

面向 2050 年我国农业资源平衡与国际进口潜力研究

郑海霞¹, 尤飞², 罗其友², 唐华俊^{3*}

(1. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国农业科学院, 北京 100081)

摘要: 受农业高质量发展、食物消费结构转型升级、气候变化的多重影响, 我国农业资源供需平衡日益趋紧, 因而统筹利用国际国内两种资源、两个市场, 保障我国中长期粮食安全至关重要。本文在对比分析国内、国际农业资源的基础上, 研究了我国 2035 年和 2050 年的粮食消费需求、消费结构、供给结构, 分析了未来农业资源供需缺口以及虚拟水、虚拟耕地的可进口潜力与进口来源地, 据此展望了我国农业水土资源利用的目标。研究表明: 我国虚拟耕地进口将在 2048 年前后达到峰值, 需进口虚拟耕地近 $6.147 \times 10^7 \text{ hm}^2$; 虚拟水进口量在 2045 年前后达到峰值, 虚拟水进口量为 $1.136 \times 10^8 \text{ m}^3$ (以蓝水估算), 约为 2017 年全国农业总用水量的 30%; 可增加的耕地进口潜力主要来自南美洲和非洲。

关键词: 农业资源平衡; 食物消费结构; 虚拟水; 虚拟耕地; 进口潜力

中图分类号: F32/F303.4 **文献标识码:** A

Agricultural Resource Balance and International Import Potential of China by 2050

Zheng Haixia¹, You Fei², Luo Qiyu², Tang Huajun^{3*}

(1. Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The balance of supply and demand for agricultural resources in China is becoming increasingly tight due to the multiple effects of high-quality agricultural production, transformation and upgrading of food consumption structure, and climate change. Therefore, it is crucial for China to integrate the international and domestic resources and markets to ensure food security in the medium and long term. Based on a comparative analysis of agricultural resources in China and abroad, we investigate food consumption demand, consumption structure, and supply structure in China by 2035 and 2050. The agricultural resource utilization targets for China by 2035 and 2050 are proposed based on an analysis of the agricultural resource supply-demand gap as well as import potentials and sources of virtual water and virtual arable land. We find that the import of virtual arable land by China will reach a peak around 2048, with nearly $6.147 \times 10^7 \text{ hm}^2$. Virtual water imports will reach a peak around 2045. If estimated by blue water, virtual water imports will be $1.136 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 30% of the total agricultural water consumption in 2017. The increase in the import

收稿日期: 2021-11-20; **修回日期:** 2021-12-22

通讯作者: *唐华俊, 中国农业科学院研究员, 中国工程院院士, 研究方向为基于遥感技术的农业土地资源合理利用、农作物种植面积空间分布和结构变化规律; E-mail: tanghuajun@caas.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国农业发展战略研究 2050”(2018-ZD-07); 国家自然科学基金项目(41271527); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2016-AII)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

potentials of China's arable land will mainly come from South America and Africa.

Keywords: agricultural resource balance; food consumption structure; virtual water; virtual arable land; import potential

一、前言

改革开放 40 多年来,我国农业取得了显著发展和系列成就,但也面临着水土资源匮乏、饮食结构转型升级、全球气候变化的挑战 [1]。我国农业水土资源长期处于高压状态,人均水资源量 (2300 m^3) 仅为世界平均水平的 28%,水污染与水资源利用效率低下并存,人均耕地面积不足世界平均水平的 1/2;还存在单位生产成本低、综合竞争力不强等问题。

由于人口增加、消费结构升级,我国粮食需求刚性增长。一方面,在资源约束条件下,2020 年粮食总产量达到 $6.695 \times 10^{12} \text{ t}$ 的历史新高,粮食进口量也创 $1.393 \times 10^{12} \text{ t}$ 的历史新高(含豆类);进口量相当于国内自产的 20.8%,表明国内产粮相比总的需求还存在一定缺口 [2]。另一方面,粮食供需的结构性矛盾比较突出,从品种结构看,稻谷产大于需,仓储稻谷有待消化;小麦产需平衡有余,但专用优质小麦供给不足,每年需进口数百万吨;玉米产需趋紧,自给率长期处于下降通道;大豆对外依存度超过 80%,产需缺口有进一步扩大的趋势 [3]。可以预判,未来随着饲用消费的继续增长,大豆、玉米等饲料粮的缺口将逐步扩大。我国粮食产量高、库存高、进口高、成本高、价格高、竞争力低的问题仍在持续 [4],同时新型冠状病毒肺炎疫情导致国际粮食供应链断裂风险增加、国际粮食贸易保护主义抬头。因此,保障农业水土资源平衡,提高以种子为核心的农业科技水平,对保障我国粮食安全具有重要价值。

