

引用格式：

仝昊天, 孙聪, 夏恩君, 黄洁萍. 我国区域间气候智能型农业平衡发展及障碍度研究 [J]. 农业现代化研究, 2023, 44(6): 1093-1102.

Tong H T, Sun C, Xia E J, Huang J P. Investigating balanced development and constraining factors of Climate-Smart Agriculture among regions in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(6): 1093-1102.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2023.0093



我国区域间气候智能型农业平衡发展及障碍度研究

仝昊天, 孙聪, 夏恩君, 黄洁萍*

(北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081)

摘要: 当前全球气候变化对于农业可持续发展产生了严峻的挑战, 而气候智能型农业 (Climate-Smart Agriculture, 简称 CSA) 的理念与方法的实施有助于保障我国农业生产的稳定性与可持续性。本研究以中国九大农业区为研究对象, 选取 2010—2021 年省级面板数据, 运用熵权法、平衡发展指数模型、障碍度模型, 对中国各农业区的气候智能型农业发展指数 (CSA-DI) 和气候智能型农业平衡发展指数 (CSA-BDI)、气候智能型农业发展障碍因素进行了实证研究。结果显示: 2010—2021 年, 大部分农业区的 CSA-DI 和 CSA-BDI 均呈现提升趋势, 其中四川盆地及周边地区、东北平原区、黄淮海平原区、云贵高原区表现尤为显著。尽管重点产区在系统性、整体性和协同性方面取得了初步成效, 但在粮食安全、气候变化适应性和减缓农业碳排放等方面仍存在提升的空间。部分农业区则面临对资源禀赋过于依赖、经济发展和农业发展难以协同等问题。根据评价结果本研究提出了一系列政策建议, 包括匹配模块化发展方案、划定资源保护红线、进行 CSA 技术归纳与应用、推动“农林牧融合”综合试点等。这些建议旨在促进各地区气候智能型农业的发展, 实现成果共享与责任共担。

关键词: 气候智能型农业; 粮食安全; 九大农业区; 熵权法; 发展指数; 平衡发展指数; 障碍因素

中图分类号: S162.5+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2023) 06-1093-10

Investigating balanced development and constraining factors of Climate-Smart Agriculture among regions in China

TONG Hao-tian, SUN Cong, XIA En-jun, HUANG Jie-ping

(School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Practicing the concept and methodology of Climate-Smart Agriculture (CSA) contributes to safeguarding the stability and sustainability of agricultural production in China amidst the challenges of climate change. This research focuses on the nine major agricultural regions in China, utilizing provincial panel data from 2010 to 2021. The study employs entropy weighting, the balanced development index model, and the obstacle degree model to empirically investigate the Climate-Smart Agriculture Development Index (CSA-DI), the Balanced Development Index of Climate-Smart Agriculture (CSA-BDI), and the obstacles to CSA development in each region. The results showed that from 2010 to 2021, the CSA-DI and CSA-BDI exhibit an overall upward trajectory, particularly notable in the Sichuan Basin and its surrounding areas, the Northeast Plain, the Huang-Huai-Hai Plain, and the Yunnan-Guizhou Plateau. Despite the positive strides in the systematic, holistic, and synergistic principles of key production areas, opportunities for enhancement persist in areas such as food security, adaptability, and the mitigation of agricultural carbon emissions. Certain agricultural regions face challenges, including overdependence on resource endowments and difficulties in harmonizing economic and agricultural development. Based on the evaluation results, this study suggests a number of policy changes, such as aligning with modular development plans, setting boundaries to protect resources, using CSA technologies in a planned way, and moving forward with full trials of the “integration of agriculture, forestry, and animal husbandry”. These recommendations aim to foster the development of CSA in different regions, facilitating the sharing of achievements and shared responsibility for sustainable outcomes.

Key words: Climate-Smart Agriculture; food security; nine agricultural regions; Entropy Weight Method; development index; balanced development index; constraint factors

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72274016)。

作者简介: 仝昊天 (1992—), 男, 北京人, 博士研究生, 主要从事气候经济与农业经济研究, E-mail: tonghaotian@bit.edu.cn; 通信作者: 黄洁萍 (1970—), 女, 北京人, 博士, 副教授, 研究方向为技术经济与技术创新, E-mail: cindy@bit.edu.cn。

收稿日期: 2023-09-06; 接受日期: 2023-12-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (72274016).

Corresponding author: HUANG Jie-ping, E-mail: cindy@bit.edu.cn.

Received 6 September, 2023; Accepted 14 December, 2023

气候变化,尤其是极端气候事件的增加,促使农业生产系统的不稳定性和脆弱性显著上升^[1-2]。我国农业系统庞大而复杂,农业生产的质量与秩序正面临着气候变化与极端天气的挑战。气候智能型农业(Climate-Smart Agriculture,简称CSA)是由联合国粮农组织(International Food and Agriculture Organization,简称FAO)在2010年提出的一种农业发展理念^[3],旨在指导各国家与地区在农业生产中通过三个维度的均衡发展以应对气候变化和粮食安全挑战,具体包括:可持续地提高农业生产力与农民收入(粮食安全)、增强农业对气候变化的适应性(适应性)、减缓农业源温室气体排放(减缓排放)^[4]。自2015年开始,我国农业农村部与世界银行合作,引入了气候智能型农业的生产理念与技术,通过开展固碳减排关键技术的集成与示范,建立并推广“高产高效低排放”的农业发展新模式^[5]。本研究致力于通过构建一个基于气候智能型农业概念与视角的指标体系,对中国各农业区的CSA发展现状、平衡发展差异与障碍因素进行评价与分析,以协助推进气候智能型农业建设理念与方法在我国的实践。

