

近20年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响

刘正佳^{1,2,3}, 钟会民^{1,2}, 李裕瑞^{1,2}, 文琦⁴, 刘雪琦⁵, 简钰清⁶

(1. 中国科学院地理科学资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 4. 宁夏大学资源环境学院,

银川 750021; 5. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 6. 广州大学地理科学学院, 广州 510006)

摘要: 中国是一个农业大国, 用占世界不到9%的耕地养活了占世界近20%的人口。国家及区域尺度粮食安全问题一直备受关注。以省为研究单元, 借助GIS空间分析与统计工具, 分析了1999—2018年中国粮食生产变化的总体特征、地域格局演变特征及这些变化对区域粮食供需格局的影响。研究表明: 全国粮食总产量呈现显著增加的趋势, 增长率为0.11亿t/年。北方粮食总产量呈显著增长趋势, 而南方粮食总产量基本维持稳定。玉米产量的增加对这些变化起到了主导作用。在省域尺度上, 近20年五种主要粮食作物(稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类)产量时空变化具有较大差异。粮食产量的变化对区域粮食供需格局产生了较大影响。特别是东南沿海地区的广东、浙江、福建三省, 从稻谷和小麦两大口粮供过于求型变为了供给不足型省份。但在全国尺度上, 人均粮食占有量在Y 1999—2003时段(1999—2003年五年平均情况)和Y 2014—2018时段(2014—2018年五年平均情况)分别为368.0 kg/人和461.5 kg/人; 人均两大口粮占有量在Y 1999—2003时段和Y 2014—2018时段分别为220.3 kg/人和247.6 kg/人。播种面积的变化是全国及区域尺度上粮食作物产量变化的直接原因。但其根本原因则更多归因于土地利用价值驱动的属性、功能及质量的变化。此外, 根据导致耕地减少的四种主要类型——“非农化”“非粮化”“荒废化”和“生态化”, 探讨了其形成原因并提出相应的提高区域粮食生产的对策建议, 以期对区域粮食种植格局调整及实现两大口粮需求省份向自给型省份转型提供参考。

关键词: 粮食产量; 口粮; 土地利用; 空间格局; 中国

粮食安全是关系国家战略和民生的重大安全问题。长期以来, 其生产格局、贸易流通、供需关系等备受国际和国内社会高度关注^[1-11]。2015年通过的联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)是继千年发展目标(Millennium Development Goals, MDGs)后继续指导2015—2030年全球发展工作的重要方向性指标, 它将消除贫困与零饥饿列为17个大目标中的前两位目标, 这显示了农业发展及粮食安全在全球可持续发展中的重要地位。21世纪以来, 城镇化进程的不断加速, 一方面导致大量耕地转化为城镇建设用地, 进而导致耕地面积减少^[12]; 另一方面吸引大量农业人口不断涌入城市从事非农生产, 导致农村剩余劳动力呈现老弱化^[13]。为此, 有学者提出城镇化推进、人

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971218); 中国科学院A类战略性先导科技专项课题任务(XDA23070302); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504701)

作者简介: 刘正佳(1986-), 男, 山东青州人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事农业地理信息、农业土地可持续发展分析与模拟等方面的研究。E-mail: liuzj@igsrr.ac.cn

通讯作者: 文琦(1979-), 男, 宁夏彭阳人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事食物—能源经济与乡村发展研究。E-mail: wenq98@163.com

口增加及居民消费结构转变对区域粮食安全挑战巨大^[4,14]。近年来,与气候变化及不合理人类活动相关的极端天气与气候灾害事件(如厄尔尼诺、干旱、热浪、洪涝)、病虫害事件(如蝗虫灾害)、突发公共卫生事件(如急性呼吸综合征、新冠肺炎)等发生频率增加,也引发人们更加关注全球和区域粮食安全问题^[15-21]。在全球尺度上,如何应对气候变化可能对粮食安全带来的风险,如何通过政策维持好森林保护与粮食生产之间的关系,如何提高现有耕地的集约化利用效率并提高耕地产能养活全球在2050年可能达到的近100亿人口,是国际学者较为关注的热点话题^[22-26]。总体来说,粮食安全是一个多维的安全目标,并受多方面因素影响。其中,粮食供需关系是粮食安全保障体系中最关键的组成部分之一^[4-6]。本质上,它是粮食生产能力和粮食消费水平的关系,在时空尺度上是一种动态关系。及时准确地掌握粮食供需关系的动态变化特征,对指导粮食生产结构调整、制定粮食补贴政策及调整粮食贸易策略都具有重要的现实意义。