我国未来粮食总缺口将表现为先增加后减少的趋势,通过大豆为主的粮食进口、虚拟水与虚拟耕地的贸易活动,既可缓解耕地和水资源压力,也可提高农业灌溉水的利用效率 [1,5]。构建全球农产品供应链,充分利用“两种资源和两个市场”,是实现未来我国农业水土资源平衡及可持续利用的战略选择。本文基于国际农业资源变化趋势及我国农业资源利用现状,以水土资源为切入点,研究我国中

长期农业资源供需平衡问题;分析全球视角下我国农业资源可进口潜力和来源,展望 2035 年、2050 年我国农业水土资源利用目标,以期为农业高质量发展研究提供基础参考。

二、国际农业资源变化趋势与我国农业资源利用现状

(一) 面向 2050 年国际农业资源的变化趋势

1. 世界耕地资源时空格局与变动趋势

世界耕地面积呈现波动增加趋势:1961—1987 年耕地面积由 $1.273 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 持续增加到 $1.374 \times 10^9 \text{ hm}^2$;1988—2007 年耕地面积逐渐降低;2008 年以来耕地面积逐步回升,2019 年达到 $1.383 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 。世界耕地资源集中在中国、美国、印度、俄罗斯、巴西、阿根廷、澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦、乌克兰等国家,其中俄罗斯、加拿大、阿根廷、澳大利亚的人均耕地面积世界领先;亚洲、非洲大部分地区的人均耕地面积相对不足。2010 年以来,世界耕地面积总量靠前的国家中,中国耕地面积减少最为明显,巴西耕地面积增加最多,阿根廷、澳大利亚耕地面积持续增加,美国耕地面积基本保持稳定。世界耕地高强度种植区域集中在东南亚、南美洲、北美洲、西非地区,复种指数超过 200%。全球共有 $3.34 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的耕地使用灌溉设备,主要分布在亚洲、南美洲、北美洲,其中亚洲占比高达 70.9%;灌溉面积最大的国家是中国 ($7.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$)、印度 ($7 \times 10^7 \text{ hm}^2$)、美国 ($2.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$)。

着眼 2050 年,世界土地退化趋势将进一步加剧,人类面临较高的粮食安全和生态风险;预计有 40 亿人生活在干旱地区,土地退化、气候变化将使世界作物产量平均下降 10%,在某些极端条件的地区甚至下降 50% [6]。也要注意,世界土地资源中的潜在耕地数量显著,非洲撒哈拉以南地区、拉丁美洲地区的扩地空间依然存在,同时气候变化会给温带地区带来一定的扩地潜力。研究表明 [7],到 2050 年世界耕地面积将继续增长,但

增长率低于过去的 50 年；预计 2030 年世界耕地面积为 $1.645 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ，2030—2050 年耕地增长率仅约 1%，2050 年世界耕地面积达到 $1.661 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ；大部分耕地增长来自发展中国家，而发达国家的耕地利用率可能持续下降。

2. 全球水资源时空格局与变动趋势

全球水资源整体短缺，加之地区分布极不平衡，导致非洲、亚洲人均水资源严重缺乏。赤道附近降水量较多，由赤道往两级，降水量逐渐减少；在南北回归线附近，大陆东岸降水较多，西岸降水较少。大洋洲是世界上淡水资源总量最少的地区，但因人口数量少而占有最多的人均水资源；南美洲、北美洲拥有丰富的水资源（合计占有全世界淡水资源的 44%），人均可再生水资源超过 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ；由于人口密集，亚洲、非洲的人均淡水资源相对缺乏。当前，农业是用水量最多的部门，世界平均农业用水量占总用水量的 69%，主要用于农业灌溉。预计 2050 年，全球作物灌溉用水将比 2010 年增加 23%~42% [7]。

着眼 2050 年，世界用水需求将持续增长，人口增加导致的用水紧张局面进一步加剧。联合国发布的《2018 年世界水资源开发报告》认为，考虑人口增长、经济发展、消费方式转变等因素，世界水资源需求正在以每年 1% 的速度增长。当前世界用水需求约为 4600 km^3 ，2050 年将增加到 $5500 \sim 6000 \text{ km}^3$ [7]；2050 年面临缺水状态的人口主要分布在亚洲（91%~96%）、非洲（4%~9%）。此外，干旱缺水、洪涝灾害也影响水资源供应，未来工业和生活用水需求量增长将远大于农业需水量。

（二）我国农业资源的利用现状

农业资源主要分为农业自然资源、农业经济资源：前者指可以利用的自然环境要素，如土地资源、水资源、气候资源、生物资源等；后者涉及农业劳动力、资金投入、农业技术等。水土资源是主要的农业生产限制性资源，因而本文重点针对农业水土资源的平衡与国际进出口潜力问题开展分析。