当前关于CSA的研究主要分为“实施策略”和“效果检验”两类。其中“实施策略”类别侧重于研究CSA的具体实施方法。CSA的方法多种多样。在耕作方法上,包括轮作、混作、免耕或少耕、有机耕作、保护性耕作等;在农业技术上,有栽培技术、生物技术、转基因技术等;在农业管理方面,加强风险管理、灌溉管理、耕地管理和贸易结构管理也是CSA方法的一部分^[6-9]。Kakraliya等^[10]的研究表明,要成功实现CSA目标,往往需要同时实施多项措施,并根据具体情况确定适当干预措施的优先次序。“效果检验”类研究大多以特定国家或地区为研究样本,主要检验CSA实践在各地的效果并分析影响因素。国际上众多研究表明CSA技术能够有效应对气候变化所导致的粮食生产危机,例如Arslan等^[11]对于赞比亚的实证研究表明,在应用CSA技术后,当地豆类产量显著增加,并降低了在天气胁迫下出现低产的可能性;CSA技术帮助加纳部分农民收入增加了29%^[12];埃塞俄比亚农民在采用CSA技术后粮食增产22%^[13]。相比国外众多研究,我国针对CSA的研究还处于起步阶段,相关研究较少,尤其是基于CSA视角对我国农业生产和发展评价的相关研究尚属空白。此外,虽然学界针对农业生产与发展相关的评价研究已开展了大量研究,包括较为成熟的指标选取和赋权方法,

如德尔菲法^[14-15],主成分分析法^[16],层次分析法^[17-18]和熵权法^[19-20]等;在评价体系构建中,如Topsis法^[21]、综合指数法、农业现代化发展指数^[22]等;以及综合评价的延伸拓展,如使用障碍度模型和地区不平衡指数(IBDI)讨论区域异质性^[23]等。然而,可以量化区域内各维度发展态势的平衡发展指数模型在农业相关课题的研究中应用较少,将障碍度模型与平衡发展指数模型相结合的研究也相对匮乏。

气候智能型农业的实施框架与我国农业在新时期的主要工作重点高度吻合,是配合我国乡村振兴战略、缓解气候变化与减排压力的潜在有力手段。本文以全国主要农业区为研究对象,以气候智能型农业的粮食安全、适应性、减缓排放三个实践维度为框架,使用熵权法和平衡发展指数模型探索构建通用的气候智能型农业评价体系。通过测算气候智能型农业发展指数(Climate-Smart Agricultural Development Index,简称CSA-DI)、气候智能型农业平衡发展指数(Climate-Smart Agriculture Balanced Development Index,简称CSA-BDI)以及气候智能型农业发展障碍度,对各主要农业区的气候智能型农业发展现状、区域间平衡发展差异和障碍因素进行实证研究。本研究的边际贡献是:基于气候智能型农业视角,为我国农业生产应对气候变化的能力提供量化的参考,结合我国当下的农业发展战略,为进一步推动气候智能型农业在我国的实践提供决策依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域划分

本研究参考《中国综合农业区划》对中国农业资源和农业区的分区依据。《中国综合农业区划》根据农业生产条件、气候特征和发展水平等多方面因素,将全国以县(市)为基本单位划分为十个一级农业区。其中第十区为海洋水产区,我们结合研究的需求与特点,未将海洋水产区列入研究范围。考虑到数据的完整性、可获得性以及各农业区在农业生产活动中的趋同性,本研究对各农业区所含省(区、市)(未包含港澳台地区)的具体划分见表1。通过农业区的划分有助于气候智能型农业视角的平衡发展对比与障碍因素分析,同时便于溯源并针对性地提出政策建议。

1.2 气候智能型农业评价指标体系构建

气候智能型农业作为一种农业发展的新模式,强调在农业有关的各个层面都考虑气候变化的因素,实现粮食安全、适应性和缓解排放的“三赢”^[24]。

表 1 31 个省（区、市）所属农业区
Table 1 Agricultural regions belonging to 31 provinces (region, city)

农业区	所含省（区、市）
北方干旱半干旱区	内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃省、宁夏回族自治区
东北平原区	黑龙江省、吉林省、辽宁省
云贵高原区	云南省、贵州省、广西省
华南区	广东省、福建省、海南省
四川盆地及周边地区	重庆市、四川省
长江中下游地区	上海市、江苏省、安徽省、浙江省、江西省、湖北省、湖南省
青藏高原区	西藏自治区
黄土高原区	山西省、陕西省
黄淮海平原区	北京市、天津市、河北省、山东省、河南省

在构建指标体系时，本研究遵循全面性、代表性、整体性、可操作性的四项原则，以确保所选择的评价指标科学、客观、合理地描述评价对象或领域^[25]。本研究设计中，评价体系旨在成为计算发展指数 CSA-DI、核算平衡发展指数 CSA-BDI 以及分析障碍因素的基础。由于不同农业区的经济发展水平、历史背景和气候环境各异，各因素的相对重要性因情况而异，需要对不同因素之间的关联做权衡^[26]。参考已有研究^[24]，评价指标体系包含气候智能型农业的三个主要维度：粮食安全、适应性、减缓排放。

各维度指标选取准则如下：1) 粮食安全维度。粮食安全水平不只局限于粮食的供给能力，也应包括肉蛋类产品的供给能力与农林牧渔的综合发展水平。对持续生产的关注不仅局限于产量本身，还应考虑土地的生产力、区域内劳动力水平等。2) 农业对气候变化的适应性是 CSA 的关键组成部分，主要关注对农业可持续生产的支持。因此，测度要考虑资源禀赋、人为干预气候变化的有效性、可持续农业技术的运用以及管理者对相关领域的支持强度。3) 减缓农业温室气体排放主要是控制种植业和养殖业生产过程中各碳源的温室气体排放，其中种植业实际消耗的柴油、农药、化肥、农膜皆是主要的温室气体排放源。基于以上准则，本研究选取 22 个指标代表粮食安全、农业适应性和减缓排放三个维度，具体指标及释义如表 2 所示。

1.3 气候智能型农业发展指数测算

科学合理的指标权重是评估研究结果可信度的关键组成部分。本文参考刘晓敏和张天萌^[21]、侯佳等^[28]的研究，使用 min-max 归一化方法对数据进行无量纲化处理得到标准化值，运用熵权法对各指标进行客观赋权，获得每个指标的权重。使用 2010—2021 年全国农业面板数据，采用加权求和法计算全国九大农业区的 CSA-BDI。基于不同省（区、