中国是一个农业大国、人口大国,用占世界不到9%的耕地养活了占世界近20%的人口。国家及区域尺度粮食安全问题一直是个热点命题。特别在国家层面,中央一号文件连续十六年聚焦三农、关注粮食安全。粮食安全不仅与粮食总量的供需相关,而且与粮食生产的格局变化及区域人口数量变化密切相关^[27-30]。先前大量的文献多借助历史粮食总产量数据和数学模型研究粮食生产格局变化特征、粮食供需演变规律及趋势变化等^[28,31,32],并指出,在东南沿海地区城镇化高速发展、农业与非农的就业收入差距拉大、北方耕地拓张、种植结构调整、粮食总产量重心北移等多因素影响下,自20世纪70年代以来形成的“南粮北运”的粮食生产格局逐步被“北粮南运”的粮食生产格局所取代^[31-36]。但这些研究成果多以关注粮食总产量区域生产格局变化及粮食供需关系变化为主,而少有研究关注粮食类型和结构变化在区域粮食安全及供需平衡中的作用。此外,对稻谷和小麦“两大口粮”在空间上的生产格局及其供需关系变化特征也鲜见报道。

党的十八大以来,中国把粮食安全作为头等大事,提出了一系列新时期国家粮食安全的新战略,并将“谷物基本自给、口粮绝对安全”作为国家粮食安全的基本战略底线。一方面,关注粮食总量的安全;另一方面,稻谷和小麦两大口粮的生产格局及其供需关系也受到了高度关注。2014年,国务院办公厅印发的《中国食物与营养发展纲要(2014—2020)》明确了食物消费量目标,到2020年,全国稻谷、小麦两大口粮人均全年消费量为135 kg。在2017年,黄奇帆参考最新统计数据并从保证粮食安全的角度估算,当前中国每年人均口粮消费约为150 kg^①。这些最新的统计数据,为研究新时期粮食供需格局提供了新参考。同时,我们也注意到,改革开放40年来,人民生活水平的大幅度提升,老百姓对食品的需求已经从“吃饱”转为“吃好”,粮食需求量也在不断增长。因此,有必要从粮食种植结构类型上来评定粮食生产及供需关系新格局,这些分析及相关研究结果有望为区域农业结构调整、粮食生产和贸易流通等提供新的参考。

基于以上分析,本文利用1999—2018年省域尺度粮食数据、播种面积数据、年末常住人口数据,以省为研究基本单元,尝试开展以下三方面的研究工作:(1)分析近20年中国粮食生产的总体变化特征;(2)揭示各省份粮食生产的地域格局演化特征;(3)建立粮食和两大口粮供需关系模型,阐明中国粮食及两大口粮生产格局变化对区域粮食供需格局的影响。

① 数据来源于 https://www.guancha.cn/HuangQiFan/2017_05_31_410919_s.shtml。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

本文中用到的数据主要包括：1999—2018年全国省级尺度的粮食产量和播种面积数据、1999—2018年末常住人口数据、2000年和2015年的1 km遥感土地利用数据^[12,37,38]、全国省级尺度行政边界数据等。受数据获取限制，本文主要分析大陆地区31个省（市、自治区）粮食生产变化情况及其粮食供需关系变化，港澳台地区不在本文的分析范围内。其中，粮食产量和播种面积数据主要包括粮食总产量、稻谷产量、小麦产量、玉米产量、豆类产量和薯类产量等及它们相应的播种面积。各省份粮食产量、播种面积和年末人口数据来自《中国统计年鉴》（2000—2019年）。土地利用数据和中国行政区边界数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心。