1. 耕地资源

我国耕地资源表现为先增加后减少的趋势，人均耕地资源整体呈下降趋势。1949—1980 年，耕地资源呈上升趋势；1980 年以来耕地资源呈下降趋势，2017 年全国耕地面积为 $1.349 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。根

据自然资源部“三调”数据，2019 年我国耕地面积为 $1.279 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，水田、水浇地、旱地分别占 24.55%、25.12%、50.33%。我国将继续执行严格的耕地保护政策，预计耕地面积 2035 年保持在 $1.243 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 左右，2050 年不低于 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。

根据农业农村部《2019 年全国耕地质量等级情况公报》，一等至三等耕地面积为 $4.227 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，占耕地总面积的 31.24%；四等至六等的耕地面积为 $6.313 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，占耕地总面积的 46.81%；七等至十等的耕地面积为 $2.96 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，占耕地总面积的 21.95%。从空间分布看，我国耕地集中在东北、西北、华北地区，与水资源空间分布不匹配。

2. 水资源

2010 年以来，我国水资源总量小幅增加，但时空分布不均，人均水资源量仅为 2000 m^3 ，平均农业用水量为 $3.7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ；降水量从东南沿海向西北内陆递减，水土资源的区域不匹配特征明显。例如，长江流域和长江以南的耕地只占全国的 36%，而水资源量占到全国的 80%；黄河、淮河、海河三大流域的水资源量合计仅占全国的 8%，而耕地占到全国的 40%。由于北方地区的地表水资源不足，当地农业生产对地下水的依赖度逐年加强；北方地区地下水超采严重，浅层地下水位仍在继续下降。我国许多地区用水方式落后，农业水资源利用效率不高。虽然全国农田灌溉水有效利用系数在逐年上升，但整体水平较低，如 2018 年仅为 0.554，与发达国家 0.7~0.8 的水平相比仍显滞后；灌溉水单方产出量也与农业发达国家水平存在很大差距。

三、我国中长期农业资源供需平衡分析

（一）粮食消费需求

1. 主要农产品人均消费量预测

采用中国农产品局部均衡模型（CASM）分析并预测不同人口情景下我国粮食需求的变化情况。CASM 作为政策模拟分析工具，可以研究政策变化、外界冲击等因素对我国农产品市场的影响 [8]。研究表明，从 2017 年到 2035 年、2050 年，城乡居民食物消费结构具有主粮消费逐渐下降、肉蛋奶类消费持续增加的特征；2018 年农村居民主粮消费占比为 43.33%、蔬菜和水果占比为 39.91%，到 2035 年、2050 年分别小幅减少。

从口粮消费看,至2050年整体上稳中有降,人均消费量将从2018年的198.5 kg下降到2035年的185.9 kg、2050年的178 kg(见图1)。农村人均口粮消费量高于城镇,随着时间推移逐渐趋同;农村、城镇人均口粮消费分别从2018年的229.57 kg、177.04 kg下降到2035年的225.3 kg、171.98 kg,2050年的219.72 kg、167.53 kg。在消费结构方面,水稻消费量最高,小麦、玉米、大豆次之,整体上构成变化不大。

从水果和蔬菜消费看,城镇人均蔬菜消费高于农村,至2050年人均消费都将继续增加,分别从2018年的170 kg、129 kg增加到2035年的174.4 kg、140.3 kg,到2050年为171.1 kg、145.3 kg。

肉蛋奶类消费品整体上继续增加,农村人均消费量低于城镇;到2035年农村与城镇肉蛋奶类消费量差距逐渐减少,到2050年消费量基本接近。其中,猪肉的消费量最高,2018年、2035年、2050年农村和城镇人均猪肉的消费量分别从23.92 kg、31.2 kg增加到29.22 kg、34.39 kg,32.68 kg、36.34 kg。

2. 人口总量和人口结构变化预判

我国未来人口总量及其结构变化会显著影响食物消费结构、粮食需求总量,与中长期粮食安全直接关联。目前至2050年是我国人口变化的重要阶段,受出生率降低、老龄化发展、鼓励生育政策出台等因素的综合影响,人口的总量与结构都将出现

显著变化,如人口总量达到峰值、城镇人口比例继续提高。根据联合国人口署发布的中国人口预测模拟方案[8](以中等增速人口预测模拟方案为基准),我国人口总量峰值为14.416亿人(2029年);2035年,我国人口总量为14.32亿人,城镇常住人口为10.59亿人,农村常住人口为3.73亿人,城镇人口城镇化率为74%;2050年,我国人口总量为13.63亿人,城镇常住人口为10.91亿人,农村常住人口为2.72亿人,城镇人口城镇化率为80%。

3. 全国粮食需求总量预测

根据我国人均主要农产品消费量、我国人口预测基准方案,得到全国主要农产品未来总消费量的预测方案:粮食总消费在2035—2040年达到峰值,口粮在近期达到峰值(见图2)。