市）各具体指标的评价值，进一步合成各农业区准则层的 CSA-DI，并采用自然断点法将九大农业区的评价结果分为好、较好、中等、较差四个等级。CSA-DI 计算公式如下：

$$I_{k,t,i} = \sum_{n=1}^{n_j} L_{j,k,t,i} \omega_{i,j} \quad (1)$$

$$CSADI_{k,t} = \sum_{i=1}^3 I_{k,t,i} \omega_i \quad (2)$$

$$CSADI_{m,t} = \frac{\sum_{k=1}^{m_k} CSADI_{k,t}}{m_k} \quad (3)$$

式中： $I_{k,t,i}$ 表示 k 省（区、市）第 t 年的第 i 个准则层评价得分； $L_{j,k,t,i}$ 表示 k 省（区、市）的第 t 年的第 i 个准则层中的第 j 个具体指标的标准化值； $\omega_{i,j}$ 表示第 i 个准则层中第 j 个具体指标的权重； $CSADI_{k,t}$ 表示 k 省（区、市）第 t 年气候智能型农业发展指数； ω_i 表示第 i 个准则层的权重，对准则层进行加权求和，可以得到各省（区、市）气候智能型农业的综合评价价值； $CSADI_{m,t}$ 表示 m 农业区第 t 年气候智能型农业发展指数； $CSADI_{k,t}$ 表示 k 省（区、市）第 t 年气候智能型农业发展指数，对九大农业区内各省（区、市）的 CSADI 求均值，可以得到各农业区的气候智能型农业的综合评价价值。

1.4 气候智能型农业平衡发展指数测算

CSA-BDI 是在使用 CSA-DI 进行综合评价的基础上，对九大农业区的粮食安全、适应性、减缓排放三个维度平衡发展水平的概括性度量。本研究借鉴许宪春等^[29]所构建的平衡发展指数模型构建了气 CSA-BDI。该模型可以对发展不平衡和不充分问题进行定量分析，具有精确、客观、易比等特点。CSA-BDI 测度过程中，首先选择基尼系数法对地区不平衡系数进行测算。随后，通过调整系数对各省

表 2 气候智能型农业评价指标体系各指标释义

Table 2 Interpretation of the indicators of the Climate-Smart Agriculture evaluation index system

准则层	指标层 (缩写)	指标单位	指标释义	属性	权重
粮食 安全 (A)	农林牧渔业增加值 (A1)	元	用农、林、牧、渔业现价产值分别减去各自中间消耗, 求出各行业增加值	正	0.04
	农民人均可支配收入 (A2)	元	各省 (区、市) 农村居民家庭人均可支配收入	正	0.03
	粮食作物播种面积 (A3)	hm ²	收获的粮食作物在耕地及非耕地上的播种或移植面积	正	0.05
	粮食产量 (A4)	t	全年粮食总产量 (谷物、薯类和豆类等)	正	0.05
	第一产业从业人数 (A5)	人	从事农、林、牧、渔业的从业者人数 (不含专业及辅助性活动)	正	0.04
	肉类产量 (A6)	t	调查期内各种牲畜及家禽、兔等动物肉产量总计	正	0.04
	禽蛋产量 (A7)	t	鸡蛋、鸭蛋、鹅蛋、麻雀蛋、鸽蛋的总产量	正	0.07
农业对 气候的 适应性 (B)	农业成灾率 (B1)	%	成灾耕地面积占耕地总面积的比值	负	0.07
	湿地面积 (B2)	hm ²	包含近岸及海岸、河流、湖泊、沼泽和人工湿地面积	正	0.06
	节水灌溉面积 (B3)	hm ²	包含喷滴灌溉、微灌溉、低压灌溉、渠道防渗等节水灌溉技术使用面积	正	0.05
	森林面积 (B4)	hm ²	包含天然起源和人工起源的针叶林、阔叶林、针阔混交林和竹林的面积	正	0.13
	自然保护区面积 (B5)	hm ²	包含生态系统类保护区、生物物种类保护区和自然遗迹类保护区面积	正	0.10
	累计除涝面积 (B6)	hm ²	上年除涝面积与本年新增除涝面积之和, 减去本年减少除涝面积	正	0.03
	水土流失治理面积 (B7)	hm ²	包含采取水平梯田、淤地坝、谷坊、造林种草、封山育林育草等所治理的水土流失面积总和	正	0.10
	农村发电量 (B8)	kW·h	以小水电为主体, 直接为农村经济社会发展服务的水电站发电量	正	0.05
	农用机械总功率 (B9)	kW·h	包含拖拉机、粮食作物生产机、农产品初加工作业机械、畜牧机械、水产机械、植保无人机等	正	0.03
	涉农财政支持 (B10)	元	各省 (区、市) 支农支出与农林水事务支出	正	0.01
减缓 排放 (C)	化肥施用折纯量 (C1)	t	包含农用氮肥、农用磷肥、农用钾肥、农用复合肥	负	0.01
	农药使用量 (C2)	t	各类农药制剂使用总量	负	0.01
	农膜使用量 (C3)	t	应用于农业生产的塑料薄膜的总重量	负	0.01
	畜牧业碳排放 (C4)	t	参照姚成胜等 ^[27] 的研究	负	0.01
	农用柴油使用量 (C5)	t	用于农用机械及排灌柴油机的柴油使用总量	负	0.01

(区、市)的发展指数进行调整,得到相对应省(区、市)的CSA-BDI。最后,各农业区的CSA-BDI由各自的调整系数与发展指数两部分相乘得到。具体计算公式如下:

$$G_{m,t} = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} \sum_{r=1}^{n_m} |y_{m,i,t} - y_{m,r,t}|}{2n_m^2 CSADI_{m,t}} \quad (4)$$

$$A_{m,t} = 1 - G_{m,t} \quad (5)$$

$$CSABDI_{m,t} = A_{m,t} \times CSADI_{m,t} \quad (6)$$

式中: $G_{m,t}$ 表示 m 农业区 t 年的气候智能型农业不平衡系数; $y_{m,i,t}$ 和 $y_{m,r,t}$ 为 m 农业区所包含的省(区、市) i, r 在 t 年的气候智能型农业发展指数; n, m 为各农业区所包含的省(区、市)数量; $A_{m,t}$ 为 m 农业区 t 年的调整系数; $CSABDI_{m,t}$ 为 m 农业区 t 年的平衡发展指数。

1.5 气候智能型农业障碍度模型

障碍度模型在农业现代化发展和农业可持续发展的测度中已得到较为成熟的应用。为进一步探索九大农业区的发展短板,本文借鉴张改清和刘烁^[30]、杨念和王蔚宇^[31]的研究,基于发展指数和平衡发展指数的测度,引入障碍度模型测度各指标对气候