1.2 粮食/两大口粮供需关系类型划分

在粮食总量方面，鉴于每年人均粮食消费400 kg是满足人均营养热值标准，本文沿用该阈值为供需平衡的标准线^[34]。在口粮的人均消费量方面，由于受南北方饮食习惯及农业自然资源状况的影响，很难在全国尺度上用一个指标将稻谷和小麦进行分开研究。为了便于在全国层面上开展供需格局变化分析，本文将稻谷和小麦两大口粮视为一个整体，并以每年人均口粮消费150 kg定义为供需平衡的标准线。在此基础上，以省份为单位，建立粮食和口粮供需关系模型：

$$\Delta Y = Y - Y_{base} \quad (1)$$

式中： ΔY 为人均粮食或者两大口粮余缺量情况（kg/人）； Y 为粮食或者口粮实际人均占有量（kg/人）； Y_{base} 对于粮食总量取值为400 kg/人，对于两大口粮取值为150 kg/人。按照各省份粮食供需情况并为了体现供需特征，将其分为四类：供过于求型（>50 kg/人）、自给自足型（0~50 kg/人）、供略少于求型（-50~0 kg/人）、供给不足型（>-50 kg/人）。

1.3 统计分析

为了便于统计分析近20年粮食产量变化及各省份粮食和两大口粮供需变化情况并避免单一年份波动情况对总体结果的影响，本文以研究时段开始五年的平均状况（即1999—2003年五年平均，以下简称Y 1999—2003时段）和最后五年的平均状况（即2014—2018年五年平均，以下简称Y 2014—2018时段）来表征相应省份粮食生产变化情况。利用最小二乘法求变化斜率的方法表征各粮食种类产量及播种面积的在空间上的年际变化情况。斜率变化的显著性则由 t 检验结果决定，在本文中采用 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 为分别定义统计显著和极显著水平。

2 结果分析

2.1 粮食产量变化的总体特征及分析

1999—2018年，全国粮食总产量呈现显著增加的趋势，斜率为0.11亿t/年（ $P<0.01$ ，图1）。研究时段内，南方粮食总产量呈现2003年以前减少而之后缓慢增加的趋势，总体来说南方粮食总产量较为稳定。相比之下，北方粮食总产量自2000年开始一直呈现显著增加的趋势（0.10亿t/年， $P<0.01$ ），其变化趋势与全国趋势较为一致。自2005年开始，北方粮食总产量超过了南方粮食总产量，并且二者之间的差距呈现0.08亿t/年（ $P<0.01$ ）的趋势在拉大。其中，北方耕地面积持续增加是北方粮食产量持续增长的一个

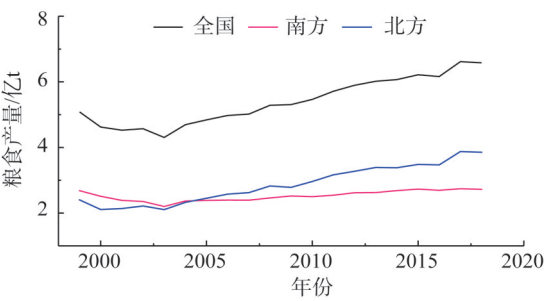


图1 1999—2018年全国和南/北方的粮食总产量变化情况

Fig. 1 Trends of total grain yield in China in 1999-2018

重要的原因。

全国粮食总产量在Y 2014—2018时段较Y 1999—2003时段增加1.71亿t（增幅为36.9%，表1、图2），值得注意的是，北方粮食产量增加贡献了83.1%。在粮食种类方面，玉米产量增加最多，为1.18亿t，增幅为101.0%；其次是小麦和稻谷，分别增加0.33亿t和0.29亿t，增幅分别为16.4%和34.5%。而豆类和薯类的产量则表现为减少，分别减少0.03亿t和0.05亿t。两个时段，主要粮食作物产量结构也发生了

变化。在Y 1999—2003时段，稻谷产量（ 1.80 ± 0.13 亿t）要明显高于玉米和小麦的产量。而在Y 2014—2018时段，玉米产量跃升为第一位（ 2.35 ± 0.19 亿t），稻谷和小麦的产量分居第二位（ 2.09 ± 0.03 亿t）和第三位（ 1.30 ± 0.03 亿t）。

表1 1999—2018年全国主要粮食作物产量变化

Table 1 Averaged values and slope values of five type of crops in China in 1999-2018