粮食需求总量预测应合理考虑收获损失、粮食浪费、种子及工业应用需求。例如,一般认为粮食收获损失约5%,小麦、水稻等主粮工业的加工需求占8%(中国农业科学院研究结论),种子需求占1%。为此,对种子、工业、损耗与浪费合计占比有以下假设:2018—2020年为15%,2025—2035年为12%,2035—2050年为10%,据此估算粮食总需求。预测结果显示,我国粮食总需求在2035年达到峰值(6.762×10^8 t),饲料粮消费持续增加至2050年(3.317×10^8 t),口粮消费稳步降低,油料与食糖消费保持增长(见表1)。

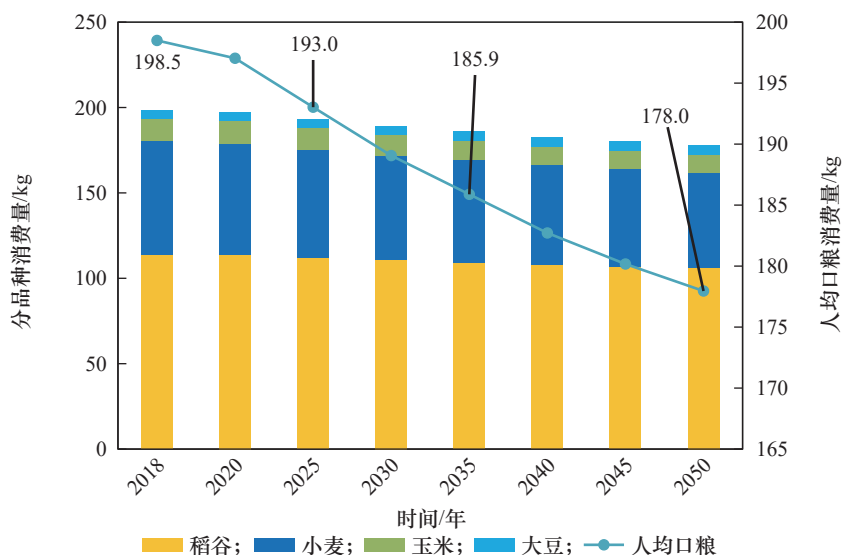


图1 人均口粮消费结构

注:数据来源于国家统计局、作者计算和CASM模拟。

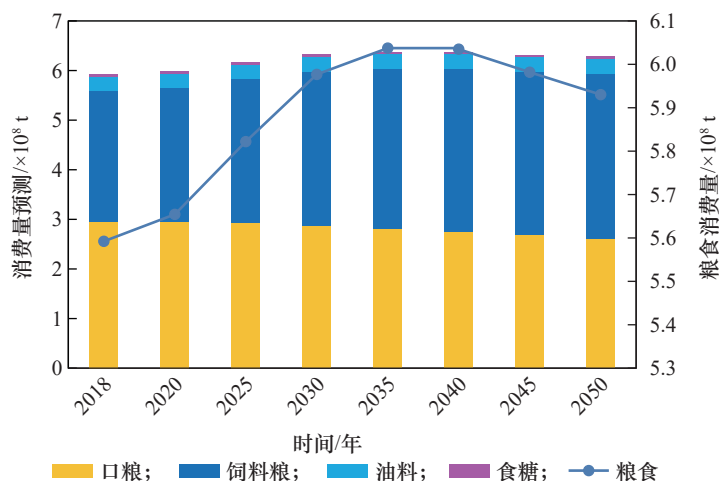


图 2 粮食消费预测结果（中方案）

注：数据来源于国家统计局、CASM 模拟。

表 1 粮食消费量和总需求量（中方案）

（单位：×10⁴t）

时间/年	粮食总需求	粮食消费量	种子、工业、 减损、浪费	口粮	饲料粮	油料	食糖
2018	64 311	55 922	8388	29 434	26 488	2802	205
2020	65 025	56 543	8482	29 453	27 090	2909	212
2025	65 206	58 219	6986	29 264	28 955	3048	229
2030	66 940	59 768	7172	28 770	30 997	3126	244
2035	67 619	60 374	7245	28 136	32 238	3176	258
2040	67 591	60 349	7242	27 567	32 782	3269	257
2045	66 996	59 818	7178	26 897	32 921	3329	254
2050	66 418	59 302	7116	26 129	33 173	3357	250

（二）农业资源供需平衡

1. 粮食供需平衡分析

从 CASM 模型预测结果出发，分析我国主要粮食作物的种植面积、单产、消费、生产、贸易、库存情况，进一步计算粮食缺口（或盈余）情况，以此明确农业资源的供需缺口形势。

