufficiency rate (%)	[17]	[24,29]	>80	65~80	50~65	<50
	畜牧系统氮素利用效率 N use efficiency in animal production (%)	[17]	[24,27,29]	>19	15~19	10~15	<10
	农田系统氮素利用效率 N use efficiency in crop production (%)	[17]	[17,27]	>70	50~70	30~50	<30
	粪尿循环利用率 Manure recycling rate (%)	[17]	[17,24,28]	>75	55~75	35~55	<35
	秸秆循环利用效率 Straw recycling rate (%)	[17]	[17,27]	>80	65~80	50~65	<50
环境排放类 Environmental emission	农田氮素盈余 N surplus in farmland (kg·hm^{-2})	[17]	[17]	<80	80~160	160~240	>240
	农田氮素径流 N runoff in farmland (kg·hm^{-2})	[17]	[17]	<6	6~9	9~18	>18
	农田氮素淋洗 N leaching in farmland (kg·hm^{-2})	[17]	[17]	<10	10~20	20~30	>30
	农业系统氨挥发 NH_3 volatilization in agricultural system (kg·hm^{-2})	[17]	[17]	<60	60~90	90~120	>120
	农业源温室气体排放强度 Greenhouse gases emission intensity per unit cultivated land area [kg(CO_2-eq)·hm^{-2}]	[17]	[17]	<2 000	2 000~3 000	3 000~4 000	>4 000
	生产单位食物氮素环境代价 Reactive N losses per unit food N [kg(N)·kg^{-1}(N)]	整个食物系统的活性氮损失总量/食物氮生产总量 Total active N loss/total food N production of food system	[17,27]	<3	3~4.5	4.5~6	>6
食物消费类 Food consumption	动物蛋白消费比例 Proportion of animal protein in protein consumption (%)	动物性食品蛋白摄入量/总蛋白摄入量 Animal food protein intake/total protein intake	[17]	30~35	25~30 35~40	20~25 40~45	<20 >40
	人均蛋白质摄入量 Per capita protein consumption (kg·cap.$^{-1}$)	[17]	[17]	>23.7	21.3~23.7	19~21.3	<19
	食物自给率 Food self-sufficiency rate (%)	生产食物的氮素携出量/整个食物系统氮素投入量 N output from food production/N input of food system	[17]	>100	75~100	50~75	<50
	食物系统氮素利用效率 N use efficiency in food system (%)	[17]	[17,23-24,27]	>30	25~30	18~25	<18

LU 为 livestock unit, 表示标准牛当量(折合 500 kg 奶牛), 不同动物的折换比例分别为: 奶牛, 1∶1; 肉牛、水牛和黄牛、驴、骡、马, 0.8∶1; 猪, 0.3∶1; 羊, 0.1∶1; 蛋鸡, 0.014∶1; 肉鸡, 0.007∶1; 兔子, 0.002∶1。LU is livestock unit, which means the standard cattle equivalent (equivalent to 500 kg cows). The conversion ratio of different animals is 1∶1 for cows; 0.8∶1 for beef cattle, buffalo and yellow cattle, donkeys, mules, horses; 0.3∶1 for pig; 0.1∶1 for sheep; 0.014∶1 for layer; 0.007∶1 for broiler; 0.002∶1 for rabbit.

2　结果与分析

2.1　氮素生产类指标的时空变化

由图 1 可知，1980—2017 年全国氮素生产类指标变化率呈上升趋势。氮素使用强度 1980—2014 年由Ⅰ级降至Ⅳ级水平，农业绿色发展水平降低，之后转变为Ⅲ级水平；单位动物蛋白产量和单位面积植物蛋白产量 2017 年均比 1980 年增加约 150.0%，并且指标等级由Ⅳ级升至Ⅲ级水平；畜牧农业源饲料氮自给率增加了 50.0%，但一直处于Ⅳ级水平。

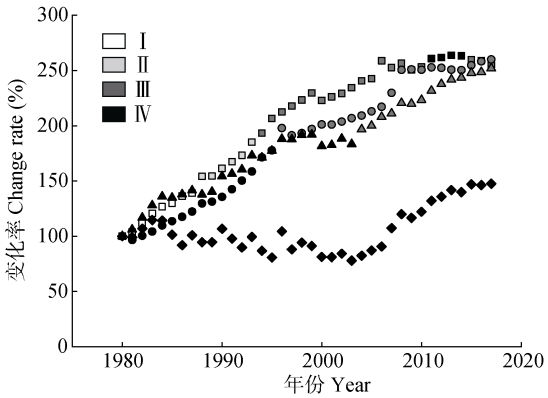

图 1　1980—2017 年中国农业绿色发展氮素生产类指标的时间变化

Fig. 1　Time variation of nitrogen production indicators of agricultural green development in China from 1980 to 2017

表 2 表明 1980 年 31 个省份氮素使用强度处于Ⅰ级水平，其他 3 个指标均处于Ⅳ级水平。与 1980 年相比，2017 年氮素使用强度包括华北地区和华东地区在内的 23 个省份转变为Ⅲ级和Ⅳ级水平；单位动物蛋白产量和单位面积植物蛋白产量各个省份等级均有所提高，其中单位动物蛋白产量在西北地区、东北地区以及华北地区转变为Ⅲ级水平；畜牧农业源饲料氮自给率各地区变化不明显，仅黑龙江省和吉林省转变为Ⅰ级水平。

2.2　氮素利用效率类指标的时空变化

如图 2 所示，1980—2017 年畜牧系统氮素利用效率和秸秆循环利用效率呈上升趋势；粪尿循环利用率和农田系统氮素利用效率呈先降低后上升的趋势。畜牧系统氮素利用效率变化速率最快，增加了 1.5 倍，但仍处于Ⅳ级水平；秸秆循环利用效率 2016 年以后达到Ⅱ级水平；农田系统氮素利用效率在 2007 年以后有所上升，并在 2017 年达到Ⅲ级水平；粪尿循环利用率 2011 年以后有所升高，但自 2004 年一直处于Ⅳ级水平。

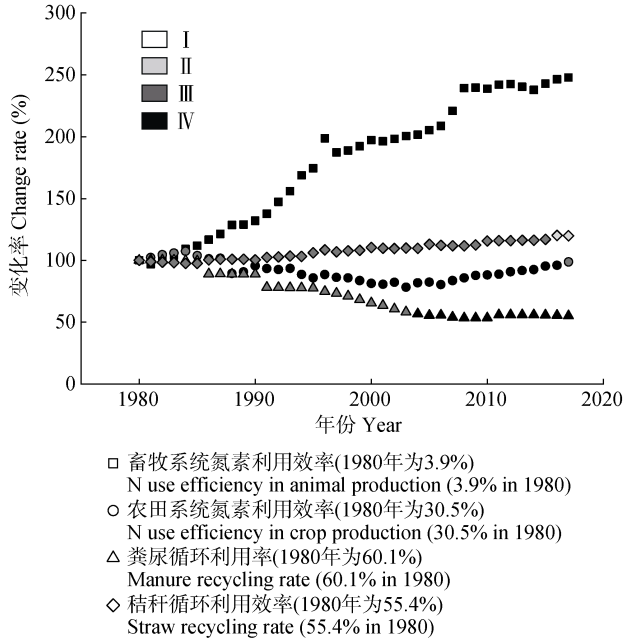

图 2　1980—2017 年中国农业绿色发展氮素利用效率类指标的时间变化

Fig. 2　Time variation of nitrogen utilization efficiency indicators of agricultural green development in China from 1980 to 2017

由表 3 可知，1980 年畜牧系统氮素利用效率、秸秆循环利用效率和农田系统氮素利用效率整体处于Ⅳ级和Ⅲ级水平，其中农田系统氮素利用效率有明显的南北差异；粪尿循环利用率内蒙古、西藏和西北地区处于Ⅳ级水平，其他地区处于Ⅱ级水平。与 1980 年相比，2017 年 31 个省份仅粪尿循环利用率指标等级整体降低，并且处于Ⅳ级和Ⅲ级水平；其他指标的指标等级整体上升，其中畜牧系统氮素利用效率华北地区、东北和华东部分地区共 16 个省份转变为Ⅲ级水平。

2.3　氮素环境排放类指标的时空变化

1980—2017 年氮素环境排放类指标总体呈先上升后下降的趋势，增长幅度除农业源温室气体(GHG)排放强度之外，均为 1.5~3.0 倍(图 3a, 3b)，农业绿色发展等级均由Ⅰ级向Ⅳ级水平方向转变的同时，农业绿色发展水平呈降低趋势。2017 年仅农业源温室气体排放强度农业绿色发展等级最低，处于Ⅳ级水平。

表 2 1980 年和 2017 年中国各省(市、自治区)农业绿色发展氮素生产类指标的变化

Table 2 Variation of nitrogen production indicators of agricultural green development in different provinces (cities, autonomous regions) of China in 1980 and 2017