智能型农业发展的阻碍程度,识别关键障碍因素,为政策制定提供参考。为保证研究的连贯性和一致性,障碍度模型采用与发展指数和平衡发展指数相同的权重。各具体指标障碍度与准则层粮食安全、适应性、减缓排放障碍度的具体计算公式如下:

$$O_{i,j} = \frac{(1 - N_{i,j}) \times \omega_{i,j}}{\sum_{j=1}^{22} [(1 - N_{i,j}) \times \omega_{i,j}]} \quad (7)$$

$$O_i = \sum_{j=1}^{n_j} O_{i,j} \quad (8)$$

式中: $O_{i,j}$ 为 i 准则层中第 j 个单项指标对农业区内气候智能型农业发展的障碍度; N 为指标的标准化值; O_i 为准则层 i (粮食安全、适应性、减缓排放)对农业区内气候智能型农业发展的障碍度; $\omega_{i,j}$ 为采用熵权法计算得出的各指标权重。

1.6 数据来源及数据处理

本文数据来源于2010—2021年《中国农村统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》及全国农业普查数据。对于缺失指标值,采用各省(区、市)农业农村厅

最新公开数据作为依据，并结合时间序列模型和线性插值法进行补充。该数据处理方法能够提高数据的完整性和准确性，确保研究结果的可信度。

2 结果与分析

2.1 九大农业区 CSA-DI 趋势变化与时空分异特征

CSA-DI 测度结果表明，2010—2021 年全国多数农业区气候智能型农业发展水平稳步提升(图 1)。其中，四川盆地及周边地区和云贵高原区表现尤为显著，这反映了云贵川地区的农业现代化与可持续性政策得到了推进。此外，气候条件与经济发展较为薄弱的黄土高原区也有明显的提升，这是黄土高原向绿色发展转型所取得的阶段性成果^[32]。全国 GDP 总量排名第一的华南区(2020 年)的 CSA-DI 在上升趋势中出现了较为明显的震荡，GDP 总量排名第二的长江中下游地区(2020 年)亦有明显波动，这可能暗示经济发展的持续性与气候智能型农业的延续性存在一定的冲突。青藏高原区 CSA-DI 具有较为明显的下行变化趋势，尤其是 2017 年之后。从

畜牧发展与生态现状的数据上看，青藏高原区的森林灌丛退化面积比例达 59%，草地退化面积比例达 80% 以上，实际载畜量是理论载畜量的 1.6 倍以上，出现超载情况的县比例达 80.93%^[33]，CSA-DI 评价结果提示了该地区在生态退化与过度放牧方面的风险。

选取 2010、2015 和 2021 年 3 个时间节点对九大农业区 CSA-DI 评价结果进行排序和分级(表 3)。结果表明，全国 CSA-DI 的平均值逐年提升，2010 年至 2021 年期间 CSA-DI 从 44.51 提高至 48.48。虽然全国 CSA-DI 平均值稳步提升，但总体上仍有较大提升空间。其中 CSA-DI 评级结果中仅有东北平原区和四川盆地及周边地区评级为“好”，各农业区仍在粮食安全、适应性、减缓排放上有改进的潜力。其次，各农业区气候智能型农业的发展现状有明显的区位差异，评价结果为“好”和“较好”的农业区主要分布在秦岭—淮河线、长江流域，而评价结果为“中等”和“较差”的农业区主要包括秦岭—淮河线以南的南方地区和西北地区。这表明我

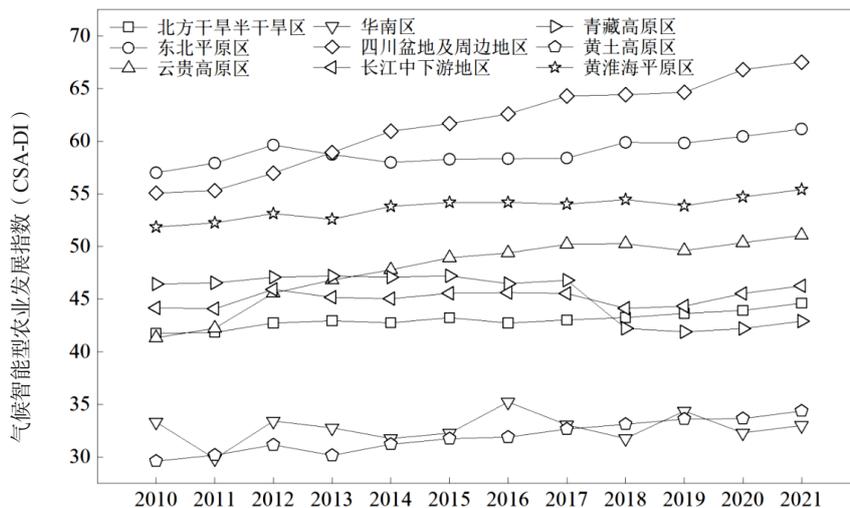


图 1 九大农业区气候智能型农业发展指数 (2010-2021)

Fig. 1 Climate-Smart Agriculture Development Index and historical trend of nine agricultural regions (2010-2021)

表 3 九大农业区气候智能型农业发展指数 (CSA-DI) 及排名

Table 3 Climate-Smart Agricultural Development Index and ranking of nine agricultural regions

农业区	2010 年			2015 年			2021 年		
	CSA-DI	排名	评级	CSA-DI	排名	评级	CSA-DI	排名	评级
北方干旱半干旱区	41.75	6	中等	43.23	7	中等	44.64	6	中等
东北平原区	57.02	1	较好	58.29	2	较好	61.17	2	好
云贵高原区	41.34	7	中等	48.94	4	中等	51.07	4	较好
华南区	33.33	8	较差	32.27	8	较差	33.00	9	较差
四川盆地及周边地区	55.09	2	较好	61.68	1	好	67.51	1	好
长江中下游地区	44.17	5	中等	45.55	6	中等	46.26	5	中等
青藏高原区	46.44	4	中等	47.21	5	中等	42.92	7	中等
黄土高原区	29.62	9	较差	31.74	9	较差	34.38	8	较差
黄淮海平原区	51.84	3	较好	54.20	3	较好	55.41	3	较好