从粮食作物的种植结构看，2035 年和 2050 年，小麦、稻谷、玉米的种植面积合计占比基本保持在 60% 左右，小麦、稻谷的种植面积小幅减少，玉米的种植面积有所增加；这与消费结构变化相似，即直接主粮消费降低，饲料粮消费增加。大豆的种植面积将略有增加，水果和蔬菜的种植面积占比将由 2001 年的 20% 增加到 2050 年的 23%。从主要作物的单产看，玉米单产将继续上升且增速最快，2035 年可达 7.3 t/hm²；小麦、稻谷单产将分别保持为

5.4 t/hm²、6900 t/hm²。

粮食总体供需平衡情况为：水稻、小麦、玉米等主要口粮存在结构性缺口，水果、蔬菜出现盈余，玉米、大豆、油籽、棉花出现缺口。水稻缺口先增加后减少，缺口占需求的比重由 2018 年的 1.87% 逐步增加，在 2024 年达到缺口峰值，到 2050 年出现少量盈余；小麦缺口由 2018 年的 3.46% 逐步下降，到 2050 年基本平衡；玉米缺口逐步增加，由 2018 年的 1.85% 逐步增加到 2050 年的 13.94%。油料作物以缺口为主，其中大豆缺口最大且逐步增加，2050 年缺口为 1.05×10⁸ t（占需求的比重为 87.55%）；花生少量盈余。食糖缺口从 2×10⁶ t 增长到 5×10⁶ t。水果、蔬菜出现盈余，盈余量先增加后减少。

2. 农业资源供需平衡分析

根据粮食总需求缺口、单产预测结果来估算

资源缺口、供需平衡状况。从耕地角度看, 缺口在2018年为 $5.527 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 随后逐渐增加, 至2035年有所降低, 2050年达到峰值($5.827 \times 10^7 \text{ hm}^2$); 耕地缺口数量相对平稳, 其中饲料作物(玉米、大豆)耕地缺口较大并以玉米耕地为主(见表2)。

采用虚拟水概念来估算水资源缺口(根据粮食缺口和虚拟水系数的乘积而得)[5,8]。水资源缺口在2018年为 $2.73 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 2035年扩大到 $3.104 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 2045年达到 $3.247 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的峰值之后小幅降低。分作物看, 水资源缺口最大的是大豆, 从2018年的 $2.497 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 增加到2050年的 $2.774 \times 10^{11} \text{ m}^3$; 水资源缺口较大的其他作物有玉米、棉花; 水果、蔬菜等高值作物虚拟水处于净出口状态(见表3)。

四、全球化视角下我国未来农业资源进口潜力

(一) 农产品虚拟水和虚拟耕地进口量

根据CASM得到的各类作物净进口量、作物单产来估算虚拟耕地进口量, 利用不同作物虚拟水系数、净进口量来估算虚拟水进口量。由彭曼公式[9]估算的水稻、小麦、玉米、大豆的虚拟水含量分别为: $1.19 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $0.86 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $1.37 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $2.65 \text{ m}^3/\text{kg}$ [10]。大豆虚拟水含量最高, 大量进口大豆有利于粮食安全。

利用虚拟水、虚拟耕地来估算不同农产品的水土资源缺口, 进而获得水土资源总缺口。由图3可见, 大豆的水土资源缺口最大, 玉米次之且水土资源缺口呈小幅增加趋势, 分别在2048年、2045年达到峰值; 虚拟耕地缺口峰值为 $6.147 \times 10^7 \text{ hm}^2$ (2048年), 相当于我国2017年耕地面积的45.5%。由图4可见, 虚拟水进口量将逐步增加, 预计2045年净进口虚拟水达到峰值($3.247 \times 10^{11} \text{ m}^3$), 占2017年农业总

表2 耕地总缺口和主要粮食作物耕地缺口(单位: $\times 10^4$ 亩)

时间/年	耕地总缺口	水稻	小麦	玉米	大豆
2018	82 933	795	1196	1293	77 054
2020	83 256	865	1165	2512	75 561
2025	84 318	934	1094	5461	72 823
2030	82 509	891	804	6002	70 727
2035	80 601	922	658	6385	68 573
2040	84 091	641	599	8665	69 951
2045	86 543	274	428	10 304	71 148
2050	87 422	-315	33	11 052	72 144

注: 1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$ 。

用水量($3.791 \times 10^{11} \text{ m}^3$)的85.65%。

虚拟水进口量指按照粮食总缺口估算的全部需水量, 又可分为蓝水、绿水: 前者指河流、湖泊、地下蓄水层中的水, 后者指植物根部的土壤所存储的雨水。蓝水概念可更准确地表征进口虚拟水资源, 一般占总降水量的35%。按照蓝水计算, 我国2045年虚拟水进口量约为 $1.136 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 占2017年农业总用水量的29.97%。