分区 Partition	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	氮素使用强度 N use intensity ($kg \cdot hm^{-2}$)		单位动物蛋白产量 Protein production per livestock unit ($kg \cdot LU^{-1}$)		单位面积植物蛋白产量 Protein production per unit cultivated land ($kg \cdot hm^{-2}$)		畜牧农业源饲料氮自给率 Feed N self-sufficiency rate (%)	
		1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017
		数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)
华北地区 North China	北京市 Beijing	145.0(Ⅰ)	704.1(Ⅳ)	19.7(Ⅳ)	43.0(Ⅱ)	327.4(Ⅳ)	756.1(Ⅱ)	13.8(Ⅳ)	10.7(Ⅳ)
	天津市 Tianjin	74.4(Ⅰ)	324.4(Ⅳ)	16.5(Ⅳ)	45.3(Ⅱ)	204.2(Ⅳ)	700.7(Ⅲ)	26.6(Ⅳ)	26.4(Ⅳ)
	河北省 Hebei	101.3(Ⅰ)	302.3(Ⅲ)	10.8(Ⅳ)	46.7(Ⅱ)	206.1(Ⅳ)	730.4(Ⅲ)	31.9(Ⅳ)	30.1(Ⅳ)
	山西省 Shanxi	85.8(Ⅰ)	205.2(Ⅱ)	7.3(Ⅳ)	44.5(Ⅱ)	177.8(Ⅳ)	522.7(Ⅲ)	29.9(Ⅳ)	58.6(Ⅲ)
东北地区 Northeast China	内蒙古自治区 Inner-Mongolia	48.1(Ⅰ)	185.3(Ⅱ)	8.3(Ⅳ)	50.4(Ⅱ)	90.8(Ⅳ)	475.8(Ⅲ)	5.1(Ⅳ)	44.2(Ⅳ)
	辽宁省 Liaoning	148.7(Ⅰ)	303.1(Ⅲ)	17.5(Ⅳ)	41.5(Ⅱ)	350.0(Ⅳ)	772.2(Ⅱ)	35.8(Ⅳ)	41.2(Ⅳ)
	吉林省 Jilin	127.0(Ⅰ)	272.3(Ⅲ)	11.0(Ⅳ)	42.6(Ⅱ)	249.6(Ⅳ)	829.8(Ⅱ)	38.8(Ⅳ)	112.9(Ⅰ)
	黑龙江省 Heilongjiang	65.4(Ⅰ)	151.7(Ⅰ)	11.3(Ⅳ)	53.0(Ⅱ)	239.9(Ⅳ)	597.1(Ⅲ)	41.9(Ⅳ)	104.1(Ⅰ)
华东地区 East China	上海市 Shanghai	184.3(Ⅰ)	312.6(Ⅲ)	23.8(Ⅳ)	36.0(Ⅲ)	115.2(Ⅳ)	520.3(Ⅲ)	2.3(Ⅳ)	10.8(Ⅳ)
	江苏省 Jiangsu	147.8(Ⅰ)	313.0(Ⅲ)	17.9(Ⅳ)	33.0(Ⅲ)	151.9(Ⅳ)	674.4(Ⅲ)	6.9(Ⅳ)	20.3(Ⅳ)
	浙江省 Zhejiang	148.4(Ⅰ)	346.8(Ⅳ)	15.6(Ⅳ)	28.3(Ⅲ)	85.1(Ⅳ)	491.5(Ⅲ)	4.8(Ⅳ)	15.1(Ⅳ)
	安徽省 Anhui	115.9(Ⅰ)	244.9(Ⅲ)	13.0(Ⅳ)	32.1(Ⅲ)	126.7(Ⅳ)	621.2(Ⅲ)	10.9(Ⅳ)	22.7(Ⅳ)
	福建省 Fujian	152.7(Ⅰ)	487.1(Ⅳ)	13.6(Ⅳ)	28.3(Ⅲ)	83.1(Ⅳ)	508.7(Ⅲ)	10.3(Ⅳ)	7.5(Ⅳ)
	江西省 Jiangxi	90.4(Ⅰ)	184.3(Ⅱ)	12.3(Ⅳ)	25.2(Ⅲ)	38.6(Ⅳ)	436.9(Ⅳ)	4.0(Ⅳ)	11.3(Ⅳ)
	山东省 Shandong	142.0(Ⅰ)	281.9(Ⅲ)	13.4(Ⅳ)	38.8(Ⅲ)	289.0(Ⅳ)	843.6(Ⅱ)	31.5(Ⅳ)	30.0(Ⅳ)
华中地区 Central China	河南省 Henan	106.2(Ⅰ)	299.4(Ⅲ)	8.0(Ⅳ)	35.5(Ⅲ)	236.1(Ⅳ)	772.8(Ⅱ)	24.3(Ⅳ)	28.9(Ⅳ)
	湖北省 Hubei	120.8(Ⅰ)	289.1(Ⅲ)	13.6(Ⅳ)	28.2(Ⅲ)	96.8(Ⅳ)	528.7(Ⅲ)	6.2(Ⅳ)	15.5(Ⅳ)
	湖南省 Hunan	110.9(Ⅰ)	241.7(Ⅲ)	14.6(Ⅳ)	23.5(Ⅲ)	54.7(Ⅳ)	465.9(Ⅲ)	4.3(Ⅳ)	11.2(Ⅳ)
华南地区 South China	广东省 Guangdong	150.8(Ⅰ)	419.7(Ⅳ)	14.6(Ⅳ)	23.9(Ⅲ)	82.5(Ⅳ)	496.6(Ⅲ)	6.3(Ⅳ)	10.3(Ⅳ)
	广西壮族自治区 Guangxi	109.6(Ⅰ)	268.1(Ⅲ)	10.4(Ⅳ)	22.4(Ⅲ)	76.4(Ⅳ)	447.8(Ⅳ)	5.8(Ⅳ)	16.6(Ⅳ)
	海南省 Hainan	150.8(Ⅰ)	425.6(Ⅳ)	14.6(Ⅳ)	24.8(Ⅲ)	82.5(Ⅳ)	429.1(Ⅳ)	6.3(Ⅳ)	10.1(Ⅳ)
西南地区 Southwest China	重庆市 Chongqing	131.0(Ⅰ)	248.4(Ⅲ)	12.2(Ⅳ)	25.2(Ⅲ)	169.3(Ⅳ)	403.1(Ⅳ)	9.8(Ⅳ)	22.9(Ⅳ)
	四川省 Sichuan	131.0(Ⅰ)	247.3(Ⅲ)	12.2(Ⅳ)	23.9(Ⅲ)	169.3(Ⅳ)	518.2(Ⅲ)	9.8(Ⅳ)	18.8(Ⅳ)
	贵州省 Guizhou	128.4(Ⅰ)	165.0(Ⅰ)	5.6(Ⅳ)	24.6(Ⅲ)	150.2(Ⅳ)	311.5(Ⅳ)	9.3(Ⅳ)	29.0(Ⅳ)
	云南省 Yunnan	120.3(Ⅰ)	278.1(Ⅲ)	4.8(Ⅳ)	27.2(Ⅲ)	139.4(Ⅳ)	389.3(Ⅳ)	7.7(Ⅳ)	24.0(Ⅳ)
	西藏自治区 Tibet	26.6(Ⅰ)	156.7(Ⅰ)	4.5(Ⅳ)	58.1(Ⅱ)	134.7(Ⅳ)	580.8(Ⅲ)	0.1(Ⅳ)	5.6(Ⅳ)
西北地区 Northwest China	陕西省 Shaanxi	87.1(Ⅰ)	367.7(Ⅳ)	7.9(Ⅳ)	39.4(Ⅲ)	163.3(Ⅳ)	513.7(Ⅲ)	18.9(Ⅳ)	40.3(Ⅳ)
	甘肃省 Gansu	58.6(Ⅰ)	169.9(Ⅰ)	5.2(Ⅳ)	40.2(Ⅱ)	148.0(Ⅳ)	413.9(Ⅳ)	6.7(Ⅳ)	35.2(Ⅳ)
	青海省 Qinghai	53.6(Ⅰ)	129.8(Ⅰ)	5.2(Ⅳ)	70.1(Ⅰ)	197.3(Ⅳ)	341.9(Ⅳ)	0.3(Ⅳ)	4.8(Ⅳ)
	宁夏回族自治区 Ningxia	77.5(Ⅰ)	277.9(Ⅲ)	5.1(Ⅳ)	90.7(Ⅰ)	110.3(Ⅳ)	434.4(Ⅳ)	6.7(Ⅳ)	30.4(Ⅳ)
	新疆维吾尔自治区 Xinjiang	56.5(Ⅰ)	262.8(Ⅲ)	6.8(Ⅳ)	45.5(Ⅱ)	169.0(Ⅳ)	424.0(Ⅳ)	5.3(Ⅳ)	25.6(Ⅳ)

表 3　1980 年和 2017 年中国各省(市、自治区)农业绿色发展氮素利用效率类指标的变化

Table 3　Variation of nitrogen utilization efficiency indicators of agricultural green development in different provinces (cities, autonomous regions) of China in 1980 and 2017