国气候智能型农业的发展现状存在明显的地域性差异。此外,排名靠前的三大农业区基本涵盖了粮食主产省(区、市),表明我国在保障粮食安全与应对气候变化方面已经具有一定的协同能力。

相比之下,CSA-DI 评价靠后的农业区与畜牧业主要分布区域(内蒙古高原、新疆、青藏高原)重合度较高。结合青藏高原 CSA-DI 出现明显下降的现状及其成因,表明在发展气候智能型农业的过程中,畜牧业可能面临一定的风险。其主要原因在于:1)草场的畜牧容量是有限的,面对持续递增的需求,透支资源禀赋是危险而不可持续的;2)在 CSA-DI 的减缓排放维度评价中,畜牧业碳排放相比较种植业,在政策和技术的普及度方面长期处于较为劣势地位;3)种植业在大部分农业区内的优势地位,可能造成从业者和管理者进一步倾斜其政策与意愿,形成对现有农业生产结构的路径依赖,导致畜牧业高质量发展的滞后,从而难以实现“农林牧”在适应性、粮食安全、减缓排放三个维度的长期均衡发展。综合而言,通过 CSA-DI 的测算,揭示了我国不同农业区气候智能型农业发展水平的趋势和差异,为深入分析其影响因素提供了重要线索。

2.2 九大农业区 CSA-BDI 趋势变化与时空分异特征

CSA-BDI 测度结果表明,2010—2021 年全国多数农业区的平衡发展水平得到提升(图 2)。这表明在政策支持下,我国的农业发展不但可以抵御粮食进出口波动、生产力压力、气候变化风险,各维度平衡发展的能力也得到了加强。这间接反映了我国农业绿色发展、农业现代化发展、农业高质量发展等理念与政策已经得到了有效的贯彻,这与明翠

琴^[16], 辛岭和郝汉^[22], 杨念和王蔚宇^[31], 张小允和许世卫^[34]的研究结果相符。相比其他主要农业区,青藏高原地区 2017 年后 CSA-BDI 存在下降趋势,除生态退化与畜牧超载因素外,导致这一现象的原因可能还包括农业发展受到生产模式转变和经济高速发展与原始生态的不兼容性带来的阶段性“震荡”。近几年该地区 CSA-BDI 的“止跌企稳”也表明,该地区正在建立新的平衡。

选取 2010、2015 和 2021 年 3 个时间节点对九大农业区 CSA-BDI 评价结果进行排序和分级(表 4)。结果表明,虽然 2010—2021 年 CSA-BDI 评级为“差”和“较差”的地区虽略有减少,但仍未有评级为“好”的农业区,提升空间仍然较大。四川盆地及周边地区、东北平原区和黄淮海平原区 CSA-BDI 的评价为“良好”。这表明我国农业重点产区在系统性、整体性与协同性上已初见成效。长江中下游地区虽然在 CSA-BDI 的评价中排名靠后,但在 CSA-BDI 的评价中处于中游。这说明在资源充足、经济发展领先的地区,经济发展对农业与气候的平衡发展具有一定的拉动作用。此外,虽然云贵高原区 CSA-BDI 评价较高,但这主要是因为该区的粮食安全、适应性、减缓排放三维度的现状都相对较弱,形成了一种“低水平平衡”。因此,在提升 CSA-BDI 水平之前,需要更高优先级地逐一提升粮食安全、适应性与减缓排放能力。

从现实角度看,较高的 CSA-BDI 评价意味着各农业区在各维度上实现了协同发展,并为长期发展目标奠定了基础。然而,这需要在粮食安全、适应性和减缓排放方面没有明显短板的基础上建立。

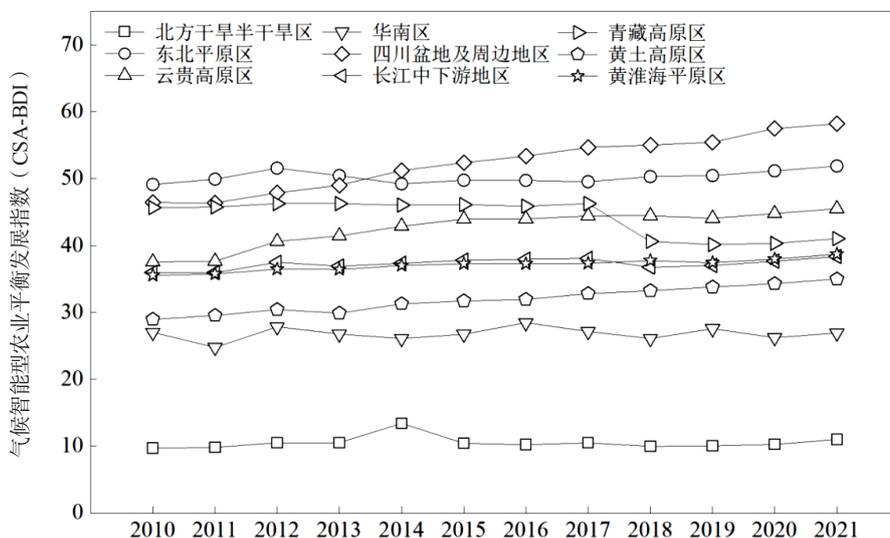


图 2 九大农业区气候智能型农业平衡发展指数 (2010-2021)

Fig. 2 Climate-Smart Agriculture Balanced Development Index and historical trend of nine agricultural regions (2010-2021)

表 4 九大农业区气候智能型农业平衡发展指数 (CSA-BDI) 及排名
Table 4 Climate-Smart Agriculture Balance Development Index and ranking of nine agricultural regions

农业区	2010 年			2015 年			2021 年		
	CSA-BDI	排名	评级	CSA-BDI	排名	评级	CSA-BDI	排名	评级
北方干旱半干旱区	9.69	9	差	10.41	9	差	10.97	9	差
东北平原区	49.13	1	中等	49.75	2	中等	51.87	2	较好
云贵高原区	37.52	4	较差	43.93	4	中等	45.49	3	中等
华南区	27.03	8	较差	26.72	8	较差	26.93	8	较差
四川盆地及周边地区	46.43	2	中等	52.40	1	较好	58.21	1	较好
长江中下游地区	35.97	5	较差	37.80	5	较差	38.37	6	较差
青藏高原区	45.67	3	中等	46.11	3	中等	41.03	4	中等
黄土高原区	28.96	7	较差	31.72	7	较差	34.99	7	较差
黄淮海平原区	35.54	6	较差	37.28	6	较差	38.70	5	较差