(二) 农产品虚拟水土资源进口来源与潜力分析

1. 进口来源地分析

世界粮食出口国家相对集中, 2016年玉米、稻谷、小麦、大豆出口量前15位国家的占比之和分别为96%、94%、90%、99%。目前, 美国、阿根廷、俄罗斯、法国、加拿大、乌克兰是主要的谷物出口国。根据联合国粮食及农业组织(FAO)贸易数据库, 玉米的主要出口国有美国、阿根廷、巴西、乌克兰、法国、俄罗斯, 大米的主要出口国有泰国、印度、越南、巴基斯坦、美国、乌拉圭, 小麦的主要出口国有俄罗斯、美国、加拿大、法国、澳大利

表3 主要作物品种的水资源缺口预测

(单位: $\times 10^8 \text{ m}^3$)

时间/年	水稻	小麦	玉米	大豆	甘蔗	棉花	水果	蔬菜	总缺口
2018	50	51	44	2497	30	109	-33	-18	2730
2020	54	51	88	2512	36	133	-35	-18	2821
2025	59	48	204	2555	53	165	-44	-37	3003
2030	56	35	238	2601	53	173	-53	-46	3058
2035	58	29	256	2637	52	177	-55	-51	3104
2040	40	26	347	2690	58	182	-80	-63	3201
2045	17	19	413	2736	63	185	-110	-76	3247
2050	-20	1	443	2774	68	187	-148	-92	3214

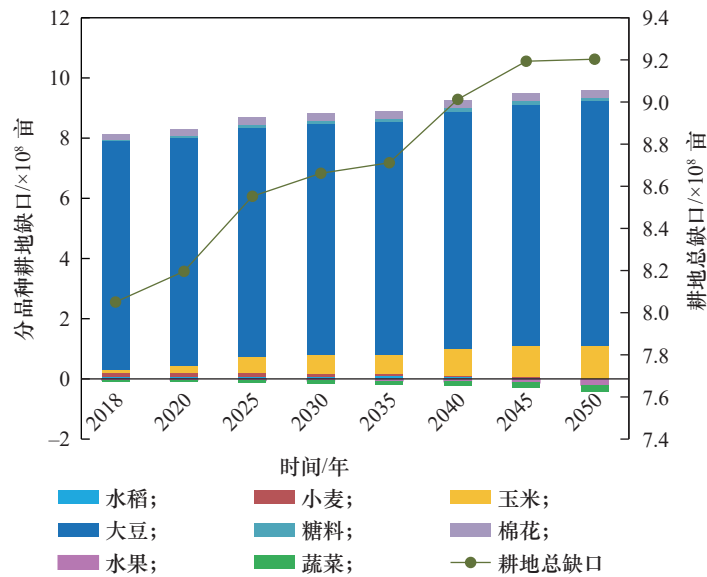


图3 不同作物和总虚拟耕地进口量
注：依据 CASM 模拟净进口和虚拟耕地系数估算相应数据。

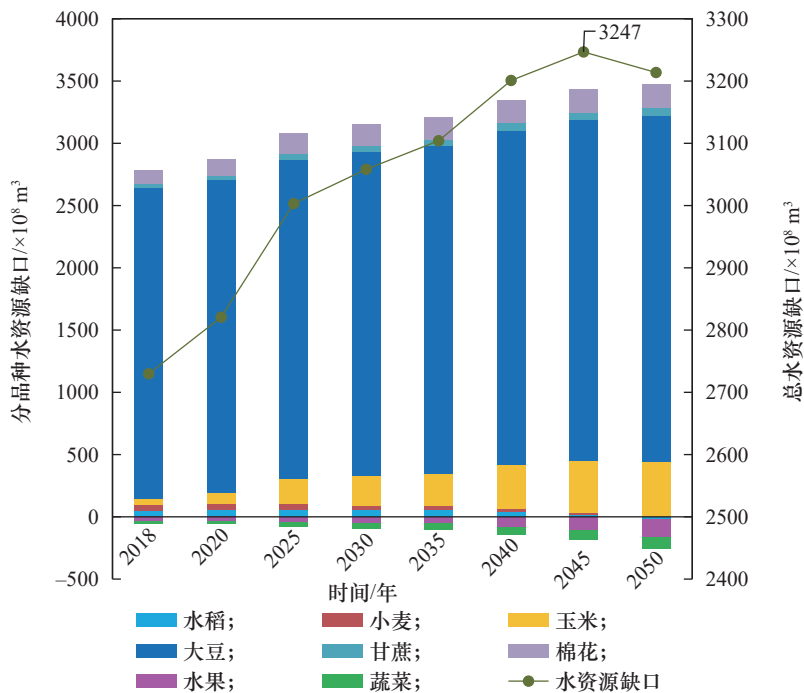


图4 不同作物和总虚拟水进口
注：依据 CASM 模拟净进口和虚拟水系数估算相应数据。

亚、乌克兰，大豆的主要出口国有巴西、美国、阿根廷、巴拉圭、加拿大、乌拉圭。因此，我国粮食可能的进口来源地主要有美国、印度、巴西、阿根廷、加拿大、俄罗斯、乌克兰、孟加拉、澳大利亚等，畜产品可能的进口来源地主要有德国、法国、波兰、