名称	1999—2003年平均值/亿t	2014—2018年平均值/亿t	1999—2018年斜率/(亿t/年)
稻谷	1.80 ± 0.13	2.09 ± 0.03	0.019**
小麦	0.97 ± 0.10	1.30 ± 0.03	0.022**
玉米	1.17 ± 0.07	2.35 ± 0.19	0.080**
豆类	0.21 ± 0.01	0.17 ± 0.01	-0.002**
薯类	0.36 ± 0.01	0.31 ± 0.02	-0.003**
全部	4.62 ± 0.25	6.33 ± 0.22	0.114**

注：*表示 $P<0.01$ 。

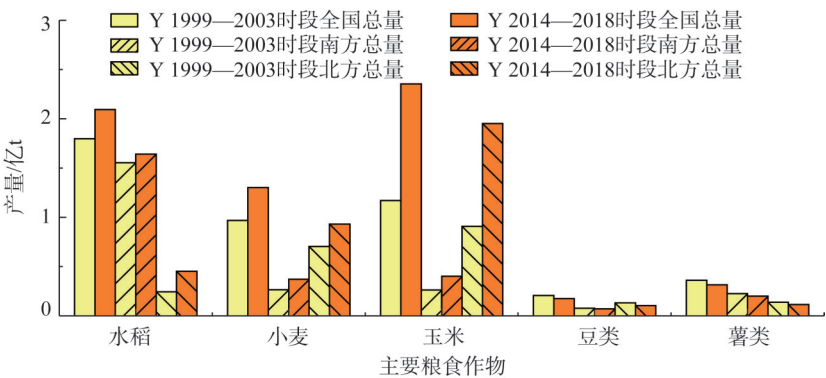


图2 Y 1999-2003和Y 2014-2018两个时段全国/南方/北方主要粮食作物产量

Fig. 2 Yield changes of five-type crops in two typical periods Y1999-2003 and Y2014-2018

播种面积增减情况是粮食产量增减的直接原因之一，正如全国各省份粮食总产量变化与总播种面积变化呈现出显著的正相关关系（ $R^2=0.9$ ， $P<0.01$ ）。近20年，尽管全国小麦、豆类、薯类以及南方稻谷播种面积下降，但全国粮食总播种面积仍呈现显著增加趋势（斜率为0.06千万 $\text{hm}^2/\text{年}$ ， $P<0.01$ ）。这主要与全国玉米播种面积增加及北方稻谷面积

增加有关,特别是北方玉米播种面积的扩大贡献巨大。全国粮食总播种面积在Y 2014—2018时段较Y 1999—2003时段增加0.86千万 hm^2 ,增幅为8.1%。玉米播种面积增加最多,为1.49千万 hm^2 ,增幅为61.3%;稻谷播种面积次之,为0.14千万 hm^2 ,增幅为4.7%。而小麦、豆类和薯类播种面积分别减少了0.10千万 hm^2 、0.29千万 hm^2 和0.19千万 hm^2 。同时,主要粮食作物播种面积结构也发生了变化。在Y 1999—2003时段,播种面积最大的三类粮食作物分别为稻谷(2.90 ± 0.16 千万 hm^2)、小麦(2.52 ± 0.24 千万 hm^2)和玉米(2.44 ± 0.09 千万 hm^2),而在Y 2014—2018时段,播种面积最大的三类粮食作物变为了玉米(3.93 ± 0.25 千万 hm^2)、稻谷(3.03 ± 0.02 千万 hm^2)和小麦(2.42 ± 0.02 千万 hm^2)。

