

# 联合国可持续发展目标下的非洲粮食生产演变趋势与发展潜力分析

孙致陆 李先德\*

(中国农业科学院 农业经济与发展研究所,北京 100081)

**摘要** 为探究非洲到2030年实现可持续发展目标(SDGs)的粮食发展基础,利用FAOSTAT数据,以小麦、稻谷和玉米为例,分析1961—2017年非洲粮食生产演变趋势,并以2017年作为参照期,利用全球农业生态区域(GAEZ)方法对非洲粮食发展潜力进行了估算。结果表明:1)非洲粮食收获面积和产量及其占世界比重总体上均以增为主,粮食单产显著提升,但目前大多数非洲国家的粮食单产仍明显低于世界和中国。2)以2017年为参照期,非洲粮食发展潜力为26 857.81万~27 579.44万t,发展潜力幅度为181.64%~186.52%。非洲小麦发展潜力为2 112.74万~2 415.65万t,发展潜力幅度为77.81%~88.96%;稻谷发展潜力为2 763.77万~2 817.96万t,发展潜力幅度为75.59%~77.08%;玉米发展潜力为21 768.07万~22 345.83万t,发展潜力幅度为258.67%~265.54%。因此,非洲粮食发展潜力巨大,这为改善区域内粮食安全状况和到2030年实现SDGs提供了非常坚实的基础。

**关键词** 可持续发展目标;千年发展目标;粮食生产;发展潜力;全球农业生态区域

**中图分类号** F316.11

**文章编号** 1007-4333(2020)02-0160-11

**文献标志码** A

## Evolution characteristics and development potential of grain production in Africa under the sustainable development goals of UN

SUN Zhilu, LI Xiande\*

(Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** To explore the grain development foundation of the Sustainable Development Goals (SDGs) in Africa by 2030, using the data from FAOSTAT and taking wheat, paddy rice and maize as example, the evolution tendency of grain production in Africa from 1961 to 2017 is analyzed. Taking 2017 as the reference period, the grain development potential in Africa is estimated by using the Global Agro-Ecological Zone (GAEZ) method. The results show that: 1) Both the harvested area and grain production in Africa and their proportion of the world have mainly kept increasing. However, most African countries' grain yield is still significantly lower than that of the world and China. 2) Taking 2017 as the reference period, the grain development potential in Africa is between  $26\,857.81 \times 10^4$  and  $27\,579.44 \times 10^4$  t, and the growth range of which is between 181.64% and 186.52%. The wheat development potential in Africa is between  $2\,112.74 \times 10^4$  and  $2\,415.65 \times 10^4$  t, and the growth range of which is between 77.81% and 88.96%. The paddy rice development potential in Africa is between  $2\,763.77 \times 10^4$  and  $2\,817.96 \times 10^4$  t, and the growth range of which is between 75.59% and 77.08%. The maize development potential in Africa is between  $21\,768.07 \times 10^4$  and  $22\,345.83 \times 10^4$  t, and the growth range of which is between 258.67% and 265.54%. Therefore, the grain development potential in Africa is enormous, which will provide a very solid foundation to improve food security situation and achieve the SDGs by 2030 in Africa.

**Keywords** Sustainable Development Goals; Millennium Development Goals; grain production; development potential; Global Agro-ecological Zone

收稿日期:2019-02-13

基金项目:国家自然科学基金青年项目(71703157);中国农业科学院科技创新工程专项(ASTIP-IAED-2019-06)

第一作者:孙致陆,副研究员,主要从事农产品市场与贸易研究,Email:sunzhilu@caas.cn

通讯作者:李先德,研究员,主要从事农业经济理论与政策研究,Email:gjmy6160@caas.cn

为了消除饥饿和改善粮食不安全状况,在2000年联合国大会上189个国家的政府代表承诺要帮助人们摆脱多种困境,承认人人都有享有尊严、自由、平等和基本生活水平的权利,特别是免于饥饿的权利;该承诺使得8项千年发展目标(MDGs)于2001年得以确立,其中首项MDG,即MDG1,包括到2015年将全球贫困人口减半、使所有人都享有充分的生产就业与体面工作和使饥饿人口比例减半<sup>[1]</sup>。为了持续监测和分析MDGs的进展情况,联合国粮农组织(FAO)等国际机构以1990—1992年3年期作为起始点,监测全球和国家层面进展,监测期为1990—2015年间的26年<sup>[2]</sup>。对于MDG1c中的“使饥饿人口比例减半”,到2015年MDGs监测期截止点,从全球看,已基本实现;从区域看,拉丁美洲、东亚及东南亚等均已实现,而非洲作为整体未能实现,粮食不足人口数在2014—2016年仍高达2.22亿,粮食不足发生率也高达20.0%,特别是在东非、中部非洲等撒哈拉以南非洲;从国家看,受监测的129个国家中,72个已实现,其它未实现的国家基本都是非洲国家<sup>[3]</sup>。可见,全球粮食安全形势虽然总体上已有显著改善,但在今后较长时期内仍面临巨大挑战,特别是在非洲<sup>[4]</sup>。

2015年9月25日,联合国193个成员国共同通过了《2030年可持续发展议程》(the 2030 Agenda for Sustainable Development),承诺国际社会将在2016—2030年间消除贫困和饥饿,同时恢复并可持续地管理自然资源,实现在社会、经济和环境3个维度的可持续发展,共包括17项可持续发展目标(SDGs)和169项具体目标;2016年3月,联合国统计委员会又确定了1个作为“具有实际意义起点”且包含230个指标的SDGs全球指标框架,以监测SDGs并跟踪进展情况<sup>[5]</sup>。与MDGs相比,SDGs更加重视粮食安全与营养,涵盖8个具体方面:5个关于发展成果和3个关于实施方法;其中,发展成果涉及饥饿、营养不良、小农农业生产率与收入、农业做法可持续性和作物与畜牧遗传资源保护,基本涵盖了粮食安全与营养的全部4个维度(可供性、获取、利用和稳定性)<sup>[6]</sup>。SDGs是在国家层面制定相关政策的主要参考,各国可依据自身的工作重点、需求、发展阶段、能力、资源、战略、伙伴关系和实施方式审议17项SDGs,然后确定如何将它们转换成可行的发展计划并产生切实的变化<sup>[7-8]</sup>。