荷兰、巴西、德国、加拿大、阿根廷、美国、新西兰等。

2. 国际进口潜力分布

从国际粮食贸易、国际地缘政治、未来耕地开发潜力的角度看，我国粮食的国际进口潜力主要来

自两类国际粮食出口国。一类是以国际粮食出口为主的欧美现代粮食主产国（如美国、加拿大、澳大利亚、德国、法国、英国等），这些国家的粮食生产具有较高的机械化和商品化程度，农业生产效率高，是通过国际贸易方式开展粮食进口的可行合作对象。二类是耕地面积增加潜力较大的南美洲、非洲国家（如巴西、阿根廷、莫桑比克、坦桑尼亚、尼日利亚、埃塞俄比亚等），尽管目前的农业生产效率偏低，可通过“一带一路”农业合作来加强与我国农业的科技交流，快速提高农业全要素生产率和单产水平，是建立粮食收储和生产基地并用于我国粮食进口与储备的可行合作对象。

“一带一路”沿线具有粮食出口潜力的国家，其未来耕地开发潜力值得重点关注。利用联合国粮食及农业组织的土地利用数据库，同时计及 2035 年、2050 年人口与粮食消费的变化，估算未来可开发潜在耕地面积最大的国家是巴西（约 $1.7 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ），其次是俄罗斯（ $7.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ）。分区域看，拥有潜在耕地较多的国家多数在非洲，其次是南美洲（见表 4）。

结合未来主要粮食作物的单产条件，估算出世界未来玉米生产潜力约为 $1.2 \times 10^9 \text{ t}$ ，大豆约为 $1 \times 10^9 \text{ t}$ 、水稻约为 $9 \times 10^7 \text{ t}$ 、小麦约为 $1 \times 10^8 \text{ t}$ 。由此可见，国际粮食出口潜力相对充足，我国可以采取对外农业科技合作来促进一些意向国家的粮食单产提升，建立海外粮食生产与收储基地来保障粮食安全。

五、结论与展望

农业资源是粮食安全的重要支撑。面向 2050 年，我国农业经济发展格局、居民消费结构将完成转型升级，粮食生产也转入以高产、高质、高效、绿色为核心的高质量发展阶段；人口总量、人口结构将发生显著变化，城镇化率逐步增加，城乡差距显著缩小。居民收入的增加将推动膳食结构升级，肉类消费的增长将引起饲料粮需求的快速增加，我国粮食总需求预计在 2035—2040 年达到峰值，这对国内农业资源构成较大压力。随着农业高质量发展，碳中和、碳达峰目标约束，绿色生产与休耕轮作政策等的推进实施，农业生产在生态修复、生物多样性保护、休闲旅游、文化遗产等方面的多功能性进

表 4 我国耕地进口潜力的国际分布情况（单位： $\times 10^4 \text{ hm}^2$ ）

区域	国家	2017 年 潜在耕地 面积	2035 年 可出口潜 在耕地	2050 年 可出口潜 在耕地	
南美洲	巴西	17 214.8	17 048.85	17 029.09	
	阿根廷	5 735.1	5 678.79	5 648.13	
	委内瑞拉	4 089.4	4 037.0	4 013.15	
	巴拉圭	1 366.9	1 355.53	1 350.35	
	乌拉圭	1 223.8	1 222.37	1 222.17	
	东欧与 中亚	乌克兰	1 346.7	1 382.76	1 408.66
		俄罗斯	7 661.8	7 711.08	7 751.16
		哈萨克斯坦	664.0	641.12	626.26
		罗马尼亚	491.0	505.21	517.05
保加利亚		348.4	356.13	361.58	
东南亚	匈牙利	251.2	257.18	262.65	
	塔吉克斯坦	103.0	77.15	58.56	
	缅甸	883.3	824.46	811.96	
	泰国	794.9	793.55	823.99	
	柬埔寨	346.9	315.91	299.17	
	老挝	318.3	305.31	300.01	
非洲	越南	275.0	162.94	123.50	
	莫桑比克	4 823.8	4 669.03	4 521.37	
	坦桑尼亚	3 985.5	3 664.24	3 344.46	
	尼日利亚	2 146.1	1 259.13	402.04	
	埃塞俄比亚	2 028.0	1 627.35	1 346.16	
肯尼亚	1 176.1	972.88	812.87		
南非	922.3	837.61	795.02		