分区 Partition	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	畜牧系统氮素利用效率 N use efficiency in animal production (%)		农田系统氮素利用效率 N use efficiency in crop production (%)		粪尿循环利用率 Manure recycling rate (%)		秸秆循环利用效率 Straw recycling rate (%)	
		1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017
		数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)
华北地区 North China	北京市 Beijing	7.3(Ⅳ)	12.4(Ⅲ)	36.1(Ⅲ)	17.2(Ⅳ)	56.2(Ⅱ)	33.5(Ⅳ)	51.3(Ⅲ)	71.1(Ⅱ)
	天津市 Tianjin	6.5(Ⅳ)	13.4(Ⅲ)	43.9(Ⅲ)	34.6(Ⅲ)	57.0(Ⅱ)	35.0(Ⅲ)	51.4(Ⅲ)	68.3(Ⅱ)
	河北省 Hebei	4.1(Ⅳ)	12.5(Ⅲ)	32.6(Ⅲ)	38.7(Ⅲ)	59.5(Ⅱ)	31.9(Ⅳ)	55.0(Ⅲ)	71.2(Ⅱ)
	山西省 Shanxi	2.8(Ⅳ)	12.3(Ⅲ)	33.2(Ⅲ)	40.7(Ⅲ)	61.2(Ⅱ)	30.3(Ⅳ)	54.5(Ⅲ)	72.0(Ⅱ)
东北地区 Northeast China	内蒙古自治区 Inner-Mongolia	2.7(Ⅳ)	8.8(Ⅳ)	30.2(Ⅲ)	41.1(Ⅲ)	6.4(Ⅳ)	4.4(Ⅳ)	57.4(Ⅲ)	70.6(Ⅱ)
	辽宁省 Liaoning	7.3(Ⅳ)	14.1(Ⅲ)	37.7(Ⅲ)	40.8(Ⅲ)	58.5(Ⅱ)	31.7(Ⅳ)	50.5(Ⅲ)	70.5(Ⅱ)
	吉林省 Jilin	4.5(Ⅳ)	12.8(Ⅲ)	31.5(Ⅲ)	48.8(Ⅲ)	60.8(Ⅱ)	34.3(Ⅳ)	52.1(Ⅲ)	70.3(Ⅱ)
	黑龙江省 Heilongjiang	4.1(Ⅳ)	12.2(Ⅲ)	58.7(Ⅱ)	63.0(Ⅱ)	60.1(Ⅱ)	36.2(Ⅲ)	53.7(Ⅲ)	65.7(Ⅱ)
华东地区 East China	上海市 Shanghai	8.6(Ⅳ)	10.4(Ⅲ)	10.0(Ⅳ)	26.6(Ⅳ)	54.9(Ⅲ)	36.0(Ⅳ)	46.6(Ⅳ)	64.2(Ⅲ)
	江苏省 Jiangsu	6.0(Ⅳ)	12.1(Ⅲ)	16.5(Ⅳ)	34.5(Ⅲ)	56.3(Ⅱ)	31.0(Ⅲ)	59.9(Ⅲ)	64.4(Ⅲ)
	浙江省 Zhejiang	5.1(Ⅳ)	10.1(Ⅲ)	9.2(Ⅳ)	22.7(Ⅳ)	55.8(Ⅱ)	32.9(Ⅳ)	62.3(Ⅲ)	64.6(Ⅲ)
	安徽省 Anhui	4.6(Ⅳ)	11.7(Ⅲ)	17.5(Ⅳ)	40.6(Ⅲ)	60.0(Ⅱ)	30.8(Ⅳ)	69.5(Ⅱ)	64.1(Ⅲ)
	福建省 Fujian	4.9(Ⅳ)	13.6(Ⅲ)	8.7(Ⅳ)	16.7(Ⅳ)	58.6(Ⅱ)	33.5(Ⅳ)	67.7(Ⅱ)	70.0(Ⅱ)
	江西省 Jiangxi	4.3(Ⅳ)	8.6(Ⅳ)	6.8(Ⅳ)	37.9(Ⅲ)	59.1(Ⅱ)	35.6(Ⅲ)	56.9(Ⅲ)	63.1(Ⅲ)
	山东省 Shandong	5.4(Ⅳ)	13.6(Ⅲ)	32.6(Ⅲ)	47.9(Ⅲ)	58.4(Ⅱ)	31.4(Ⅳ)	64.4(Ⅲ)	70.1(Ⅱ)
华中地区 Central China	河南省 Henan	3.0(Ⅳ)	11.2(Ⅲ)	35.6(Ⅲ)	41.3(Ⅲ)	61.6(Ⅱ)	31.5(Ⅳ)	63.6(Ⅲ)	69.4(Ⅱ)
	湖北省 Hubei	5.0(Ⅳ)	9.3(Ⅳ)	12.8(Ⅳ)	29.3(Ⅳ)	59.2(Ⅱ)	33.4(Ⅳ)	59.3(Ⅲ)	63.8(Ⅲ)
	湖南省 Hunan	5.3(Ⅳ)	7.4(Ⅳ)	7.9(Ⅳ)	30.8(Ⅲ)	58.0(Ⅱ)	34.2(Ⅳ)	64.2(Ⅲ)	63.8(Ⅲ)
华南地区 South China	广东省 Guangdong	5.9(Ⅳ)	10.0(Ⅳ)	8.8(Ⅳ)	18.9(Ⅳ)	60.2(Ⅱ)	35.0(Ⅲ)	61.3(Ⅲ)	54.4(Ⅲ)
	广西壮族自治区 Guangxi	4.1(Ⅳ)	8.6(Ⅳ)	11.2(Ⅳ)	26.7(Ⅳ)	61.9(Ⅱ)	35.7(Ⅲ)	52.7(Ⅲ)	36.0(Ⅳ)
	海南省 Hainan	5.9(Ⅳ)	9.6(Ⅳ)	8.8(Ⅳ)	16.1(Ⅳ)	60.2(Ⅱ)	34.7(Ⅳ)	61.3(Ⅲ)	56.7(Ⅲ)
西南地区 Southwest China	重庆市 Chongqing	4.3(Ⅳ)	8.6(Ⅳ)	20.7(Ⅳ)	26.0(Ⅳ)	59.4(Ⅱ)	32.9(Ⅳ)	68.3(Ⅱ)	74.9(Ⅱ)
	四川省 Sichuan	4.3(Ⅳ)	7.9(Ⅳ)	20.7(Ⅳ)	33.5(Ⅲ)	59.4(Ⅱ)	33.7(Ⅳ)	68.3(Ⅱ)	70.0(Ⅱ)
	贵州省 Guizhou	2.0(Ⅳ)	7.0(Ⅳ)	18.7(Ⅳ)	30.2(Ⅲ)	62.3(Ⅱ)	36.1(Ⅲ)	58.8(Ⅲ)	72.6(Ⅱ)
	云南省 Yunnan	1.7(Ⅳ)	7.4(Ⅳ)	18.5(Ⅳ)	22.4(Ⅳ)	62.8(Ⅱ)	35.1(Ⅲ)	57.5(Ⅲ)	59.9(Ⅲ)
	西藏自治区 Tibet	1.5(Ⅳ)	7.8(Ⅳ)	81.0(Ⅰ)	59.3(Ⅱ)	0.3(Ⅳ)	0.2(Ⅳ)	50.0(Ⅳ)	71.1(Ⅱ)
西北地区 Northwest China	陕西省 Shaanxi	2.9(Ⅳ)	10.0(Ⅲ)	30.0(Ⅳ)	22.4(Ⅳ)	60.7(Ⅱ)	32.0(Ⅳ)	57.5(Ⅲ)	71.4(Ⅱ)
	甘肃省 Gansu	2.0(Ⅳ)	7.7(Ⅳ)	40.4(Ⅲ)	39.0(Ⅲ)	17.5(Ⅳ)	15.5(Ⅳ)	63.4(Ⅲ)	75.5(Ⅱ)
	青海省 Qinghai	1.8(Ⅳ)	8.5(Ⅳ)	58.9(Ⅱ)	42.2(Ⅲ)	1.1(Ⅳ)	0.4(Ⅳ)	69.4(Ⅱ)	72.8(Ⅱ)
	宁夏回族自治区 Ningxia	2.2(Ⅳ)	12.5(Ⅲ)	22.8(Ⅳ)	25.0(Ⅳ)	63.2(Ⅱ)	33.0(Ⅳ)	63.4(Ⅲ)	73.6(Ⅱ)
	新疆维吾尔自治区 Xinjiang	2.3(Ⅳ)	7.5(Ⅳ)	47.8(Ⅲ)	25.8(Ⅳ)	1.7(Ⅳ)	3.8(Ⅳ)	50.6(Ⅲ)	47.2(Ⅳ)

由表 4 可知, 1980 年氮素环境排放类指标区域差异分布明显, 仅华北、东北、西北以及西藏地区处于Ⅰ级水平。与 1980 年相比, 2017 年环境排放类指标除东北地区和西北地区仍处于Ⅰ级水平外, 其他地区农业绿色发展等级均降低, 其中华北地区、华中地区以及华东地区降至Ⅲ级和Ⅳ级水平。

2.4　氮素食物消费类指标的时空变化

由图 4 可知, 1980—2017 年人均蛋白质摄入量和动物蛋白消费比例呈上升趋势, 由Ⅳ级水平升至Ⅱ级水平, 农业绿色发展水平呈上升趋势; 食物自给率呈下降趋势, 但一直处于Ⅰ级水平; 食物系统氮素利用效率呈先下降后上升的趋势, 由Ⅱ级降至Ⅳ级水平。

表 5 显示, 1980 年人均蛋白质摄入量和动物蛋白消费比例 31 个省份均处于Ⅳ级水平; 食物自给率 22 个省份处于Ⅰ级级水平, 仅华南及其周边地区处于Ⅳ级水平; 而食物系统氮素利用效率仅天津市、辽宁省以及河南省等 8 个省份处于Ⅱ级和Ⅰ级水平, 其他 23 个省份处于Ⅲ级和Ⅳ级水平。与 1980 年相比, 2017 年 31 个省份除食物系统氮素利用效率处于Ⅱ级和Ⅰ级水平的省份减少外, 其余指标均增加。

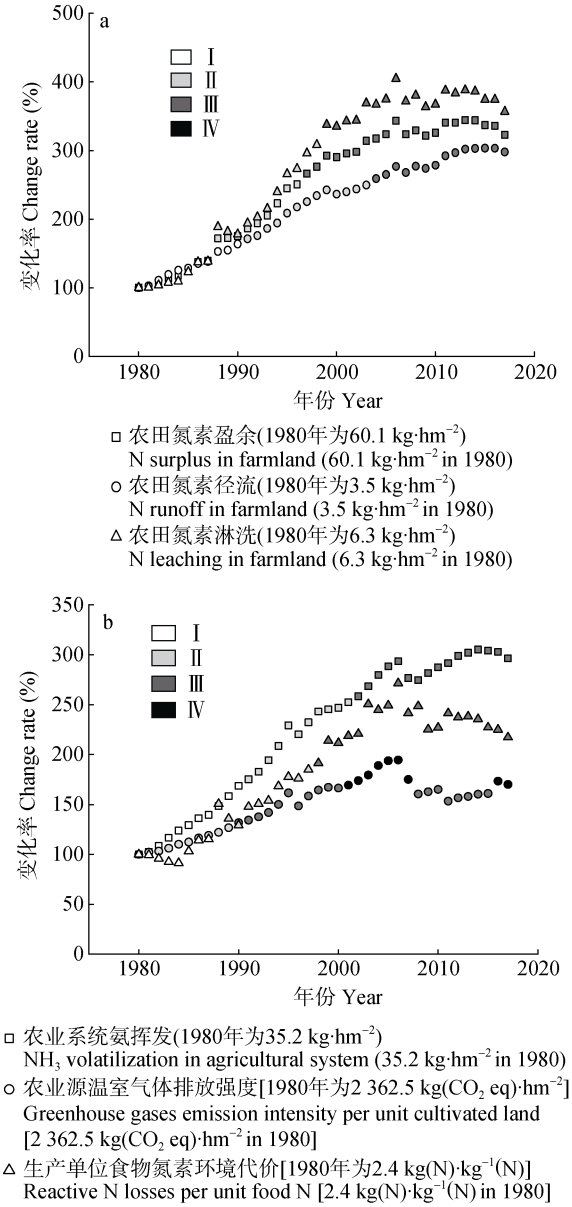

图 3 1980—2017 年中国农业绿色发展氮素环境排放类指标的时间变化

Fig. 3 Time variation of nitrogen environmental emission indicators of agriculture green development in China from 1980 to 2017