非洲自2000年以来一直是世界粮食不足发生

率最高的区域,虽然2000—2013年曾连续下降,但2014—2017年转而持续增长,2017年为20.4%且粮食不足人口数为2.57亿,其中东非和中部非洲的情况尤为严峻,粮食不足发生率分别高达31.4%和26.1%;2017年非洲的重度粮食不安全发生率为29.8%,比2014年增加了7.5个百分点<sup>[9]</sup>。严峻的粮食安全形势,给非洲到2030年实现SDGs带来了巨大挑战。考虑气候变化因素,为了满足日益增长的粮食消费需求,预计2030和2050年非洲粮食产量至少应比2010年分别增加55%和111%<sup>[10]</sup>。扩大种植面积和提高单产是提升粮食产量的2个主要途径<sup>[11]</sup>。近年来,不同于亚洲粮食增产主要由集约化驱动和南美洲粮食增产主要得益于机械化带来的劳动生产率大幅提升,非洲粮食增产主要依靠耕地面积的扩大和集约化的种植系统,而不是生产率大幅提升引起的单产提高<sup>[12-13]</sup>。但在土地资源总量受约束的情况下,通过扩大面积驱动粮食增产,可能要以牺牲生态环境为代价<sup>[11]</sup>,且农村人口增加和相关土地用途管制压力导致的连续种植还容易引起土壤退化,不利于耕地可持续利用<sup>[14]</sup>。

自20世纪60年代前后非洲各国独立以来,中国政府与非洲各国政府在经贸等领域开展了广泛、持续、深入的合作,并向其提供了大量无偿援助<sup>[15]</sup>;其中农业一直是中非合作的重点领域和重要利益交汇点<sup>[16]</sup>,1959年中国向几内亚无偿提供粮食援助标志着中非农业合作的开始<sup>[17]</sup>。经过60年的发展,中国政府与非洲各国政府务实开展了农业科技、人才、贸易、投资、政策等全方位交流合作,在有效推进非洲农业现代化、提升粮食安全水平、丰富农产品市场供给的同时,进一步拓展了中非农业发展空间,实现了互利互惠、合作共赢<sup>[18]</sup>。近年来,在中非合作论坛、南南合作、“一带一路”等框架下,中非农业合作亟待进一步深化和拓展。在2018年9月召开的中非合作论坛北京峰会上,国家主席习近平明确提出要用好共建“一带一路”带来的重大机遇,携手打造合作共赢的中非命运共同体,把“一带一路”建设同落实《联合国2030年可持续发展议程》、非洲联盟《2063年议程》和非洲各国发展战略相互对接,开拓新的合作空间,发掘新的合作潜力,在传统优势领域深耕厚植,在新经济领域加快培育亮点<sup>[19]</sup>。鉴于非洲粮食安全形势仍然非常严峻,中国政府可将保障非洲粮食安全作为今后中非农业合作的重点<sup>[20]</sup>。

目前,谷物等粮食仍是非洲人口的主要能量来源<sup>[11]</sup>,因此,发展粮食生产对于非洲改善粮食安全状况和到2030年实现SDGs就显得尤为重要。那么,非洲粮食生产经历了何种演变过程?面对区域内快速的人口增长、城镇化、农业结构转型以及外资对非洲农业投资的持续增长等多重机遇,非洲粮食产量今后是否还能增长?增长空间又有多大?定量研究非洲粮食生产的演变趋势与发展潜力,能够有效回答这些问题,并可据此对非洲到2030年实现SDGs的前景进行判断;通过分析非洲粮食发展潜力的国别分布情况,还有助于识别哪些非洲国家的粮食产量提升潜力更大,从而为进一步推动和深化中非农业合作特别是粮食安全合作,提供有力的科学支撑和依据。目前,国内外相关研究还较为鲜见。因此,本研究以小麦、稻谷和玉米3种主要粮食为例,首先根据联合国粮农组织统计数据库(FAOSTAT)数据从收获面积、产量和单产3个方面分析1961—2017年非洲粮食生产演变趋势,然后以2017年作为参照期,利用全球农业生态区域(Global Agro-Ecological Zone, GAEZ)方法估算非洲粮食发展潜力。

## 1 研究方法 with 数据说明

### 1.1 研究方法

作物生产潜力描述了特定农业气候、土壤和地形条件及农业投入和管理水平下,作物所能达到的产量上限,它是影响粮食安全的最重要因素之一,发展潜力是生产潜力高于实际产量的部分<sup>[21]</sup>。目前,国内外已有作物生产潜力测算方法分为四类<sup>[22]</sup>;第一类是模型模拟法,通过选择合适的作物生育模型,结合气象观测数据和栽培管理措施,模拟生育期内作物光合作用等生理过程并估算作物生产潜力<sup>[23-24]</sup>;其中的作物生育模型包括3种<sup>[25]</sup>:机制法模型(根据作物的截光特征和光合作用以及作物能量转化与生长过程,通过光照限制、温度限制和水分限制的逐步“衰减”来估算作物生产潜力,如Wagenigen模型、GAEZ方法等)、作物模型(根据气候因素,基于对与作物生长相关的参数的设定,模拟作物生育过程并估算其生产潜力,如SUCROS模型、CERES模型等)和经验公式模型(根据对作物产量、气象观测数据等的统计分析,归纳作物生产潜力及其影响因素并据此估算作物生产潜力,如Gessner-Lieth模型、Miani模型等)。另外三类作物

生产潜力测算方法是:田间试验产量法<sup>[23]</sup>、高产纪录法<sup>[26]</sup>和高产农户法<sup>[27]</sup>。

比较来看,模型模拟法较为全面地考虑了作物生育过程及与栽培管理措施间的交互作用,但受到品种等因素的影响,不同情景下的模拟结果存在一定差异;田间试验产量法在土壤、气候等方面的不同导致作物产量也存在较大差异;高产纪录法依赖于对特定田块的选择,代表性明显不足;高产农户法受到投入、技术等方面限制,其产量常低于模型模拟产量和高产纪录产量<sup>[22]</sup>。从作物学角度看,模型模拟法中的GAEZ方法综合考虑了影响作物生育的光照、降水等主要气候因素,根据作物的生物量生产率等方面的长期试验数据,利用一系列作物学模型,对标准作物生物量依次进行温度订正、叶面积订正、净生物量订正和收获指数订正,最后得到受气候等因素支配且已适宜种植的作物的最高产量<sup>[25]</sup>。因此,本研究采用模型模拟法中的GAEZ方法来估算非洲粮食发展潜力。为了分析作物的适宜性并估算其生产潜力,FAO和国际应用系统分析研究所(IIASA)从2000年开始合作开发GAEZ软件,目前可用最新版本为GAEZ v3.0。

### 1.2 数据说明

GAEZ软件涵盖的基础数据主要包括以下4个方面<sup>[21]</sup>:①土地和水资源数据(包括土壤资源、地形资源、土地覆盖情况、土地受保护状况和相关社会经济及人口数据);②农业气候资源数据(包括7种观测气候指标:平均气温、昼夜温差、日照百分率、10米高度风速、相对湿度、雨天天数和降水量);③适宜性和作物潜在单产数据(具体是基于过去、现在和将来气候条件以及3类投入水平下的280种作物/土地利用类型;作物类型包括11个作物大类、49种作物和92个作物类别);④作物的实际单产和产量数据。考虑到各种粮食在非洲种植分布的广泛性及其在人们日常生活中的重要程度并适当简化分析,本研究将粮食界定为小麦、稻谷和玉米。非洲、世界和中国的粮食收获面积、产量和单产数据均来源于FAOSTAT(<http://www.fao.org/faostat>)。