不同区域的农业基础、战略定位和发展潜力各不相同，所处的发展阶段也存在差异。因此，权衡取舍是必不可少的步骤，首先要提升 CSA-BDI 水平，然后在此过程中 CSA-BDI 可能会经历停滞、震荡甚至下降的路径。

2.3 九大农业区气候智能型农业障碍因素

基于障碍度模型结果对各农业区气候智能型农业障碍因素进行分析。以 2021 年为例，各农业区中适应性相关指标占据主导地位，其占比在 59.92% 至 69.36% 之间（图 3）。具体来说，B4（森林面积）、B7（水土流失治理面积）和 B5（自然保护区面积）在适应性维度中占比最高，直接与各地资源禀赋的强弱程度相关（表 5）。同时 B8（农村发电量）占比也相对较高。这说明在适应性方面对资源禀赋进行“补短”仍然面临较大的难度，自然资源

与生产资源之间的转化仍然存在不足。农业与适应性作为气候智能型农业概念中最新颖、最重要，也是难度最大的组成部分，涵盖了广义农业发展的众多维度，与气候、生产、抗逆性、环境、生态保护、资源禀赋等方面密切相关。尽管资源禀赋可能被视为一种制约，但并非是无法突破的壁垒。我国已经取得了大量通过政策实践改善区域内资源禀赋的成功案例，其中最显著的例子是三北防护林建设计划。在长达 78 年的时间跨度内，该计划已成功建设了 3014 万公顷的防护林，为改善生态环境、保障可持续发展做出了积极贡献。因此，气候变化冲击下的农业生产问题同样也可以借助以往经验，通过有效的政策调控与技术干预实现由点到面的改变。

粮食安全在整体障碍度中占比适中，占比在 28.67%~40.49%（图 3）。这主要得益于我国在确保

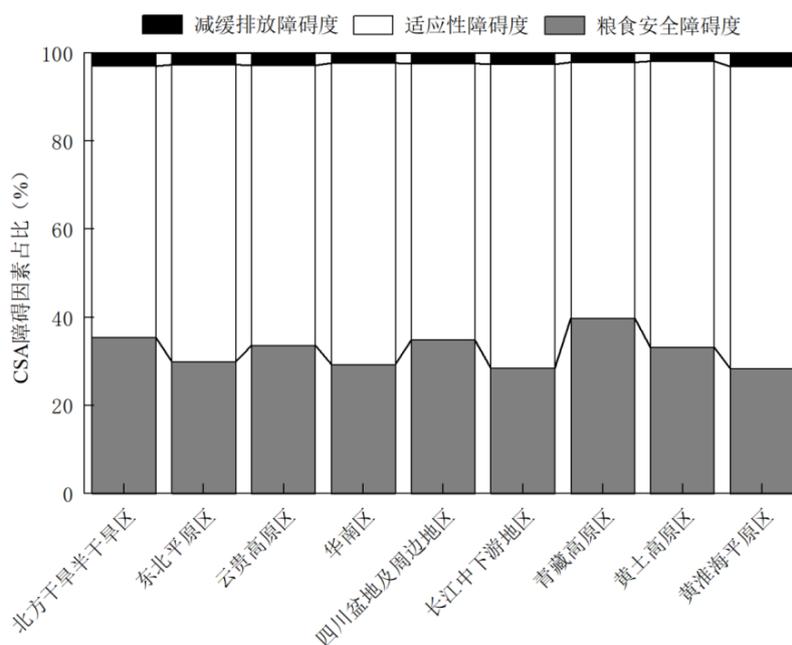


图 3 2021 年九大农业区气候智能型农业障碍因素占比
Fig. 3 Percentage of constraint factors for Climate-Smart Agriculture of nine agricultural regions in 2021

表 5 2021 年九大农业区气候智能型农业障碍因素排序
Table 5 Ranking the constraint factors for Climate-Smart Agriculture of nine agricultural regions in 2021

农业区	障碍因素排序					
	1	2	3	4	5	6
北方干旱半干旱区	B4 (11.85)	B7 (11.61)	B5 (11.06)	A7 (8.53)	B1 (6.97)	B8 (6.51)
东北平原区	B4 (16.30)	B7 (13.95)	A7 (9.04)	B5 (7.38)	B1 (7.20)	B8 (6.70)
云贵高原区	B4 (14.93)	B7 (10.98)	A7 (9.12)	B1 (9.10)	B5 (8.05)	B8 (6.38)
华南区	B4 (17.98)	B5 (10.27)	B7 (9.53)	B1 (7.72)	A7 (6.61)	B8 (6.29)
四川盆地及周边地区	B5 (12.10)	B7 (11.47)	B1 (10.26)	A7 (10.11)	B4 (7.56)	B8 (7.35)
长江中下游地区	B4 (17.57)	B7 (11.55)	B5 (8.64)	B1 (8.25)	A7 (7.56)	B8 (5.72)
青藏高原区	B5 (11.54)	B7 (11.19)	A7 (10.34)	B4 (7.39)	B8 (7.24)	B2 (6.83)
黄土高原区	B4 (14.00)	B7 (13.54)	B5 (11.73)	A7 (9.63)	B1 (8.12)	B8 (6.27)
黄淮海平原区	B4 (16.85)	B7 (11.71)	B5 (9.68)	B1 (9.16)	A7 (7.10)	B3 (6.60)

注：括号中表示各指标所占障碍度的比例（%）。

粮食安全方面所采取的国家战略和政策。我国一直秉持“以我为主、立足国内、确保产能、适度进口、科技支撑”的国家粮食安全战略。截至 2022 年，中国的粮食产量已经连续 8 年超过 0.65 万亿 kg。然而，需要注意的是，在各农业区中尤其是粮食主产区，B1（农业成灾率）占据了相对较高的比重。这直接证明了气候对中国农业生产的影响，并且是 CSA 发展中需要着重解决的主要问题。为了应对气候变化对农业的不利影响，有必要通过推广使用抗逆丰产品种来发挥农作物自身的抗逆性。此外，建设定点监测点和国家级墒情监测站等手段也是弥补气候变化带来的不确定性，提高农业系统抗灾能力的重要途径。