一步显现，粮食单产提高将不再是农业生产唯一的目标。

综合来看，统筹利用国际国内两种资源、两个市场，针对国内总要素生产率、资源环境效率较低的作物品种（如大豆、玉米、杂粮作物），适当加大进口量，充分利用国际水土资源，增加虚拟水和虚拟耕地进口，更好弥补我国粮食生产缺口。研究表明，我国虚拟耕地进口将在 2048 年前后达到峰值（ $6.147 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ）；虚拟水进口量在 2045 年前后达到峰值（ $3.247 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ），占 2017 年农业总用水量的 85.65%；以蓝水估算，虚拟水进口量为 $1.136 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占 2017 年农业总用水量的 30%。

根据 2050 年我国农业资源、粮食供需平衡情况，展望未来我国农业水土资源利用目标。①农业用水目标。2035 年，农业用水控制在 $3.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 左右；北方灌区高效节水灌溉面积占比达到 85%，

农田灌溉水有效利用系数达到 0.7；微咸水、再生水、雨水等非常规用水在农业用水中占比达到 10%，超采区域地下水水位持续下降的态势基本得到遏制；水生生物资源有效恢复。2050 年，农业用水控制在 $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 左右；北方灌区高效节水灌溉面积占比达到 90%，农田灌溉水有效利用系数达到 0.75，微咸水、再生水、雨水等非常规用水在农业用水中占比达到 20%。②耕地保护目标。2035 年，耕地红线保持在 $1.243 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，粮食播种面积不低于 $1.033 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ；全国耕地地力平均提高 0.5 个等级，高标准农田耕地地力平均提高 1 个等级，耕地土壤有机质含量平均提高 0.5%，耕作层厚度平均达到 25 cm；积极利用并充分开发盐碱地资源，盐碱荒地开发利用率达 20%；全面推行休耕轮作等新型耕作制度，基本形成资源利用高效、质量稳定、环境安全的耕地可持续利用格局。2050 年，耕地面积不低于 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ，粮食播种面积不低于 $1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ；全面形成农业资源休养生息和地力提升的长效机制。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 20, 2021; **Revised date:** December 22, 2021

Corresponding author: Tang Huajun is a research fellow from the Chinese Academy of Agricultural Sciences and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is rational utilization of agricultural land resources based on remote sensing technology, spatial distribution and structural change law of crop planting area. E-mail: tanghuajun@caas.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Agricultural Development Strategy 2050” (2018-ZD-07); National Natural Science Foundation of China (41271527); Science and Technology Innovation Project, Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-2016-AII)

参考文献

[1] Dalin C, Hanasaki N, Qiu H G, et al. Water resources transfers

- through Chinese interprovincial and foreign food trade [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(27): 9774–9779.
- [2] 杜鹰. 中国的粮食安全战略(下) [J]. *农村工作通讯*, 2020 (22): 17–21.
- Du Y. China’s food security strategy (Part 2) [J]. *Rural Work Newsletter*, 2020 (22): 17–21.
- [3] 陈锡文. 高度重视我国食物供给风险问题 [N]. *农民日报*, 2021-10-30(02).
- Chen X W. Pay attention to the issue of food supply risks in China [N]. *Farmers’ Daily*, 2021-10-30(02).
- [4] 程国强. 推进粮食产业高质量发展的思考 [J]. *中国粮食经济*, 2019 (9): 54–59.
- Cheng G Q. Thoughts on promoting high-quality development of grain industry [J]. *China Grain Economy*, 2019 (9): 54–59.
- [5] Dalin C, Qiu H G, Hanasaki N, et al. Balancing water resource conservation and food security in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(15): 4588–4593.
- [6] 联合国教科文组织. 联合国世界水发展报告 [M]. 中国水资源战略研究会(全球水伙伴中国委员会)译. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- UNESCO. United Nations world water development report [M]. Translated by China Water Resources Strategy Research Association (Global Water Partnership China Committee). Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [7] Burek P, Langan S, Cosgrove W, et al. The water futures and solutions initiative of IIASA [C]. Isfahan: The 7th International Conference on Integrated Disaster Risk Management Disasters and Development, 2016.
- [8] Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics, United Nations. World population prospects 2019 [EB/OL]. (2019-12-31)[2021-11-15]. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>.
- [9] Cai J B, Liu Y, Lei T W, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(1–2): 22–35.
- [10] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水–耕地资源区域时空差异演变 [J]. *资源科学*, 2009, 31(1): 84–93.
- Sun C Z, Zhang L. Changes in spatial and temporal differences of agricultural product virtual water versus cultivated land in China [J]. *Resources Science*, 2009, 31(1): 84–93.