## 2 非洲粮食生产演变趋势

### 2.1 粮食收获面积

根据图1可知,非洲小麦收获面积稳中有增,从1961年的738.56万 $\text{hm}^2$ 扩大到2017年的1042.66万 $\text{hm}^2$ ,共增加了304.09万 $\text{hm}^2$ ,平均每

年增加 5.43 万  $\text{hm}^2$ ；小麦在 1961—2007 年和 2009 年是非洲收获面积第二大粮食作物，2008 年和 2010—2017 年是收获面积第三大粮食作物；非洲小麦收获面积占世界小麦收获面积比重从 1961 年的 3.62% 提高到 2017 年的 4.77%，增加了 1.15 个百分点。从非洲各个国家和地区小麦收获面积看，早期年份，阿尔及利亚多为最大，南非和摩洛哥也较

大，3 国均高于 100 万  $\text{hm}^2$ ，埃塞俄比亚、突尼斯、埃及等也位处前列；此后均波动变化，摩洛哥、埃塞俄比亚、埃及等以增为主，阿尔及利亚等较为稳定，南非等则明显下降；2017 年，摩洛哥、阿尔及利亚、埃塞俄比亚、埃及和突尼斯的小麦收获面积位处前 5 位，分别占非洲小麦收获面积的 32.46%、20.32%、16.47%、12.88% 和 5.62%。

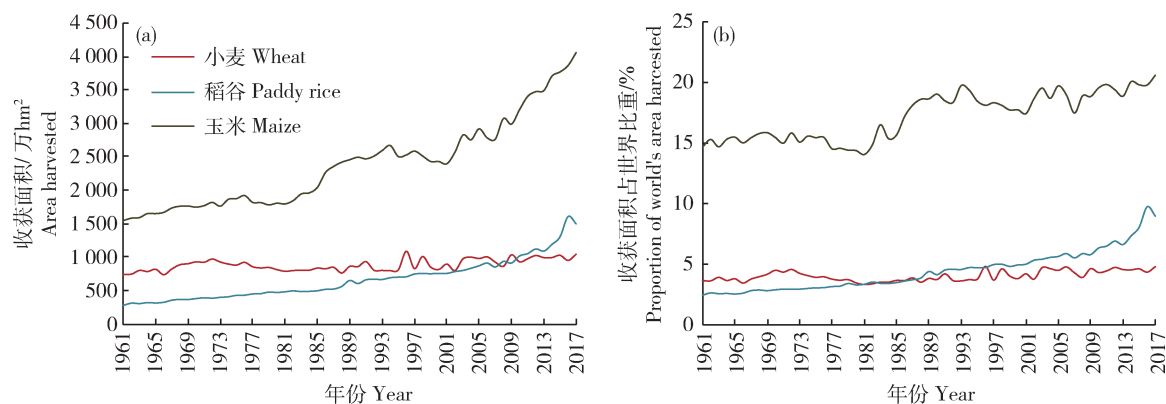


图1 1961—2017年非洲粮食收获面积(a)及其占世界粮食收获面积比重(b)

Fig. 1 Harvested area of grain in Africa (a) and their proportion of that of world (b) from 1961 to 2017

非洲稻谷收获面积持续较快增长，从 1961 年的 277.69 万  $\text{hm}^2$  扩大到 2017 年的 1 495.97 万  $\text{hm}^2$ ，共增加了 1 218.28 万  $\text{hm}^2$ ，平均每年增加 21.75 万  $\text{hm}^2$ ；稻谷在 1961—2007 年和 2009 年是非洲收获面积第 3 大粮食作物，2008 年和 2010—2017 年则是收获面积第 2 大粮食作物；非洲稻谷收获面积占世界稻谷收获面积比重从 1961 年的 2.41% 提高到 2017 年的 8.94%，增加了 6.54 个百分点。从非洲各个国家和地区玉米收获面积看，早期年份，马达加斯加一直最大，塞拉利昂、埃及、科特迪瓦、尼日利亚、刚果等也较大且多高于 20 万  $\text{hm}^2$ ；此后均以增为主；2017 年，尼日利亚、几内亚、民主刚果、坦桑尼亚和科特迪瓦的稻谷收获面积位处前 5 位，分别占非洲稻谷收获面积的 32.84%、11.41%、8.06%、7.82% 和 5.54%。

非洲玉米收获面积以增为主，从 1961 年的 1 546.11 万  $\text{hm}^2$  扩大到 2017 年的 4 060.20 万  $\text{hm}^2$ ，共增加了 2 514.09 万  $\text{hm}^2$ ，平均每年增加 44.89 万  $\text{hm}^2$ ；玉米一直是非洲收获面积最大的粮食作物；非洲玉米收获面积占世界玉米收获面积比重从 1961 年的 14.65% 提高到 2017 年的 20.59%，增加了 5.94 个百分点。从非洲各个国家和地区玉米收获面积看，早期年份，南非一直最大且高于 400

万  $\text{hm}^2$ ，明显高于其他国家和地区，尼日利亚、马拉维、津巴布韦、肯尼亚和坦桑尼亚也较大且多高于 100 万  $\text{hm}^2$ ；此后多有所扩大，而南非则明显下降；2017 年，尼日利亚、坦桑尼亚、南非、民主刚果和安哥拉的玉米收获面积位处前 5 位，分别占非洲玉米收获面积的 16.11%、10.08%、6.47%、6.40% 和 6.24%。

## 2.2 粮食产量

根据图 2 可知，非洲小麦产量平稳增长，从 1961 年的 511.81 万 t 提高到 2017 年的 2 715.35 万 t，共增加了 2 203.54 万 t，平均每年增加 39.35 万 t；小麦在 1961—2006 年是非洲产量第 2 高粮食作物，2007—2017 年是产量第 3 高粮食作物；非洲小麦产量占世界小麦产量比重从 1961 年的 2.30% 提高到 2017 年的 3.52%，增加了 1.22 个百分点。从非洲各个国家和地区小麦产量看，早期年份，埃及、摩洛哥和南非多位处前 3 位，阿尔及利亚、突尼斯、埃塞俄比亚、肯尼亚、津巴布韦等也较高；变化趋势以增为主；2017 年，埃及、摩洛哥、埃塞俄比亚、阿尔及利亚和南非的小麦产量处前 5 位，分别占非洲小麦产量的 32.41%、26.11%、17.79%、8.97% 和 5.65%。