减缓排放在整个障碍度中的占比相对较低（图 3），这并非因为农业温室气体排放的难度较低或挑战较小，而是因为农业温室气体排放与第二、第三产业不同，缺乏足够的“弹性”和压缩空间。一味地强调减排而不顾及粮食安全和农业生产的“底线”显然是不切实际的，更是得不偿失的。农业系统产生的温室气体排放量约占全国温室气体排放总量的 17%，农业碳排放总量年均增速为 0.3%^[35]。农业源温室气体排放的压力主要是由于农业生产本身的特点，其减排空间相对有限。在当前阶段，要缓解农业源温室气体排放的压力，更多地还需依靠一些提升适应性的手段，例如湿地系统扩张、森林系统维护、水土流失治理等。因此，在考虑减缓排放的同时，也应该综合考虑农业的实际情况，确保粮食安全和农业生产的平衡发展。

3 结论与政策建议

3.1 主要结论

1) 2010—2021 年，九大农业区 CSA-DI 和 CSA-

BDI 整体呈现上升趋势，粮食主产省份所在的四川盆地及周边地区、东北平原区、黄淮海平原区等区域表现突出，呈现出粮食安全与生态保护之间良性循环的趋势。然而，整体提升的空间仍然较大。一些经济快速发展的地区，如华南区，其经济发展的持续性与气候智能型农业的进展存在一定冲突，需要深入研究经济与农业之间的相互促进关系。

2) CSA-DI 和 CSA-BDI 评价相对较低的农业区与畜牧业发达地区、牧区存在较高的重合度。畜牧业是相关农业区内农民的主要收入来源，畜牧业产品的需求正日益增长，畜牧规模快速提升。但较为落后的畜牧业生产技术与发展模式，加快了从业者边际收益的递减，进一步增加了对资源基础的消耗，影响了粮食安全、适应性、减缓排放三者间的平衡，有形成恶性循环的趋势。消费端的需求压力、生产端的收入压力与资源端的环境压力三者间的平衡亟待重构。

3) 资源禀赋的差异直接影响农业适应气候变化的能力，是各农业区气候智能型农业发展障碍的根本原因。资源禀赋差异也是影响 CSA-DI 与 CSA-BDI 评价结果的主要因素。各农业区的气候智能型农业发展对资源禀赋的依赖性过高，随着增产增收压力的增加，自然资源的保护面临更大的压力。

4) 气候智能型农业中适应性维度的发展能够有效减轻农业排放压力。在推进农业源碳排放减缓的同时，必须重视适应性水平的提升。通过促进农业系统的适应性发展，提高碳汇和生态修复能力，可以更好地实现“双碳目标”。如何在保障粮食安全的前提下推动减缓农业源碳排放是未来的重要研究方向。

3.2 政策建议

1) 对 CSA-DI 和 CSA-BDI 评价排名靠前的农

业区的发展经验进行详细的拆解与梳理,构建有效的合作机制,形成模块化解决方案。这些方案应根据各农业区的需求和现状,以现实可行的系统性方式促进落后地区的发展,实现气候智能型农业的成果共享与责任共担。对于经济相对较发达但气候智能型农业水平欠佳的地区,应充分利用其经济发展的优势,将其转化为技术优势,重点加大在设施农业等领域的投入,以提升气候智能型农业的发展水平。

2) 畜牧业的发展应该通过技术与政策提高天然草地的可持续性。为实现这一目标,应划定资源保护的底线,并加速推动从“自由放牧”向“计划放牧”再到规模化养殖的转变。特别是需要通过对中小养殖户的支持,促使畜牧业从传统的分散、粗放式发展朝着机械化、集约化、高效化的方向迈进,并建立相关的防疫和冷链加工运输体系。

3) 自然资源在维护生态气候方面发挥着关键作用,是发展气候智能型农业的重要支柱。为解决资源禀赋的弱势问题,应从两个方面进行干预:首先,通过湿地系统扩张、森林系统维护、水土流失治理等手段,缓解资源的压力,确保现有资源“只增不减”;其次,对现有技术进行基于气候智能型农业的分类,考虑不同技术对气候的影响,力求在农业生产过程中实现对资源禀赋的“只保护不破坏”。

4) 基于国内已有的“小麦—水稻”“小麦—玉米”减排增产技术试点,推进气候智能型农业的“农林牧”融合发展。农业是一个具有开放性和不稳定性多层次复合系统,将林业与牧业的作物特点、生长周期与种植业进行有机组合,有望提高投入品的利用效率和农机作业效率,减少作物系统碳排放,增加农田土壤碳储量。

参考文献:

[1] Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2011, 9(4): 16-23.

[2] Zhang P, Zhang J J, Chen M P. Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 83: 8-31.

[3] Food and Agriculture Organization. “climate-smart” agriculture: policies, practices and financing for food security, adaptation, and mitigation[R]. Rome: FAO, 2010.

[4] Zilberman D. Conclusion and Policy Implications to “Climate Smart Agriculture: Building Resilience to Climate Change” [M] *Climate Smart Agriculture*. Cham: Springer, 2018: 621-626.

[5] 魏新彦, 刘颖, 张俊彪. 气候智慧型农业项目能否抑制农业碳

排放——来自安徽气候智慧型主要粮食作物生产项目的经验证据 [J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(3): 676-687.

Wei X Y, Liu Y, Zhang J B. Can Climate-Smart Agriculture Project reduce agricultural carbon emission: Experience evidence from Climate-Smart Staple Crop Production Project in Anhui, China[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(3): 676-687.

[6] Jat M L, Dagar J C, Sapkota T B, et al. Climate change and agriculture: Adaptation strategies and mitigation opportunities for food security in South Asia and Latin America[J]. *Advances in Agronomy*, 2016, 137: 127-235.

[7] Kimaro A A, Mpanda M, Rioux J, et al. Is conservation agriculture “climate-smart” for maize farmers in the highlands of Tanzania?[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 105(3): 217-28.

[8] Porfirio L L, Newth D, Finnigan J J, et al. Economic shifts in agricultural production and trade due to climate change[J]. *Palgrave Communications*, 2018, 4(1): 111.

[9] Wilkes A, Barnes A P, Batkhisish B, et al. Is cross-breeding with indigenous sheep breeds an option for climate-smart agriculture?[J]. *Small Ruminant Research*, 2017, 147: 83-8.