其中, 动物蛋白消费比例增加最多, 31 个省份均处于Ⅱ级和Ⅰ级水平, 其中处于Ⅰ级水平的省份主要集中在华北和华中地区。

2.5 1980 年和 2017 年地区以及指标类型农业绿色发展等级变化

如图 5a、5b 所示, 1980 年全国农业绿色发展等级Ⅲ级和Ⅳ级水平占比达 59.2%; 区域上, 华北地区、东北地区和西北地区Ⅰ级水平占比高, 分别为 45.8%、45.8%和 53.3%, 而华东地区、华中地区、华南地区和西南地区Ⅳ级水平占比分别为 60.3%、50.0%、64.8%和 51.1%。与 1980 年相比, 2017 年在全国水平, Ⅲ级和Ⅳ级水平占比总和变化不大, 但Ⅰ级水平占比由 27.1%降低至 8.3%; 区域上, 7 个地区Ⅰ级水平占比均降低, 并且大部分地区低于 30.0%, 其中华北地区、东北地区和西北地区降低最明显, Ⅲ级和Ⅱ级水平占比明显增加, 尤其华北地区、华东地区、华中地区、华南地区以及西南地区Ⅱ级水平占比增加明显。

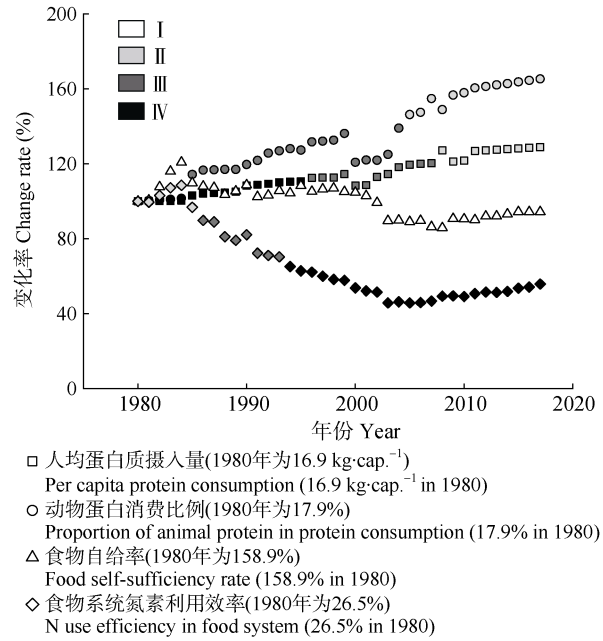

图 4 1980—2017 年中国农业绿色发展氮素食物消费类指标的时间变化

Fig. 4 Time variation of nitrogen food consumption indicators of agriculture green development in China from 1980 to 2017

由图 6a、6b 可知, 1980 年氮素生产类指标Ⅳ级水平占比为 75.0%, Ⅰ级水平占比 25.0%; 与 1980 年相比, 2017 年氮素生产类指标Ⅰ级和Ⅳ级水平占比分别降低至 5.6%和 36.3%, 而Ⅱ级和Ⅲ级水平占比分别增至 16.9%和 41.2%。图 6c、6d 显示出, 1980 年氮素利用效率类指标Ⅲ级和Ⅳ级水平占比总和为 73.4%, 而Ⅰ级和Ⅱ级水平占比分别为 0.8%和 25.8%; 2017 年, Ⅰ级和Ⅱ级水平占比分别降为 0.0%和 16.9%。由图 6e、6f 可以看出, 与 1980 年相比, 2017 氮素环境排放类指标Ⅰ级和Ⅱ级水平占比呈减少趋势, 分别由 46.8%和 24.2%降至 24.2%和 22.6%; Ⅲ级和Ⅳ级水平占比呈增加趋势, 分别由 22.6%和 6.4%增至 35.5%和 17.7%。图 6g、6h 表明, 氮素食物消费类指标Ⅱ级和Ⅳ级水平占比变化最明显, 分别由 1980 年的 8.1%和 57.3%转变为 2017 年的 41.1%和 23.4%。

表 4　1980 年和 2017 年中国各省(市、自治区)农业绿色发展氮素环境排放类指标的变化

Table 4　Variation of nitrogen environmental emission indicators of agricultural green development in different provinces (cities, autonomous regions) of China in 1980 and 2017