非洲稻谷产量不断增长，从 1961 年的 430.98 万 t 提高到 2017 年的 3 656.03 万 t，共增加了

3 225.05 万 t, 平均每年增加 57.59 万 t; 非洲稻谷在 1961—1996 年是产量第 3 高粮食作物, 1997—2017 年是产量第 2 高粮食作物; 非洲稻谷产量占世界稻谷产量比重从 1961 年的 2.00% 提高到 2017 年的 4.75%, 增加了 2.75 个百分点。从非洲各个国家和地区稻谷产量看, 早期年份, 马达加斯加曾最

高, 但此后埃及最高, 塞拉利昂、几内亚、尼日利亚、马里、科特迪瓦、利比里亚、刚果和坦桑尼亚也较高; 变化趋势以增为主; 2017 年, 尼日利亚、埃及、马达加斯加、坦桑尼亚和马里的稻谷产量位处前 5 位, 分别占非洲稻谷产量的 26.98%、17.45%、8.48%、7.86% 和 7.61%。

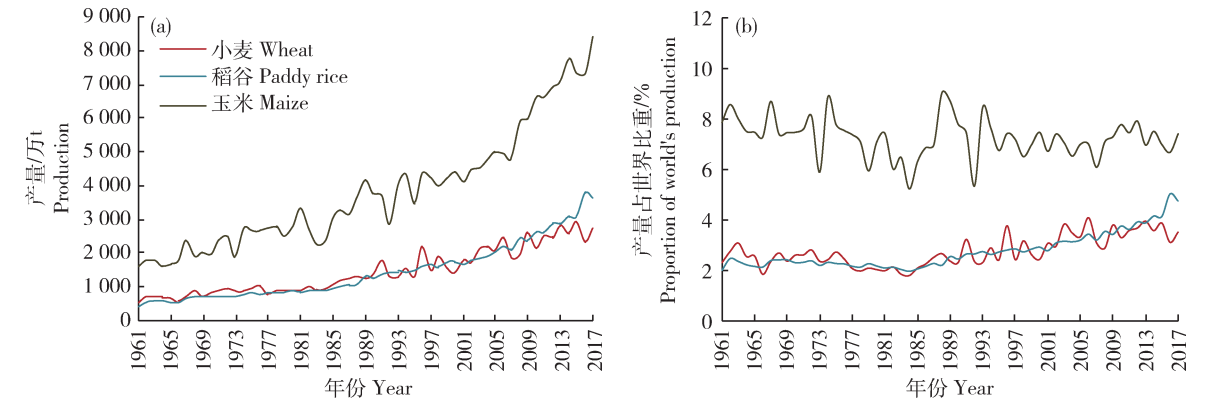


图 2 1961—2017 年非洲粮食产量(a)及其占世界粮食产量比重(b)

Fig. 2 Production of grain in Africa (a) and their proportion of that of world (b) from 1961 to 2017

非洲玉米产量大幅提高, 从 1961 年的 1 614.71 万 t 提高到 2017 年的 8 415.26 万 t, 共增加了 6 800.54 万 t, 平均每年增加 121.44 万 t; 玉米一直是非洲产量最高的粮食作物; 非洲玉米产量占世界玉米产量比重在早期年份多高于 7.5%, 近年来保持在 7% 左右, 2017 年为 7.42%, 比 1961 年减少了 0.46 个百分点。从非洲各个国家和地区玉米产量看, 早期年份, 南非一直最高, 埃及、尼日利亚、津巴布韦、肯尼亚、坦桑尼亚、马拉维、赞比亚和埃塞俄比亚也较高; 变化趋势以增为主; 2017 年, 南非、尼日利亚、埃塞俄比亚、埃及和坦桑尼亚的玉米产量位处前 5 位, 分别占非洲玉米产量的 19.99%、12.38%、9.65%、8.44% 和 7.06%。

2.3 粮食单产

根据表 1 可知, 非洲小麦单产从 1961 年的

692.98 kg/hm<sup>2</sup> 提高到 2017 年的 2 604.27 kg/hm<sup>2</sup>, 增加量为 1 911.28 kg/hm<sup>2</sup>, 占世界小麦单产比重从 63.64% 提高至 73.75%, 增加了 10.11 个百分点; 2017 年, 在生产小麦的 31 个非洲国家和地区中, 分别有 27 和 28 个国家和地区的小麦单产低于世界和中国, 仅赞比亚、埃及、纳米比亚和马里高于世界。非洲稻谷单产从 1961 年的 1 552.03 kg/hm<sup>2</sup> 提高到 2017 年的 2 443.93 kg/hm<sup>2</sup>, 增加量为 891.89 kg/hm<sup>2</sup>, 占世界稻谷单产比重则从 83.03% 降低至 53.11%, 减少了 29.92 个百分点; 2017 年, 在生产稻谷的 43 个非洲国家和地区中, 分别有 38 和 41 个国家和地区的小麦单产低于世界和中国, 仅埃及、摩洛哥、毛里塔尼亚、法属留尼旺和尼日尔高于世界。非洲玉米单产从 1961 年的 1 044.38 kg/hm<sup>2</sup> 提高到 2017 年的 2 072.62 kg/hm<sup>2</sup>, 增加量

表 1 1961 和 2017 年非洲、世界和中国粮食单产

Table 1 Yield of grain in Africa, world and China in 1961 and 2017

| 粮食类型<br>Type of grain | 1961 年    |          |          | 2017 年    |          |          |
|-----------------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|                       | 非洲 Africa | 世界 World | 中国 China | 非洲 Africa | 世界 World | 中国 China |
| 小麦 Wheat              | 692.98    | 1088.87  | 559.07   | 2 604.27  | 3 531.20 | 5 480.97 |
| 稻谷 Paddy rice         | 1 552.03  | 1869.25  | 2 078.68 | 2 443.93  | 4 601.86 | 6 909.28 |
| 玉米 Maize              | 1044.38   | 1942.29  | 1 184.82 | 2 072.62  | 5 754.70 | 6 109.89 |

为 1 028. 25 kg/hm<sup>2</sup>，占世界玉米单产比重从 53. 77%降低至 36. 02%，减少了 17. 75 个百分点；2017 年，在生产玉米的 51 个非洲国家和地区中，分别有 47 和 47 个国家和地区的玉米单产低于世界和中国，仅法属留尼汪、埃及、毛里求斯、毛里塔尼亚和南非高于世界。可见，虽然非洲的粮食单产在 1961—2017 年大幅提高，但大多数非洲国家和地区的粮食单产目前仍明显低

于世界和中国。

### 3 非洲粮食发展潜力估算

#### 3.1 参数设定

本研究接下来利用 GAEZ v3. 0 软件并结合 FAOSTAT 数据估算非洲粮食发展潜力，分析过程中对 GAEZ v3. 0 软件中各个参数的设定情况如表 2 所示。