[10] Kakraliya S K, Jat H S, Singh I, et al. Performance of portfolios of climate smart agriculture practices in a rice-wheat system of western Indo-Gangetic plains[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 202: 122-33.

[11] Arslan A, Mccarthy N, Lipper L, et al. Climate smart agriculture? Assessing the adaptation implications in Zambia[J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2015, 66(3): 753-80.

[12] Akrofi-Atitiani F, Ifejika Speranza C, Bockel L, et al. Assessing climate smart agriculture and its determinants of practice in Ghana: A case of the cocoa production system[J]. *Land*, 2018, 7: 30.

[13] Asrat P, Simane B. Adaptation benefits of climate-smart agricultural practices in the Blue Nile Basin: empirical evidence from North-West Ethiopia[J]. *Climate Change Adaptation in Africa: Fostering Resilience and Capacity to Adapt*, 2017: 45-59.

[14] 李首涵, 杨萍, 卢德成. 农业高质量发展评价指标体系研究——基于鲁苏浙3省的比较分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1): 66-74.

Li S H, Yang P, Lu D C. Study on evaluation index system of agricultural high-quality development: Based on comparative analysis of Shandong, Jiangsu and Zhejiang[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(1): 66-74.

[15] 谢淑娟, 匡耀求, 黄宁生, 等. 低碳农业评价指标体系的构建及对广东的评价 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 916-923.

Xie S J, Kuang Y Q, Huang N S, et al. Study on construction and application of evaluation index system of low-carbon agriculture in Guangdong[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 916-923.

[16] 明翠琴. 中国农业绿色增长评价指标体系的构建及实证 [J]. *技术经济与管理研究*, 2021(9): 108-113.

Ming C Q. Establishing and empirical analysis of green growth evaluation indicator system for China’s agriculture[J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2021(9): 108-113.

[17] Li X G, Zhang Q. AHP-based resources and environment efficiency evaluation index system construction about the west

- side of Taiwan Straits[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 228(1): 97-111.
- [18] 缪建群, 赵梅, 黄国勤. 南方丘陵山区农业可持续发展综合评价及实证分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(8): 163-172. Miao J Q, Zhao M, Huang G Q. Comprehensive evaluation and empirical analysis of agricultural sustainable development in southern hilly and mountainous area[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(8): 163-172.
- [19] 姚成胜, 滕毅, 黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 1-10. Yao C S, Teng Y, Huang L. Evaluation index system construction and empirical analysis on food security in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 1-10.
- [20] 黄修杰, 蔡勋, 储霞玲, 等. 我国农业高质量发展评价指标体系构建与评估 [J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(4): 124-133. Huang X J, Cai X, Chu X L, et al. Index construction and evaluation of high-quality development of agriculture in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(4): 124-133.
- [21] 刘晓敏, 张天萌. 基于熵权 TOPSIS 的河北省农业现代化水平评价 [J]. *山东农业科学*, 2021, 53(7): 142-149. Liu X M, Zhang T M. Evaluation of agricultural modernization level in Hebei Province based on entropy weight TOPSIS[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(7): 142-149.
- [22] 辛岭, 郝汉. 我国农业现代化发展水平评价方法研究 [J]. *农业现代化研究*, 2022, 43(5): 747-758. Xin L, Hao H. The evaluation method of the development level of agricultural modernization in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022, 43(5): 747-758.
- [23] 程文亮. 生态农业发展水平测度及空间异质性分析——基于南水北调中线受水区数据验证 [J]. *生态经济*, 2022, 38(6): 122-130. Cheng W L. Measurement of ecological agriculture development level and spatial heterogeneity analysis: Based on data verification of receiving areas in the middle route of south-to-north water diversion[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(6): 122-130.
- [24] Li J, Xia E J, Wang L L, et al. Knowledge domain and emerging trends of climate-smart agriculture: A bibliometric study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(46): 70360-70379.
- [25] Zong X Z, Liu X J, Chen G, et al. A deep-understanding framework and assessment indicator system for climate-resilient agriculture[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108597.
- [26] Lipper L, Thornton P, Campbell B M, et al. Climate-smart agriculture for food security[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1068-1072.
- [27] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制 [J]. *资源科学*, 2017, 39(4): 698-712. Yao C S, Qian S S, Li Z T, et al. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism[J]. *Resources Science*, 2017, 39(4): 698-712.
- [28] 侯佳, 赵静, 刘亚. 基于乡村振兴的河北省农业资源可持续利用评价 [J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(3): 243-251. Hou J, Zhao J, Liu Y. Evaluation of sustainable utilization of agricultural resources in Hebei based on rural revitalization[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(3): 243-251.
- [29] 许宪春, 雷泽坤, 窦园园, 等. 中国南北平衡发展差距研究——基于“中国平衡发展指数”的综合分析 [J]. *中国工业经济*, 2021(2): 5-22. Xu X C, Lei Z K, Dou Y Y, et al. Research on gap of balanced development between the north and the south of China: Analysis based on “China balanced development index” [J]. *China Industrial Economics*, 2021(2): 5-22.
- [30] 张改清, 刘铄. 黄河流域农业现代化水平时空演化及障碍因素解析 [J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(4): 624-634. Zhang G Q, Liu S. The analysis of the spatiotemporal evolution and the constraint factors of the agricultural modernization level in the Yellow River Basin[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(4): 624-634.
- [31] 杨念, 王蔚宇. 农业高质量发展评价指标体系构建与测度 [J]. *统计与决策*, 2022, 38(19): 26-30. Yang N, Wang W Y. Measurement and construction of evaluation index system of agricultural high-quality development[J]. *Statistics & Decision*, 2022, 38(19): 26-30.
- [32] He G, Wang Z H, Shen J B, et al. Transformation of agriculture on the loess plateau of China toward green development[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(4): 491-500.
- [33] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306. Fu B J, Ouyang Z Y, Shi P, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [34] 张小允, 许世卫. 我国农业农村现代化评价指标体系研究 [J]. *农业现代化研究*, 2022, 43(5): 759-768. Zhang X Y, Xu S W. Study on the construction of an evaluation index system for agricultural and rural modernization in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022, 43(5): 759-768.
- [35] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269-273. Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269-273.