分区 Partition	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	农田氮盈余 N surplus in farmland ($kg \cdot hm^{-2}$)		农田氮素径流 N runoff in farmland ($kg \cdot hm^{-2}$)		农田氮素淋洗 N leaching in farmland ($kg \cdot hm^{-2}$)		农业系统氨挥发 NH_3 volatilization in agricultural system ($kg \cdot hm^{-2}$)		农业源温室气体排放强度 1) GHG emission intensity per unit cultivated land 1) ($kg \cdot hm^{-2}$)		生产单位食物氮素环境代价 Reactive N losses per unit food N ($kg \cdot kg^{-1}$)	
		1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017
		数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)
华北地区 North China	北京市 Beijing	111.3(Ⅱ)	254.6(Ⅳ)	6.5(Ⅱ)	9.8(Ⅲ)	11.0(Ⅱ)	32.9(Ⅲ)	79.9(Ⅱ)	145.3(Ⅳ)	2 610.7(Ⅱ)	3 911.6(Ⅲ)	2.1(Ⅰ)	11.8(Ⅳ)
	天津市 Tianjin	36.1(Ⅰ)	162.8(Ⅲ)	3.2(Ⅰ)	9.1(Ⅲ)	2.8(Ⅰ)	16.6(Ⅱ)	31.4(Ⅰ)	117.8(Ⅲ)	1 501.1(Ⅰ)	3 549.7(Ⅲ)	1.3(Ⅰ)	5.6(Ⅲ)
	河北省 Hebei	69.3(Ⅰ)	189.1(Ⅲ)	4.0(Ⅰ)	17.8(Ⅲ)	7.4(Ⅰ)	25.9(Ⅲ)	34.4(Ⅰ)	107.5(Ⅲ)	1 031.7(Ⅰ)	3 490.5(Ⅲ)	2.2(Ⅰ)	3.7(Ⅱ)
	山西省 Shanxi	44.1(Ⅰ)	70.3(Ⅰ)	2.8(Ⅰ)	5.0(Ⅰ)	4.5(Ⅰ)	6.0(Ⅰ)	24.7(Ⅰ)	53.7(Ⅰ)	899.7(Ⅰ)	1 305.9(Ⅰ)	2.1(Ⅰ)	4.9(Ⅲ)
东北地区 Northeast China	内蒙古自治区 Inner-Mongolia	2.5(Ⅰ)	10.5(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.9(Ⅰ)	0.2(Ⅰ)	0.6(Ⅰ)	3.0(Ⅰ)	10.6(Ⅰ)	184.2(Ⅰ)	405.4(Ⅰ)	3.8(Ⅱ)	6.4(Ⅳ)
	辽宁省 Liaoning	53.5(Ⅰ)	91.4(Ⅱ)	4.4(Ⅰ)	7.1(Ⅱ)	3.7(Ⅰ)	6.6(Ⅰ)	43.5(Ⅰ)	94.5(Ⅲ)	1 801.2(Ⅰ)	2 763.8(Ⅱ)	1.6(Ⅰ)	4.5(Ⅲ)
	吉林省 Jilin	63.3(Ⅰ)	54.1(Ⅰ)	3.8(Ⅰ)	7.1(Ⅱ)	6.6(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	32.5(Ⅰ)	67.3(Ⅱ)	1 325.2(Ⅰ)	2 251.0(Ⅱ)	2.4(Ⅰ)	3.7(Ⅱ)
	黑龙江省 Heilongjiang	10.6(Ⅰ)	1.4(Ⅰ)	2.0(Ⅰ)	4.2(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	4.7(Ⅰ)	13.0(Ⅰ)	33.7(Ⅰ)	621.4(Ⅰ)	2 193.4(Ⅱ)	0.7(Ⅰ)	1.1(Ⅰ)
华东地区 East China	上海市 Shanghai	342.1(Ⅳ)	301.6(Ⅳ)	12.0(Ⅲ)	14.0(Ⅲ)	44.8(Ⅳ)	36.7(Ⅲ)	147.2(Ⅳ)	153.1(Ⅳ)	6 892.2(Ⅳ)	6 131.2(Ⅳ)	9.1(Ⅳ)	7.7(Ⅳ)
	江苏省 Jiangsu	215.5(Ⅲ)	277.9(Ⅳ)	8.3(Ⅱ)	14.8(Ⅲ)	27.6(Ⅲ)	28.8(Ⅲ)	85.4(Ⅱ)	152.1(Ⅳ)	4 476.0(Ⅳ)	4 749.6(Ⅳ)	5.8(Ⅲ)	3.4(Ⅱ)
	浙江省 Zhejiang	310.5(Ⅳ)	206.8(Ⅲ)	10.9(Ⅲ)	9.0(Ⅱ)	41.2(Ⅳ)	25.1(Ⅲ)	121.0(Ⅳ)	91.5(Ⅲ)	8 744.4(Ⅳ)	2 893.9(Ⅱ)	12.3(Ⅳ)	6.5(Ⅳ)
	安徽省 Anhui	150.6(Ⅱ)	168.8(Ⅲ)	6.1(Ⅱ)	10.7(Ⅲ)	19.7(Ⅱ)	15.7(Ⅱ)	53.3(Ⅰ)	110.2(Ⅲ)	3 822.3(Ⅲ)	4 167.6(Ⅳ)	6.2(Ⅳ)	2.9(Ⅰ)
	福建省 Fujian	236.0(Ⅲ)	351.4(Ⅳ)	8.6(Ⅱ)	13.7(Ⅲ)	31.2(Ⅲ)	43.8(Ⅳ)	81.3(Ⅱ)	168.8(Ⅳ)	7 692.5(Ⅳ)	5 354.1(Ⅳ)	13.1(Ⅳ)	6.6(Ⅳ)
	江西省 Jiangxi	183.4(Ⅲ)	123.1(Ⅱ)	6.2(Ⅱ)	8.9(Ⅱ)	25.6(Ⅲ)	10.7(Ⅱ)	62.6(Ⅱ)	110.0(Ⅲ)	8 383.2(Ⅳ)	7 482.0(Ⅳ)	15.3(Ⅳ)	2.9(Ⅰ)
	山东省 Shandong	103.6(Ⅱ)	154.1(Ⅱ)	6.1(Ⅱ)	11.5(Ⅲ)	10.9(Ⅱ)	11.3(Ⅱ)	52.2(Ⅰ)	142.8(Ⅳ)	1 454.5(Ⅰ)	3 690.6(Ⅲ)	2.4(Ⅰ)	3.1(Ⅱ)
华中地区 Central China	河南省 Henan	79.7(Ⅰ)	256.4(Ⅳ)	4.7(Ⅰ)	15.5(Ⅲ)	8.5(Ⅰ)	24.0(Ⅲ)	39.8(Ⅰ)	169.2(Ⅳ)	1 622.9(Ⅰ)	3 906.4(Ⅲ)	2.1(Ⅰ)	3.5(Ⅱ)
	湖北省 Hubei	194.8(Ⅲ)	240.8(Ⅳ)	7.2(Ⅱ)	12.4(Ⅲ)	25.8(Ⅲ)	26.1(Ⅲ)	71.4(Ⅱ)	141.3(Ⅳ)	5 420.5(Ⅳ)	5 083.3(Ⅳ)	7.6(Ⅳ)	4.7(Ⅲ)
	湖南省 Hunan	217.0(Ⅲ)	230.7(Ⅲ)	7.5(Ⅱ)	13.0(Ⅲ)	29.6(Ⅲ)	24.0(Ⅲ)	85.0(Ⅱ)	168.3(Ⅳ)	8 334.2(Ⅳ)	8 389.6(Ⅳ)	11.8(Ⅳ)	4.4(Ⅱ)
华南地区 South China	广东省 Guangdong	298.4(Ⅳ)	356.3(Ⅳ)	10.7(Ⅲ)	15.0(Ⅲ)	39.8(Ⅲ)	43.3(Ⅳ)	106.8(Ⅲ)	168.8(Ⅳ)	10 242.5(Ⅳ)	5 812.7(Ⅳ)	13.4(Ⅳ)	7.4(Ⅳ)
	广西壮族自治区 Guangxi	160.8(Ⅲ)	140.4(Ⅱ)	6.0(Ⅰ)	8.6(Ⅱ)	21.6(Ⅲ)	13.1(Ⅱ)	64.0(Ⅱ)	99.6(Ⅲ)	7 655.7(Ⅳ)	4 320.1(Ⅳ)	10.1(Ⅳ)	5.2(Ⅲ)
	海南省 Hainan	298.4(Ⅳ)	386.9(Ⅳ)	10.7(Ⅲ)	15.0(Ⅲ)	39.8(Ⅲ)	48.1(Ⅳ)	106.8(Ⅲ)	169.5(Ⅳ)	10 242.5(Ⅳ)	5 647.4(Ⅳ)	13.4(Ⅳ)	7.9(Ⅳ)
西南地区 Southwest China	重庆市 Chongqing	214.9(Ⅲ)	184.8(Ⅲ)	9.5(Ⅲ)	9.4(Ⅲ)	26.1(Ⅲ)	20.6(Ⅲ)	116.4(Ⅲ)	108.4(Ⅲ)	7 548.8(Ⅳ)	3 732.5(Ⅲ)	4.7(Ⅲ)	6.1(Ⅳ)
	四川省 Sichuan	214.9(Ⅲ)	157.3(Ⅱ)	9.5(Ⅲ)	9.6(Ⅲ)	26.1(Ⅲ)	15.5(Ⅱ)	116.4(Ⅲ)	128.7(Ⅳ)	7 548.8(Ⅳ)	5 120.8(Ⅳ)	4.7(Ⅲ)	5.3(Ⅲ)
	贵州省 Guizhou	135.0(Ⅱ)	101.3(Ⅱ)	5.7(Ⅰ)	5.7(Ⅰ)	16.8(Ⅱ)	11.0(Ⅱ)	69.6(Ⅱ)	61.4(Ⅱ)	5 704.5(Ⅳ)	2 602.3(Ⅱ)	6.0(Ⅲ)	6.2(Ⅳ)
	云南省 Yunnan	119.4(Ⅱ)	178.4(Ⅲ)	5.0(Ⅰ)	8.4(Ⅱ)	14.9(Ⅱ)	20.5(Ⅲ)	63.4(Ⅱ)	96.6(Ⅲ)	5 412.4(Ⅳ)	3 269.2(Ⅲ)	5.9(Ⅲ)	9.1(Ⅳ)
	西藏自治区 Tibet	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	1.5(Ⅰ)	0.8(Ⅰ)	145.8(Ⅰ)	75.0(Ⅰ)	11.1(Ⅳ)	5.4(Ⅲ)
西北地区 Northwest China	陕西省 Shaanxi	65.1(Ⅰ)	209.4(Ⅲ)	3.4(Ⅰ)	8.8(Ⅱ)	7.6(Ⅰ)	24.9(Ⅲ)	31.0(Ⅰ)	84.5(Ⅱ)	1 364.4(Ⅰ)	1 680.7(Ⅰ)	2.7(Ⅰ)	7.7(Ⅳ)
	甘肃省 Gansu	7.9(Ⅰ)	4.8(Ⅰ)	0.5(Ⅰ)	0.3(Ⅰ)	0.6(Ⅰ)	0.4(Ⅰ)	7.4(Ⅰ)	3.8(Ⅰ)	399.3(Ⅰ)	142.0(Ⅰ)	2.2(Ⅰ)	5.3(Ⅲ)
	青海省 Qinghai	0.3(Ⅰ)	0.7(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	0.2(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	2.8(Ⅰ)	1.5(Ⅰ)	252.0(Ⅰ)	94.5(Ⅰ)	5.8(Ⅲ)	5.8(Ⅲ)
	宁夏回族自治区 Ningxia	15.8(Ⅰ)	146.8(Ⅰ)	0.7(Ⅰ)	6.9(Ⅱ)	2.1(Ⅰ)	16.7(Ⅱ)	5.9(Ⅰ)	74.9(Ⅱ)	274.2(Ⅰ)	2 946.0(Ⅱ)	4.0(Ⅱ)	6.5(Ⅳ)
	新疆维吾尔自治区 Xinjiang	1.9(Ⅰ)	21.0(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	1.1(Ⅰ)	0.1(Ⅰ)	2.0(Ⅰ)	3.2(Ⅰ)	13.0(Ⅰ)	199.0(Ⅰ)	460.5(Ⅰ)	2.0(Ⅰ)	6.7(Ⅳ)

GHG: 温室气体, 排放量为 CO_2 当量(CO_2-eq)。GHG: greenhouse gases. Emission load is converted to CO_2 equivalent (CO_2-eq).

表 5 1980 年和 2017 年中国各省(市、自治区)农业绿色发展氮素食物消费类指标的变化

Table 5 Variation of nitrogen food consumption indicators of agricultural green development in various province (cities, autonomous regions) of China in 1980 and 2017