表 2 GAEZ v3.0 中各个参数的设定  
Table 2 Setting of parameters in GAEZ v3. 0

| 参数<br>Parameter                                       | 选项<br>Option                                                                                                                                                              | 设定<br>Setting                                                                                       |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 作物类型<br>Type of crop                                  | 分为 11 个作物大类、49 种作物和 92 个作物类别。                                                                                                                                             | 本研究选择“小麦”、“稻谷（水地稻谷）”和“玉米”。                                                                          |
| 水供给<br>Water supply                                   | 分为 5 类：雨养、灌溉、自流灌溉、滴灌和喷灌。                                                                                                                                                  | 本研究选择“雨养”和“灌溉”。                                                                                     |
| 投入水平<br>Input level                                   | 分为 3 类：低水平投入（对应于传统管理模式）、中等水平投入（对应于改进后管理模式）和高水平投入（对应于先进管理模式）。                                                                                                              | 本研究选择“高投入水平”。在该投入水平下，农作体系及管理均以市场为中心，管理目标是产品商业化；生产过程中普遍播种改良后高产品种，实现完全机械化且劳动密集度很低，使用最优的肥料以及病虫害化学控制技术。 |
| CO <sub>2</sub> 施肥效应<br>CO <sub>2</sub> fertilization | 是否存在 CO <sub>2</sub> 施肥效应。                                                                                                                                                | 本研究选择“存在”。在可见光照射下，作物可进行光合作用，利用叶绿素将 CO <sub>2</sub> 和水转化为有机物并存储能量，促进自身生长，实际上相当于对作物的生长发育进行了施肥。        |
| 时期<br>Time period                                     | 分为 3 类：历史、基准和未来。历史时期包括 1961—2000 年各年；基准时期是指 1961—1990 年的平均气候条件；未来时期包括根据不同大气循环模型分别模拟得到的 2020s（对应于 2011—2040 年）、2050s（对应于 2041—2070 年）和 2080s（对应于 2071—2100 年）3 个时期的平均气候条件。 | 本研究从未来的角度分析非洲粮食发展潜力，选择大气循环模型 GCM2 中的模拟方案 CCCma CGCM2 A2 进行分析，并分别选定 2020s、2050s 和 2080s。             |
| 地理区域<br>Geographic area                               | 世界绝大多数国家和地区。                                                                                                                                                              | 本研究选定非洲的全部国家和地区。                                                                                    |
| 土地覆盖类型<br>Land cover class                            | 分为 11 类：耕作用地、建筑用地、森林、草地与林地、荒地、内陆水体、雨养耕作用地、灌溉耕作用地、大面积森林、大面积草地和全部土地。                                                                                                        | 为了与对“水供给”所做设定相对应，本研究在“雨养”和“灌溉”两种水供给状态下分别选定“雨养耕作用地”和“灌溉耕作用地”进行分析。                                    |
| 土地保护类型<br>Land protection class                       | 分为 4 类：不受保护、非农用途保护、有限农业用途保护和全部土地。                                                                                                                                         | 由于“土地覆盖类型”已选定，本研究选择“全部土地”。                                                                          |
| 适宜性类型<br>Suitability class                            | 分为 5 类：非常适宜（VS）、适宜（S）、中度适宜（MS）、勉强适宜（mS）和不适宜（NS）。最后，输出 3 种组合形式的结果：“VS+S”、“VS+S+MS”和“VS+S+MS+mS”。                                                                           | 为了分析非洲全部适宜土地的粮食发展潜力，本研究根据输出结果“VS+S+MS+mS”进行分析。                                                      |

3.2 测算结果

本研究基于上述参数设定,首先利用 GAEZ v3.0 软件测算得到非洲各个国家和地区的小麦、稻谷、玉米分别在 2020s、2050s、2080s 的 3 组潜在单产数据;其次,结合 FAOSTAT 中 2017 年非洲各个国家和地区小麦、稻谷、玉米的实际单产数据,分别计算得到非洲各个国家和地区小麦、稻谷、玉米的单产差距,具体只计算同时有潜在单产数据和 2017 年实际单产数据且前者高于后者的国家和地区;再次,根据单产差距数据并结合 FAOSTAT 中 2017 年非洲各个国家和地区小麦、稻谷、玉米的收获面积数

据,分别计算得到非洲各个国家和地区小麦、稻谷、玉米的发展潜力;最后,汇总计算得到非洲各个国家和地区以及非洲整体的粮食发展潜力。

3.2.1 非洲主要国家粮食发展潜力

根据表 3 可知,以 2017 年为参照期,非洲小麦发展潜力位处前列的是摩洛哥、阿尔及利亚、埃塞俄比亚、突尼斯、利比亚、肯尼亚、坦桑尼亚等北部非洲和东部非洲国家。从非洲主要国家的小麦发展潜力看,摩洛哥为 774.61 万~999.58 万 t,阿尔及利亚为 697.02 万~728.38 万 t,埃塞俄比亚为 317.49 万~367.80 万 t,突尼斯为 159.47 万~171.50 万 t。

| 表 3 非洲主要国家小麦发展潜力(前 10 位)                                                      |                               |                 |                               |                |                               |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Table 3 Development potential of wheat in main African countries (the top 10) |                               |                 |                               |                |                               |
| 万 t                                                                           |                               |                 |                               |                |                               |
| 2020s                                                                         |                               | 2050s           |                               | 2080s          |                               |
| 国家<br>Country                                                                 | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country  | 发展潜力<br>Development potential |
| 摩洛哥 Morocco                                                                   | 999.58                        | 摩洛哥 Morocco     | 990.31                        | 摩洛哥 Morocco    | 774.61                        |
| 阿尔及利亚 Algeria                                                                 | 697.02                        | 阿尔及利亚 Algeria   | 728.38                        | 阿尔及利亚 Algeria  | 727.05                        |
| 埃塞俄比亚 Ethiopia                                                                | 350.36                        | 埃塞俄比亚 Ethiopia  | 367.80                        | 埃塞俄比亚 Ethiopia | 317.49                        |
| 突尼斯 Tunisia                                                                   | 159.47                        | 突尼斯 Tunisia     | 171.50                        | 突尼斯 Tunisia    | 170.49                        |
| 利比亚 Libya                                                                     | 72.45                         | 利比亚 Libya       | 69.32                         | 利比亚 Libya      | 62.14                         |
| 南非 South Africa                                                               | 33.69                         | 肯尼亚 Kenya       | 23.49                         | 肯尼亚 Kenya      | 22.93                         |
| 肯尼亚 Kenya                                                                     | 23.75                         | 坦桑尼亚 Tanzania   | 20.50                         | 坦桑尼亚 Tanzania  | 22.31                         |
| 坦桑尼亚 Tanzania                                                                 | 17.91                         | 尼日利亚 Nigeria    | 13.74                         | 乌干达 Uganda     | 4.02                          |
| 尼日利亚 Nigeria                                                                  | 12.66                         | 南非 South Africa | 12.38                         | 莱索托 Lesotho    | 2.97                          |
| 苏丹 Sudan                                                                      | 6.20                          | 乌干达 Uganda      | 3.67                          | 卢旺达 Rwanda     | 2.62                          |

根据表 4 可知,以 2017 年为参照期,非洲稻谷发展潜力位处前列的是尼日利亚、几内亚、民主刚果、坦桑尼亚、塞拉利昂、利比里亚、科特迪瓦、马达加斯加、喀麦隆、莫桑比克等西部非洲、中部非洲和东南部非洲国家。从非洲主要国家的稻谷发展潜力看,尼日利亚为 680.78 万~739.87 万 t,几内亚为 575.38 万~588.82 万 t,民主刚果为 477.45 万~502.19 万 t,坦桑尼亚为 206.58 万~219.83 万 t,塞拉利昂为 188.12 万~192.70 万 t。

根据表 5 可知,以 2017 年为参照期,非洲玉米发展潜力位处前列的是尼日利亚、坦桑尼亚、安哥拉、莫桑比克、肯尼亚、马拉维、民主刚果、津巴布韦、

赞比亚、贝宁等东部非洲、西部非洲和南部非洲国家。从非洲主要国家的玉米发展潜力看,尼日利亚为 3 603.70 万~3 775.63 万 t,坦桑尼亚为 2 906.19 万~3 030.09 万 t,安哥拉为 1 176.44 万~1 490.14 万 t,莫桑比克为 1 411.42 万~1 425.48 万 t,肯尼亚为 1 324.15 万~1 351.89 万 t,马拉维为 1 163.07 万~1 271.71 万 t。

根据表 6 可知,以 2017 年为参照期,非洲粮食发展潜力位处前列的是尼日利亚、坦桑尼亚、民主刚果、安哥拉、莫桑比克、肯尼亚、马拉维、埃塞俄比亚、摩洛哥等国家。从非洲主要国家粮食发展潜力看,尼日利亚为 4 343.56 万~4 498.30 万 t,坦桑尼亚

表 4 非洲主要国家稻谷发展潜力(前 10 位)

| 2020s              |                               | 2050s              |                               | 2080s              |                               |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 国家<br>Country      | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country      | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country      | 发展潜力<br>Development potential |
| 尼日利亚 Nigeria       | 680.78                        | 尼日利亚 Nigeria       | 708.93                        | 尼日利亚 Nigeria       | 739.87                        |
| 几内亚 Guinea         | 575.38                        | 几内亚 Guinea         | 588.82                        | 几内亚 Guinea         | 588.30                        |
| 民主刚果 Congo Dem.    | 502.19                        | 民主刚果 Congo Dem.    | 500.33                        | 民主刚果 Congo Dem.    | 477.45                        |
| 坦桑尼亚 Tanzania      | 219.83                        | 坦桑尼亚 Tanzania      | 213.57                        | 坦桑尼亚 Tanzania      | 206.58                        |
| 塞拉利昂 Sierra Leone  | 188.12                        | 塞拉利昂 Sierra Leone  | 191.12                        | 塞拉利昂 Sierra Leone  | 192.70                        |
| 利比里亚 Liberia       | 94.87                         | 利比里亚 Liberia       | 96.30                         | 利比里亚 Liberia       | 97.41                         |
| 科特迪瓦 Côte d'Ivoire | 93.14                         | 科特迪瓦 Côte d'Ivoire | 93.68                         | 科特迪瓦 Côte d'Ivoire | 97.19                         |
| 喀麦隆 Cameroon       | 77.78                         | 马达加斯加 Madagascar   | 93.59                         | 马达加斯加 Madagascar   | 91.50                         |
| 马达加斯加 Madagascar   | 72.55                         | 喀麦隆 Cameroon       | 80.26                         | 喀麦隆 Cameroon       | 84.95                         |
| 莫桑比克 Mozambique    | 39.80                         | 莫桑比克 Mozambique    | 44.07                         | 莫桑比克 Mozambique    | 41.25                         |

表 5 非洲主要国家玉米发展潜力(前 10 位)

| 2020s           |                               | 2050s           |                               | 2080s           |                               |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential |
| 尼日利亚 Nigeria    | 3 722.80                      | 尼日利亚 Nigeria    | 3 775.63                      | 尼日利亚 Nigeria    | 3 603.70                      |
| 坦桑尼亚 Tanzania   | 2 906.19                      | 坦桑尼亚 Tanzania   | 3 029.14                      | 坦桑尼亚 Tanzania   | 3 030.09                      |
| 安哥拉 Angola      | 1 490.14                      | 安哥拉 Angola      | 1 489.12                      | 莫桑比克 Mozambique | 1 425.47                      |
| 莫桑比克 Mozambique | 1 411.42                      | 莫桑比克 Mozambique | 1 425.48                      | 肯尼亚 Kenya       | 1 345.94                      |
| 肯尼亚 Kenya       | 1 324.15                      | 肯尼亚 Kenya       | 1 351.89                      | 民主刚果 Congo Dem. | 1 319.58                      |
| 马拉维 Malawi      | 1 163.07                      | 马拉维 Malawi      | 1 226.81                      | 马拉维 Malawi      | 1 271.71                      |
| 民主刚果 Congo Dem. | 1 010.73                      | 民主刚果 Congo Dem. | 1 112.23                      | 安哥拉 Angola      | 1 176.44                      |
| 津巴布韦 Zimbabwe   | 1 007.95                      | 津巴布韦 Zimbabwe   | 986.57                        | 赞比亚 Zambia      | 883.73                        |
| 赞比亚 Zambia      | 926.48                        | 赞比亚 Zambia      | 940.56                        | 津巴布韦 Zimbabwe   | 862.67                        |
| 贝宁 Benin        | 789.23                        | 贝宁 Benin        | 802.12                        | 贝宁 Benin        | 813.90                        |

为 3 143.93 万~3 263.21 万 t,民主刚果为 1 512.92 万~1 797.03 万 t,安哥拉为 1 193.84 万~1 508.44 万 t,莫桑比克为 1 452.35 万~1 471.16 万 t,肯尼亚为 1 352.13 万~1 378.77 万 t,马拉维为 1 174.34 万~1 283.51 万 t。

3.2.2 非洲粮食发展潜力

根据表 7 可知,从总体上看,以 2017 年为参照期,非洲的粮食发展潜力为 26 857.81 万~27 579.44 万 t,发展潜力幅度为 181.64%~186.52%,要明显高于到 2050 年时满足非洲粮食消费需求所要求的

表6 非洲主要国家粮食发展潜力(前10位)

Table 6 Development potential of grain in main African countries (the top 10)