分区 Partition	省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	人均蛋白质摄入量 Per capita protein consumption (kg·cap.$^{-1}$)		动物蛋白消费比例 Proportion of animal protein in protein consumption (%)		食物自给率 Food self-sufficiency rate (%)		食物系统氮素利用效率 N use efficiency in food system (%)	
		1980	2017	1980	2017	1980	2017	1980	2017
		数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)	数值(级别) Value (level)
华北地区 North China	北京市 Beijing	16.3(Ⅳ)	23.1(Ⅱ)	20.8(Ⅲ)	32.5(Ⅰ)	124.0(Ⅰ)	15.2(Ⅳ)	29.4(Ⅱ)	7.1(Ⅳ)
	天津市 Tianjin	16.4(Ⅳ)	22.9(Ⅱ)	20.3(Ⅲ)	32.2(Ⅰ)	87.8(Ⅱ)	46.1(Ⅳ)	33.1(Ⅰ)	14.3(Ⅳ)
	河北省 Hebei	17.0(Ⅳ)	21.6(Ⅱ)	17.3(Ⅳ)	29.1(Ⅱ)	156.8(Ⅰ)	183.4(Ⅰ)	24.1(Ⅲ)	19.2(Ⅲ)
	山西省 Shanxi	16.9(Ⅳ)	21.7(Ⅱ)	17.9(Ⅳ)	29.4(Ⅱ)	140.3(Ⅰ)	82.3(Ⅱ)	29.4(Ⅱ)	15.9(Ⅳ)
东北地区 Northeast China	内蒙古自治区 Inner Mongolia	16.8(Ⅳ)	21.9(Ⅱ)	18.1(Ⅳ)	29.9(Ⅱ)	114.3(Ⅰ)	216.8(Ⅰ)	12.1(Ⅳ)	10.9(Ⅳ)
	辽宁省 Liaoning	16.6(Ⅳ)	22.2(Ⅱ)	19.1(Ⅳ)	30.5(Ⅰ)	178.7(Ⅰ)	133.7(Ⅰ)	34.9(Ⅰ)	17.0(Ⅳ)
	吉林省 Jilin	16.6(Ⅳ)	21.7(Ⅱ)	19.3(Ⅳ)	29.3(Ⅱ)	191.5(Ⅰ)	192.0(Ⅰ)	26.9(Ⅱ)	17.8(Ⅳ)
	黑龙江省 Heilongjiang	16.6(Ⅳ)	21.8(Ⅱ)	19.3(Ⅳ)	29.6(Ⅱ)	239.9(Ⅰ)	341.0(Ⅰ)	54.0(Ⅰ)	39.8(Ⅰ)
华东地区 Eastern China	上海市 Shanghai	16.2(Ⅳ)	23.2(Ⅱ)	21.0(Ⅲ)	32.7(Ⅰ)	47.3(Ⅳ)	18.9(Ⅳ)	7.8(Ⅳ)	10.4(Ⅳ)
	江苏省 Jiangsu	16.9(Ⅳ)	22.2(Ⅱ)	17.6(Ⅳ)	30.7(Ⅰ)	108.1(Ⅰ)	171.0(Ⅰ)	12.9(Ⅳ)	22.6(Ⅲ)
	浙江省 Zhejiang	17.0(Ⅳ)	22.2(Ⅱ)	17.4(Ⅳ)	30.6(Ⅰ)	46.2(Ⅳ)	48.4(Ⅳ)	6.0(Ⅳ)	12.4(Ⅳ)
	安徽省 Anhui	17.0(Ⅳ)	21.5(Ⅱ)	17.4(Ⅳ)	28.9(Ⅱ)	79.4(Ⅱ)	225.4(Ⅰ)	11.4(Ⅳ)	25.6(Ⅱ)
	福建省 Fujian	16.9(Ⅳ)	22.0(Ⅱ)	17.9(Ⅳ)	30.2(Ⅰ)	35.0(Ⅳ)	83.5(Ⅱ)	5.4(Ⅳ)	12.6(Ⅳ)
	江西省 Jiangxi	16.9(Ⅳ)	21.6(Ⅱ)	17.8(Ⅳ)	29.0(Ⅱ)	32.7(Ⅳ)	166.9(Ⅰ)	4.8(Ⅳ)	25.2(Ⅱ)
	山东省 Shandong	17.0(Ⅳ)	21.8(Ⅱ)	17.1(Ⅳ)	29.7(Ⅱ)	165.2(Ⅰ)	207.1(Ⅰ)	26.1(Ⅱ)	24.1(Ⅲ)
华中地区 Central China	河南省 Henan	17.0(Ⅳ)	21.3(Ⅱ)	17.5(Ⅳ)	28.5(Ⅱ)	145.2(Ⅰ)	259.5(Ⅰ)	29.1(Ⅱ)	21.4(Ⅲ)
	湖北省 Hubei	16.9(Ⅳ)	21.8(Ⅱ)	17.7(Ⅳ)	29.6(Ⅱ)	76.1(Ⅱ)	183.4(Ⅰ)	9.8(Ⅳ)	16.6(Ⅳ)
	湖南省 Hunan	17.0(Ⅳ)	21.6(Ⅱ)	17.4(Ⅳ)	29.0(Ⅱ)	46.5(Ⅳ)	163.5(Ⅰ)	6.3(Ⅳ)	17.9(Ⅳ)
华南地区 South China	广东省 Guangdong	16.9(Ⅳ)	22.3(Ⅱ)	17.7(Ⅳ)	30.8(Ⅰ)	43.3(Ⅳ)	57.0(Ⅲ)	5.5(Ⅳ)	10.9(Ⅳ)
	广西壮族自治区 Guangxi	17.0(Ⅳ)	21.3(Ⅱ)	17.3(Ⅳ)	28.4(Ⅱ)	46.3(Ⅳ)	134.4(Ⅰ)	7.1(Ⅳ)	13.4(Ⅳ)
	海南省 Hainan	16.9(Ⅳ)	21.7(Ⅱ)	17.7(Ⅳ)	29.4(Ⅱ)	43.3(Ⅳ)	107.7(Ⅰ)	5.5(Ⅳ)	10.5(Ⅳ)
西南地区 Southwest China	重庆市 Chongqing	17.0(Ⅳ)	22.0(Ⅱ)	17.1(Ⅳ)	30.1(Ⅰ)	133.4(Ⅰ)	103.6(Ⅰ)	15.7(Ⅳ)	13.1(Ⅳ)
	四川省 Sichuan	17.0(Ⅳ)	21.4(Ⅱ)	17.1(Ⅳ)	28.6(Ⅱ)	133.4(Ⅰ)	134.2(Ⅰ)	15.7(Ⅳ)	14.6(Ⅳ)
	贵州省 Guizhou	16.9(Ⅳ)	21.1(Ⅲ)	17.9(Ⅳ)	28.0(Ⅱ)	65.5(Ⅲ)	95.5(Ⅱ)	11.6(Ⅳ)	12.5(Ⅳ)
	云南省 Yunnan	17.0(Ⅳ)	21.2(Ⅲ)	17.4(Ⅳ)	28.1(Ⅱ)	77.8(Ⅱ)	105.8(Ⅰ)	12.1(Ⅳ)	8.8(Ⅳ)
	西藏自治区 Tibet	17.0(Ⅳ)	20.4(Ⅲ)	17.4(Ⅳ)	26.1(Ⅱ)	126.2(Ⅰ)	172.7(Ⅰ)	3.2(Ⅳ)	10.9(Ⅳ)
西北地区 Northwest China	陕西省 Shaanxi	16.9(Ⅳ)	21.7(Ⅱ)	17.8(Ⅳ)	29.3(Ⅱ)	130.6(Ⅰ)	110.7(Ⅰ)	24.2(Ⅲ)	10.7(Ⅳ)
	甘肃省 Gansu	16.9(Ⅳ)	21.2(Ⅲ)	17.5(Ⅳ)	28.1(Ⅱ)	126.5(Ⅰ)	106.5(Ⅰ)	22.6(Ⅲ)	13.8(Ⅳ)
	青海省 Qinghai	16.9(Ⅳ)	21.5(Ⅱ)	17.9(Ⅳ)	28.9(Ⅱ)	144.0(Ⅰ)	105.2(Ⅰ)	6.3(Ⅳ)	11.0(Ⅳ)
	宁夏回族自治区 Ningxia	16.9(Ⅳ)	21.7(Ⅱ)	17.8(Ⅳ)	29.4(Ⅱ)	125.1(Ⅰ)	166.9(Ⅰ)	18.2(Ⅲ)	12.7(Ⅳ)
	新疆维吾尔自治区 Xinjiang	16.7(Ⅳ)	21.3(Ⅱ)	18.6(Ⅳ)	28.4(Ⅱ)	189.6(Ⅰ)	214.5(Ⅰ)	21.5(Ⅲ)	10.5(Ⅳ)

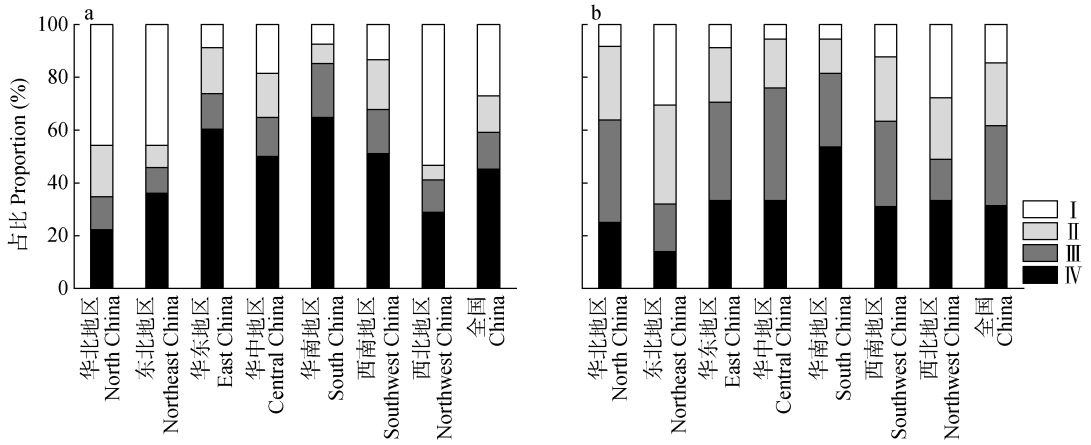

图 5 1980 年(a)和 2017 年(b)全国以及各地区农业绿色发展等级占比

Fig. 5 Proportions of agricultural green development levels in the whole country and each regional scales in 1980 (a) and 2017 (b) in China

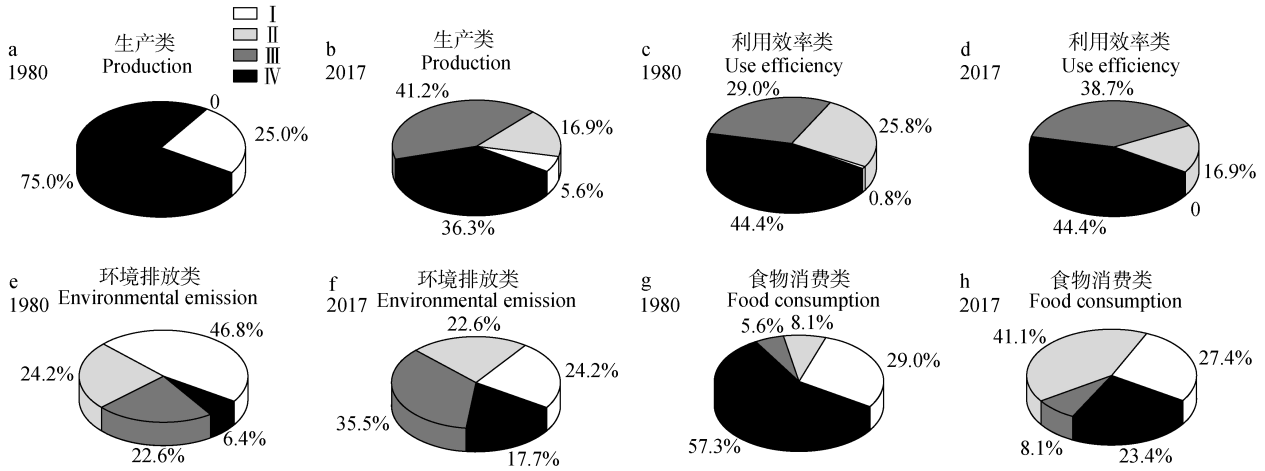

图 6　1980 年和 2017 年 4 类氮素指标农业绿色发展等级占比

Fig. 6　Proportion of agricultural green development levels of four ategories nitrogen indicators in China in 1980 and 2017

3　讨论

3.1　氮素生产类指标的时空变化特征

氮素生产类指标可以在一定程度上反映农牧系统内的氮素供给、投入和产出的变化。从本文结果可以看出，1980—2017 年氮素使用强度持续增加，农业绿色发展等级从Ⅰ级降至Ⅳ级水平，超过 Chen 等[31]研究的 3 大主要粮食作物最低环境代价的平均施氮量(210.0 kg·hm^{-2})；在空间上，由于功能区域划分以及人口密度的不同[32-33]，2017 年氮素使用强度在华北地区、华东地区、华中地区以及华南地区降为Ⅲ级和Ⅳ级水平。在时间上，37 年间单位面积植物蛋白产量增加了约 1.5 倍，升至Ⅲ级水平；在空间上，2017 年 26 个省份仍远低于潜力产量水平。由于集约化养殖以及养殖技术的发展[19]，单位动物蛋白产量逐年增加，上升至Ⅲ级水平；畜牧农业源饲料氮自给率虽呈增加趋势，但仍处于Ⅳ级水平，并且在空间上，各个省份也处于较低水平，这是由于只考虑种植业对畜牧饲料氮素的供给水平而未考虑牧草的氮素供给。综上可见，氮素生产类指标在时间上表现为氮素使用强度高、动植物生产力低、农业源饲料自给率低的特征；空间上，具有氮素使用强度和单位动物蛋白产量北部优于南部地区、单位动物蛋白产量东部优于西部地区、农业源饲料自给率空间差异小的特征。

3.2　氮素利用效率类指标的时空变化特征

氮素利用效率类指标是评估农业系统中氮素使用性能的重要指标，一直是学者所关注的热点问题[16]。1980—2017 年间畜牧系统氮素利用效率一直处于Ⅳ级水平，与 Bai 等[19]1980—2010 年畜牧系统的研究相近(4.4%~11.5%)，但低于国外发达国家的畜牧系统氮素利用效率(24.0%)[34]；在空间上，31 个省份的畜牧系统氮素利用效率绿色发展等级只有东北地区、华北地区、华东地区在内的 16 个省份由Ⅳ级升至Ⅲ级水平。粪尿循环利用率逐年降低，至 2017 年降至Ⅳ级水平；在空间上，人口分界线[33]南部地区转变明显，均是由于化肥的大量施用、农牧结合不紧密以及劳动力老龄化等因素造成的[17,35]。农田系统氮素利用效率和秸秆循环利用率有所增长，但均未达到Ⅰ级水平，其中农田系统氮素利用效率 2017 年为Ⅲ级水平，高于 Ma 等[17]2005 年的研究结果(25.0%)，低于 Jarvis 等[36]关于欧洲西北地区种植系统的研究结果(53.0%)；在空间上，31 个省份农田系统氮素利用效率处于较低水平，而由于秸秆还田技术的推广以及国家严禁焚烧秸秆政策的提出[37]，秸秆循环利用率在全国各个地区上升明显。由此可知，氮素利用效率类指标在时间上具有畜牧系统氮素利用效率、农田系统氮素利用效率和粪尿循环利用率降低，而秸秆循环利用效率升高的特征；在空间上，畜牧系统氮素利用效率和农田系统氮素利用效率空间变化不明显，而粪尿循环利用率降低和秸秆循环利用效率升高具有明显的南北部差异的特征。

3.3　氮素环境排放类指标的时空变化特征

氮素排放引起的环境问题已经逐步受到了国家的重视。本研究表明，1980—2017 年间农田氮素盈余、氮径流、氮淋洗损失均增加，至 2017 年均处于Ⅲ级水平，其中农田氮素盈余超过欧盟标准(80.0 kg·hm^{-2}) [38]2.0 倍，并且超过 Sun 等[39]提出的高风险环境污染界线(180.0 kg·hm^{-2})和 Zhang 等[40]提出的复种地区氮盈余范围(110.0~190.0 kg·hm^{-2})，说明氮素土壤损失严重；在空间上，由于功能区域[32]的不同，南部地区氮素损失更多。在 1980—2017 年间，

农业系统氨挥发不断增加，与 Ma 等[17]2005 年的研究结果(117.0 kg·hm^{-2})相近。农业源温室气体排放强度大，2006 年达最高(Ⅳ级水平)，魏琦等[41]和闵继胜等[42]分别关于环境污染物排放量指标和中国温室气体排放的研究结果和趋势与本文结果一致；在空间上，考虑到了内蒙古、西藏、甘肃省、青海省和新疆的草地面积，2017 年农业源 GHG 排放强度仅西北地区、东北地区和西藏地区仍处于Ⅰ级水平。1980—2017 年间生产单位食物氮素环境代价持续增加；在空间上，西部地区生产单位食物氮素环境代价明显高于东部地区。综上可知，氮素环境排放类指标在时间上具有环境排放高和污染严重的特征；在空间上，区域环境排放差异明显的特征，具有明显的东西部和南北部的差异。

3.4 氮素食物消费类指标的时空变化特征

社会经济的发展以及生活水平的提高，导致氮素食物消费发生了变化[43]。1980—2017 年间人均蛋白质摄入量和动物蛋白消费比例均上升至Ⅱ级水平，接近中国营养协会推荐膳食营养蛋白质摄入量为标准以及营养推荐范围[44]。马林等[17]的研究结果表明，居民动物食物消费占比不断提高，与本文结果的变化趋势一致。空间上，2017 年动物蛋白消费比例各个省份整体由Ⅳ级上升至Ⅱ级和Ⅰ级水平，这是由经济的驱动产生的[45]，例如华北和华中等经济发达的地区动物蛋白消费比例均达到了Ⅰ级水平。郭迷[46]的研究表明，居民生活指标农业绿色发展水平在京津冀以及广东省周边地区处于高水平，与本文研究结果一致。1980—2017 年间食物自给率一直处于很高的水平，喻朝庆[47]的研究表明，中国一直保持着较高水平的粮食供给，与本文食物自给率处于Ⅰ级水平的结果一致。在空间上，26 个省份能够实现氮素食物的自给，说明全国粮食处于安全水平。食物系统氮素利用效率很低，处于Ⅳ级水平，与 Ma 等[17]的研究结果趋势相同；在空间上，全国各地区均处于较低水平，食物系统氮素利用效率普遍很低。综上所述，氮素食物消费类指标在空间上，具有人均蛋白质摄入量和动物蛋白消费比例升高、食物自给率高、食物系统氮素利用效率低的特征；在空间上，31 个省份人均蛋白质摄入量和动物蛋白消费比例均上升，其中东部地区尤其是沿海地区增加明显，而食物自给率高，食物系统氮素利用效率变化不明显。

3.5 中国农业绿色发展相关氮素指标时空变化的影响因素分析及优化途径

受快速增长的中国人口、城镇化水平的提高以及社会经济发展的驱动，大量氮素资源被投入到生产当中[45]，在提高农业生产力的同时，也使得氮素成为农业面临的突出资源和环境问题之一[13]，并由此对农业绿色发展产生显著影响。综合分析，中国农业绿色发展相关氮素指标时空变化特征的影响因素主要包括：

1)1980 年以来，政府对施用化肥的政策鼓励[17]、种植结构和总播种面积的改变[48]、区域功能和种植业集约化程度的不同[31]是影响氮素使用强度、单位面积植物蛋白产量、农田系统氮素利用效率、农田氮素盈余、农田氮素径流、农田氮素淋洗、农业系统氨挥发、农业源温室气体排放强度、生产单位食物氮素环境代价、食物自给率、食物系统氮素利用效率时空变化特征的主要因素。可以通过“测土配方施肥”[49]、推广良种良法配套[50]、农机农艺结合、加强对种植业的种植管理、调整区域种植结构等技术和方法[51]来解决，并且针对环境较好的西部地区，可以在保护环境的前提下，发展种植业和畜牧业，使经济增长和环境保护协同发展。

2)畜禽养殖结构的改变、规模化以及集约化养殖场数量的增加[19]、畜禽饲料的改良以及配套的养殖措施的改进以及区域功能的不同[32,35]是影响单位动物蛋白产量、畜牧系统氮素利用效率时空变化特征的主要因素。可以通过优化畜禽饲料营养和蛋白含量[35]、实施畜禽养殖全链条管理、促进畜禽养殖的规模化和集约化、根据区域特点适当调整畜禽养殖结构[19]等措施改善。