万 t

| 2020s           |                               | 2050s           |                               | 2080s           |                               |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential | 国家<br>Country   | 发展潜力<br>Development potential |
| 尼日利亚 Nigeria    | 4 416.24                      | 尼日利亚 Nigeria    | 4 498.30                      | 尼日利亚 Nigeria    | 4 343.56                      |
| 坦桑尼亚 Tanzania   | 3 143.93                      | 坦桑尼亚 Tanzania   | 3 263.21                      | 坦桑尼亚 Tanzania   | 3 258.98                      |
| 民主刚果 Congo Dem. | 1 512.92                      | 民主刚果 Congo Dem. | 1 612.56                      | 民主刚果 Congo Dem. | 1 797.03                      |
| 安哥拉 Angola      | 1 503.18                      | 安哥拉 Angola      | 1 508.44                      | 莫桑比克 Mozambique | 1 467.74                      |
| 莫桑比克 Mozambique | 1 452.35                      | 莫桑比克 Mozambique | 1 471.16                      | 肯尼亚 Kenya       | 1 370.87                      |
| 肯尼亚 Kenya       | 1 352.13                      | 肯尼亚 Kenya       | 1 378.77                      | 马拉维 Malawi      | 1 283.51                      |
| 马拉维 Malawi      | 1 174.34                      | 马拉维 Malawi      | 1 239.97                      | 安哥拉 Angola      | 1 193.84                      |
| 摩洛哥 Morocco     | 1 063.83                      | 埃塞俄比亚 Ethiopia  | 1 074.49                      | 埃塞俄比亚 Ethiopia  | 1 017.45                      |
| 埃塞俄比亚 Ethiopia  | 1 051.93                      | 摩洛哥 Morocco     | 1 053.35                      | 几内亚 Guinea      | 910.73                        |
| 津巴布韦 Zimbabwe   | 1 008.42                      | 津巴布韦 Zimbabwe   | 986.90                        | 赞比亚 Zambia      | 890.62                        |

表7 非洲粮食发展潜力及幅度

Table 7 Development potential of grain and its extent in Africa

| 粮食<br>类型<br>Type of grain | 2020s                         |                                                 |                                                 | 2050s                         |                                                 |                                                 | 2080s                         |                                                 |                                                 |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                           | 发展<br>潜力/<br>万 t              | 发展潜<br>力幅度<br>A/%                               | 发展潜<br>力幅度<br>B/%                               | 发展潜<br>力/万 t                  | 发展潜<br>力幅度<br>A/%                               | 发展潜<br>力幅度<br>B/%                               | 发展潜<br>力/万 t                  | 发展潜<br>力幅度<br>A/%                               | 发展潜<br>力幅度<br>B/%                               |
|                           | Develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>A of<br>develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>B of<br>develop-<br>ment<br>potential | Develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>A of<br>develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>B of<br>develop-<br>ment<br>potential | Develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>A of<br>develop-<br>ment<br>potential | Extent<br>B of<br>develop-<br>ment<br>potential |
|                           |                               |                                                 |                                                 |                               |                                                 |                                                 |                               |                                                 |                                                 |
| 小麦<br>Wheat               | 2 391.44                      | 88.07                                           | 111.68                                          | 2 415.65                      | 88.96                                           | 112.81                                          | 2 112.74                      | 77.81                                           | 98.66                                           |
| 稻谷<br>Paddy rice          | 2 763.77                      | 75.59                                           | 104.79                                          | 2 817.96                      | 77.08                                           | 106.85                                          | 2 785.75                      | 76.20                                           | 105.63                                          |
| 玉米<br>Maize               | 21 768.07                     | 258.67                                          | 328.55                                          | 22 345.83                     | 265.54                                          | 337.27                                          | 21 959.32                     | 260.95                                          | 331.44                                          |
| 合计<br>Total               | 26 923.27                     | 182.08                                          | 236.08                                          | 27 579.44                     | 186.52                                          | 241.84                                          | 26 857.81                     | 181.64                                          | 235.51                                          |

注:发展潜力幅度 A=(发展潜力÷2017 年实际产量)×100%;发展潜力幅度 B=(发展潜力÷2010 年实际产量)×100%。  
Note: Extent A of development potential equals to development potential's proportion of actual production in 2017; extent B of development potential equals to development potential's proportion of actual production in 2010.

粮食产量相比2010年的111%的增幅<sup>[10]</sup>。其中,小麦的发展潜力为2 112.74万~2 415.65万t,发展潜力幅度为77.81%~88.96%;稻谷的发展潜力为2 763.77万~2 817.96万t,发展潜力幅度为75.59%~77.08%;玉米的发展潜力为21 768.07万~22 345.83万t,发展潜力幅度为258.67%~265.54%。此外,非洲的粮食发展潜力占其2010年粮食产量的比重为235.51%~241.84%,也要明显高于111%。因此,非洲的粮食发展潜力巨大,这为其到2030年改善区域内粮食安全状况和实现SDGs提供了非常坚实的基础。

## 4 结论及启示

本研究以小麦、稻谷和玉米为例,分析了1961—2017年非洲粮食生产演变趋势,并以2017年为参照期,利用GAEZ v3.0软件并结合FAOSTAT数据估算了非洲粮食发展潜力,得到以下主要研究结论:

1) 非洲粮食收获面积和产量及其各自占世界比重总体上以增为主,非洲玉米的收获面积和产量均显著高于小麦和稻谷;非洲粮食单产大幅提高,且2017年与1961年相比,非洲仅小麦单产占世界单产比重提高,稻谷和玉米单产占世界单产比重则均显著下降;近年来,大多数非洲国家和地区的粮食单产仍明显低于世界和中国。

2) 以2017年为参照期,非洲粮食发展潜力为26 857.81万~27 579.44万t,发展潜力幅度为181.64%~186.52%。非洲小麦发展潜力为2 112.74万~2 415.65万t,发展潜力幅度为77.81%~88.96%,摩洛哥、阿尔及利亚、埃塞俄比亚、突尼斯和利比亚等国家的小麦发展潜力位处前列;稻谷的发展潜力为2 763.77万~2 817.96万t,发展潜力幅度为75.59%~77.08%,尼日利亚、几内亚、民主刚果、坦桑尼亚、塞拉利昂、利比里亚和科特迪瓦等国家的稻谷发展潜力位处前列;玉米的发展潜力为21 768.07万~22 345.83万t,发展潜力幅度为258.67%~265.54%,尼日利亚、坦桑尼亚、安哥拉、莫桑比克、肯尼亚、马拉维和民主刚果等国家的玉米发展潜力位处前列。

因此,非洲粮食发展潜力巨大,这为其改善区域内粮食安全状况和到2030年实现SDGs提供了非常坚实的基础。鉴于大多数非洲国家和地区的粮食平均单产目前仍明显低于中国以及世界,在中非合