3)农牧的结合程度低[19]、农村劳动力老龄化[17]是影响秸秆循环利用效率、粪尿循环利用率、畜牧农业源饲料氮自给率时空变化特征的主要因素。可以在农牧结合中，提高农牧业机械化水平、推广动物粪尿进行处理后回田和秸秆还田技术[37]、提高本地饲料本地化水平的方式来优化。

4)1980 年以来社会的发展以及经济的增长、居民饮食结构的改变、区域经济发展的不均衡和城市化进程的差异是影响人均蛋白质摄入量[43]、动物蛋白消费比例时空变化特征的主要因素。应通过促进区域社会和经济的均衡发展、引导居民食物消费的多样化[44]等措施改善。最后，国家应加强农技知识的推广，鼓励和支持大型有机肥料加工企业的发展，并制定类似“化肥农药零增长”的规划要求，并借鉴欧盟环境保护法规[52-53]，加快制定相关法律法规例如：西部大开发等政策[54]的制定，同时要加强国家尺度的各项重点行动和政策的评估。

4 结论

1980—2017 年以氮素指标表征的中国农业绿色发展水平整体处于降低趋势，但不同指标类型以及指标间农业绿色发展等级存在较大差异，具有明显的时空变化特征。1980—2017 年间氮素生产类指标、氮素利用效率类指标、环境排放类指标和食物消费类指标绿色发展程度在Ⅲ级和Ⅳ级水平的占比基本无变化，但是在Ⅰ级水平占比明显降低。在空间上，与 1980 年相比, 2017 年处于绿色水平的氮素指标比例下降，氮素相关的农业绿色发展水平整体处于降低趋势，并且区域之间发展不平衡，总体上呈现北部和西部农业绿色发展水平较好，南部和东部农业绿色发展潜力巨大的特征。产生上述时空变化特征的原因主要是种植业和畜牧业氮素资源利用不合理、种植以及养殖结构的改变、农牧系统氮素循环脱节严重、区域功能不同、区域社会经济发展不平衡等因素。因此，农业绿色发展必须重视“种植业-畜牧业-消费”整个食物系统氮素的评估和优化管理，并针对区域和指标的变化特征采用精准化施策，以促进氮素的高效利用和环境减排，实现农业和食物系统氮素指标的优化，推动农业绿色发展。

参考文献 References

[1] 马文奇，张福锁，陈新平. 中国养分资源综合管理研究的意义与重点[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 64–67
MA W Q, ZHANG F S, CHEN X P. Significance and keystone of research of integrated nutrient resource management in China[J]. Science & Technology Review, 2006, 24(10): 64–67

[2] FALKOWSKI P, SCHOLES R J, BOYLE E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, 290(5490): 291–296

[3] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70: 153–226

[4] 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

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

[6] FOWLER D, COYLE M, SKIBA U, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2013, 368(1621): 20130165

[7] GAO Z L, MA W Q, ZHU G D, et al. Estimating farm-gate ammonia emissions from major animal production systems in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 20–28

[8] 郭四代，张华，郭杰，等. 基于空间计量模型的中国环境污染评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志，2018，37(2): 471–481
GUO S D, ZHANG H, GUO J, et al. Evaluation and impact factors of environmental pollution of China based on spatial metric model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 471–481

[9] United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development[R]. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015: 1–41

[10] SUTTON M A, HOWARD C M, ERISMAN J W, et al. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011

[11] TOMICH T P, BRODT S B, DAHLGREN R A, et al. The California Nitrogen Assessment: Challenges and Solutions for People, Agriculture, and the Environment[M]. Oakland: University of California Press, 2016

[12] ABROL Y P, ADHYA T K, ANEJA V P, et al. The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and policies[M]. Duxford, UK: Elsevier, 2017

[13] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. Science, 2015, 347(6223): 1259855

[14] CUI S H, SHI Y L, GROFFMAN P M, et al. Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910–2010)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(6): 2052–2057

[15] GU B J, JU X T, CHANG J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792–8797

[16] GU B J, JU X T, CHANG S X, et al. Nitrogen use efficiencies in Chinese agricultural systems and implications for food security and environmental protection[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(4): 1217–1227

[17] 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

[18] WANG M R, MA L, STROKAL M, et al. Hotspots for nitrogen and phosphorus losses from food production in China: A county-scale analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 5782–5791

[19] BAI Z H, MA W Q, MA L, et al. China’s livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaar8534

[20] 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

[21] KANTER D R, WINIWARTER W, BODIRSKY B L, et al. A framework for nitrogen futures in the shared socioeconomic pathways[J]. Global Environmental Change, 2020, 61: 102029

[22] 王海宾, 陈晓文, 于婧. DPSIR 框架研究综述[J]. 经济研究导刊, 2013(19): 4–5
WANG H B, CHEN X W, YU J. Research review of DPSIR framework[J]. Economic Research Guide, 2013(19): 4–5

[23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1980–2017
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1980–2017

[24] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985–2017
Editorial Committee of China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook. China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1985–2017

[25] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1985–2017
Department of Rural Socio Economic Investigation, National Bureau of Statistics. China Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1985–2017

[26] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985–2017
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Chinese Agricultural Statistics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1985–2017

[27] 中华人民共和国国家统计局. 全国年度数据[DB/OL]. 1980–2017. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. National Annual Data [DB/OL]. 1980–2017. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103

[28] 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

[29] MA L, GUO J H, VELTHOF G L, et al. Impacts of urban expansion on nitrogen and phosphorus flows in the food system of Beijing from 1978 to 2008[J]. Global Environmental Change, 2014, 28: 192–204

[30] 赵济. 中国自然地理[M]. 北京: 中国高等教育出版社, 1995
ZHAO J. Physical Geography of China[M]. Beijing: China Higher Education Press, 1995

[31] 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

[32] 李昊旻. 中国畜牧养殖污染的生态环境胁迫效应分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013
LI H M. Analysis of stress effects of livestock manure pollution on eco-environment in China[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013

[33] 胡焕庸. 中国人口地域分布[J]. 科学, 2015, 67(1): 3–4
HU H Y. China's population is geographically distributed[J]. Science, 2015, 67(1): 3–4

[34] 马林, 魏静, 王方浩, 等. 中国食物链氮素资源流动特征分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2104–2114
MA L, WEI J, WANG F H, et al. Analysis on the feature of nitrogen flow from food chain perspective in China[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(12): 2104–2114

[35] 佟丙辛, 张华芳, 高肖贤, 等. 华北平原典型区域农牧系统氮素流动及其环境效应——以河北省为例[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 442–455
TONG B X, ZHANG H F, GAO X X, et al. Nitrogen flow and environmental effects of crop-livestock system in typical area of North China Plain — A case study in Hebei Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 442–455

[36] JARVIS S, HUTCHINGS N, BRENTRUP F, et al. Nitrogen flows in farming systems across Europe[M]//SUTTON M A. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011: 211–227

[37] 王月宁, 冯朋博, 侯贤清, 等. 秸秆还田的土壤环境效应及研究进展[J]. 北方园艺, 2019, (17): 140–144
WANG Y N, FENG P B, HOU X Q, et al. Soil environmental effects and research progress of straw returning to field[J]. Northern Horticulture, 2019, (17): 140–144

[38] DE KLEIN C A M, MONAGHAN R M, ALFARO M, et al. Nitrogen performance indicators for dairy production systems[J]. Soil Research, 2017, 55(6): 479–488

[39] SUN B, SHEN R P, BOUWMAN A F. Surface N balances in agricultural crop production systems in China for the period 1980–2015[J]. Pedosphere, 2008, 18(3): 304–315

[40] ZHANG C, JU X T, POWLSON D S, 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

[41] 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

[42] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口•资源与环境, 2012, 22(7): 21–27
MIN J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21–27

[43] 郭孟楚. 中国膳食结构变化对食物链氮素流动的影响及优化途径[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
GUO M C. Impact of diet change on nitrogen flows in the food chain and optimization strategies in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018

[44] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006
Chinese Nutrition Society. Chinese Dietary Reference Intakes[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006

[45] HOU Y, MA L, GAO Z L, et al. The driving forces for nitro-

gen and phosphorus flows in the food chain of China, 1980 to 2010[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 962–971

[46] 郭迷. 中国农业绿色发展指标体系构建及评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011
GUO M. Research of agricultural green development and a preliminary study on the evaluation system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011

[47] 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. Food and environmental security in China under the water-nitrogen coupling mechanism[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2019, 49(12): 2018–2036

[48] CHEN X H, MA L, MA W Q, et al. What has caused the use of fertilizers to skyrocket in China?[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 110(2): 241–255

[49] 张福锁. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 3–22
ZHANG F S. Soil Testing and Fertilization Recommendation[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 3–22

[50] 张福锁, 马文奇, 陈新平, 等. 养分资源综合管理理论与技术概论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
ZHANG F S, MA W Q, CHEN X P, et al. Introduction to the Theory and Technology of Integrated Management of Nutrient Resources[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006

[51] 高强, 孔祥智. 中国农业结构调整的总体估价与趋势判断[J]. 改革, 2014, (11): 80–91
GAO Q, KONG X Z. Overall evaluation and the trend of China's agricultural structure adjustment[J]. Reform, 2014, (11): 80–91

[52] OENEMA O. Governmental policies and measures regulating nitrogen and phosphorus from animal manure in European agriculture[J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(S13): E196–E206

[53] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503–517
WANG J G, LIN S, LI B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 503–517

[54] 韩冬梅, 刘静, 金书秦. 中国农业农村环境保护政策四十年回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 16–21
HAN D M, LIU J, JIN S Q. Historical review for recent forty years and future prospects of agricultural and rural environmental protection policies in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(2): 16–21