作论坛、南南合作、“一带一路”等框架下,中国可将持续提升非洲粮食单产作为今后中非农业合作的重点,着力强化在农业技术转移、教育培训等领域的深层次合作与交流,在非洲因地制宜地加强优良品种、农机装备以及科学施肥、节水灌溉、病虫草害生物防治等方面先进适用农业技术的推广應用和农田水利基础设施援建,不断提高非洲粮食生产的劳动生产率、土地生产率和资源利用率,促进非洲的粮食发展潜力加快转变为可持续的粮食现实产能,提升非洲自身的农业发展与粮食安全保障能力。

## 参考文献 References

- [1] United Nations (UN). Millennium Development Goals Report 2015[EB/OL]. [2018-08-10]. [http://www.un.org/millenniumgoals/2015\\_MDG\\_Report/pdf/MDG%202015%20rev%2028July%201%29.pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%2028July%201%29.pdf)
- [2] United Nations(UN). United Nations Millennium Declaration [EB/OL]. [2018-08-10]. <http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.htm/>
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), World Food Programme (WFP). The State of Food Insecurity in the World 2015[EB/OL]. [2018-08-18]. <http://www.fao.org/3/a-i4671e.pdf>
- [4] Huang J K, Wang X B, Dang H. Impacts of and attitudes toward GM technology in China: Challenges, policy and research implications [J]. *China Agricultural Economic Review*, 2017, 9(3): 334-339
- [5] United Nations (UN). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. [2018-08-18]. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), World Food Programme (WFP). Monitoring food security and nutrition in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development: Taking stock and looking ahead [EB/OL]. [2018-08-10]. <http://www.fao.org/3/a-i6188e.pdf>
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO and the SDG: Indicators-measuring up to the 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. [2018-08-10]. <http://www.fao.org/3/a-i6919e.pdf>
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Towards Zero Hunger 1945—2030[EB/OL]. [2018-08-10]. <http://www.fao.org/3/a-i6196e.pdf>
- [9] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), International Fund for Agricultural Development

- (IFAD), United Nations Children's Fund(UNICEF), World Food Programme (WFP), World Health Organization (WHO). The State of Food Security and Nutrition in the World 2018[EB/OL]. [2018-11-08]. <http://www.fao.org/3/I9553EN/i9553en.pdf>
- [10] International Food Policy Research Institute (IFPRI). 2018 Global Food Policy Report[EB/OL]. [2018-11-08]. <https://www.ifpri.org/publication/2018-global-food-policy-report>
- [11] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027 [EB/OL]. [2018-11-18]. <http://www.fao.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook/2018-2027/en/>
- [12] Brink A B, Eva H D. Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: A sample based remote sensing approach[J]. *Applied Geography*, 2009, 29(4): 501-512
- [13] Jayne T S, Chamberlin J, Headey D D. Land pressures, the evolution of farming systems, and development strategies in Africa: A synthesis[J]. *Food Policy*, 2014, 48(5): 1-17
- [14] Titttonell P, Giller K E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 76-90
- [15] 刘青建. 合作发展: 非洲发展的选择与中非合作的示范效应[J]. *教学与研究*, 2018(1): 79-87
- Liu Q J. Cooperation and development: The choice of African development and the demonstration effect of Sino-Africa cooperation[J]. *Teaching and Research*, 2018(1): 79-87 (in Chinese)
- [16] 韩振国, 于永达. 非盟《2063年议程》与中非合作论坛背景下的中非农业合作[J]. *国际经济合作*, 2017(12): 4-9
- Han Z G, Yu Y D. China-Africa agricultural cooperation under the background of the AU Agenda 2063 and the Forum on China-Africa Cooperation [J]. *Journal of International Economic Cooperation*, 2017(12): 4-9 (in Chinese)
- [17] 齐顾波, 罗江月. 中国与非洲国家农业合作的历史与启示[J]. *中国农业大学学报: 社会科学版*, 2011, 28(4): 11-17
- Qi G B, Luo J Y. The evolution of the China-Africa agricultural cooperation and its implications [J]. *China Agricultural University Journal of Social Sciences Edition*, 2011, 28(4): 11-17 (in Chinese)
- [18] 韩长赋. 推动中非农业合作再上新台阶[J]. *农村工作通讯*, 2018(17): 5-7
- Han C F. Promoting China-Africa agricultural cooperation to a new level[J]. *Rural Affairs Newsletter*, 2018(17): 5-7 (in Chinese)
- [19] 习近平. 在 2018 年中非合作论坛北京峰会开幕式上的主旨讲话[EB/OL]. (2018-09-03) [2019-04-20]. [http://www.xinhuanet.com/world/2018-09/03/c\\_129946128.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2018-09/03/c_129946128.htm)
- Xi J P. The Speech at the Opening Ceremony of the 2018 Beijing Summit of the Forum on China-Africa Cooperation (FOCAC) [EB/OL]. (2018-09-03) [2019-04-20]. [http://www.xinhuanet.com/world/2018-09/03/c\\_129946128.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2018-09/03/c_129946128.htm) (in Chinese)
- [20] 安春英. “一带一路”背景下的中非粮食安全合作: 战略对接与路径选择[J]. *亚太安全与海洋研究*, 2017(2): 93-105, 129
- An C Y. Food security in Africa and its cooperative approaches with China in the context of “One Belt and One Road”[J]. *Asia-Pacific Security and Maritime Affairs*, 2017(2): 93-105, 129 (in Chinese)
- [21] Fischer G, Nachtergaele F O, Prieler S, Teixeira E, Toth G, Van-Velthuisen H, Verelst L, Wiberg D. Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3. 0): Model Documentation [EB/OL]. [2018-10-08]. [http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13290/1/GAEZ\\_Model\\_Documentation.pdf](http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13290/1/GAEZ_Model_Documentation.pdf)
- [22] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 孟庆锋, 赵明. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 525-534
- Liu B H, Chen X P, Cui Z L, Meng Q F, Zhao M. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 525-534 (in Chinese)
- [23] Lobell D B, Cassman K G, Field C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes and causes [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34(1): 179-204
- [24] Van-Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, Wolf J, Titttonell P, Hochman Z. Yield gap analysis with local to global relevance: A review[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 4-17
- [25] 余强毅, 吴文斌, 唐华俊, 陈佑启, 杨鹏. 基于粮食生产能力的 APEC 地区粮食安全评价[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2838-2848
- Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, Chen Y Q, Yang P. A food security assessment in APEC based on grain productivity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13): 2838-2848 (in Chinese)
- [26] Meng Q F, Hou P, Wu L, Chen X P, Cui Z L, Zhang F S. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 91-97
- [27] Aggarwal P K, Hebbar K B, Venugopalan M V, Rani S, Bala A, Biswal A, Wani, S P. Quantification of yield gaps in rain-fed rice, wheat, cotton and mustard in India[EB/OL]. [2018-10-08]. <http://oar.icrisat.org/2335/>