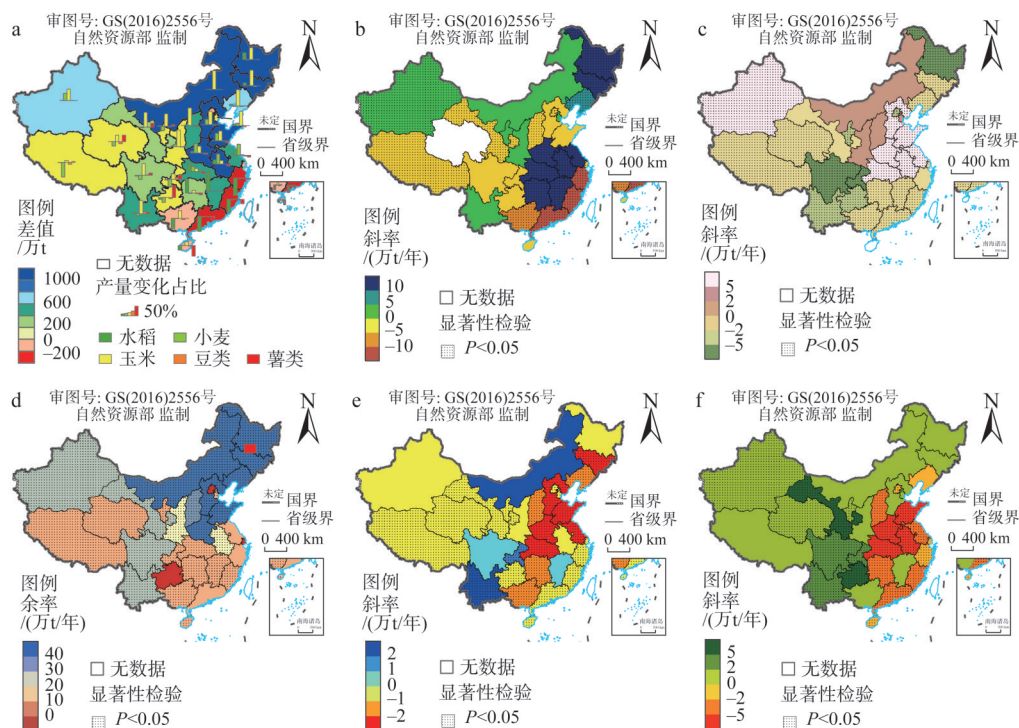
此外,单位面积产量的增加对粮食总产量变化也起到了重要的作用。统计数据显示,五种主要粮食作物单位面积产量均呈现出增加的现象。稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类的单位面积产量从Y 1999—2003时段的6.2 t/ hm^2 、3.8 t/ hm^2 、4.8 t/ hm^2 、1.7 t/ hm^2 和3.6 t/ hm^2 分别增加到Y 2014—2018时段的6.9 t/ hm^2 、5.4 t/ hm^2 、6.0 t/ hm^2 、1.8 t/ hm^2 和3.8 t/ hm^2 。小麦增幅最大为39.9%,其次依次为玉米(24.6%)、稻谷(11.1%)、豆类(9.9%)和薯类(7.1%)。

2.2 粮食产量的地域格局演化特征及分析

在粮食产量方面,粮食总产量减产与增产省份呈现明显的地域聚集性特征,东北地区和华北地区粮食产量增加明显。省域尺度的统计数据显示(图3),在近20年,东南沿海地区的6省(市、自治区)(浙江、广东、福建、广西、上海和海南)以及北京粮食总产量减少,稻谷产量减少是东南沿海地区粮食产量减少的直接原因。然而,其他24省(市、自治区)在Y 2014—2018时段粮食总产量均高于Y 1999—2003时段,其中,粮食总产量增产在1000万t以上有7省区,分别是黑龙江(3963.3万t)、河南(2141.0万t)、内蒙古(1698.4万t)、吉林(1662.5万t)、山东(1229.6万t)、安徽(1135.0万t)和河北(1020.3万t),集中在东北地区和华北地区。在这些省区中,玉米产量增加是绝大多数省份粮食产量增加的直接原因,例如,内蒙古(95.9%)、吉林(79.6%)、河北(68.5%)、黑龙江(61.8%)等省区玉米产量增加量均超过了该省区粮食增加量的50%。此外,黑龙江、吉林、安徽和河南的稻谷产量增加量,河南、河北、山东和安徽小麦产量增加量,也对相应省份粮食产量增加有重要贡献。

当考虑粮食种类时,省份之间减产与增产存在较大差异。对于稻谷,长江中下游地区的湖北、湖南、江西、安徽、江苏和河南以及东北地区的黑龙江、吉林等8省份增产明显,增加速率为10万t/年($P<0.05$),而东南沿海地区的浙江、福建、广东和广西等4省区稻谷产量却呈现出大于5万t/年的减产趋势。对于小麦,显著增产的(>5万t/年)的地区主要集中在华北地区及新疆等7省区,而黑龙江、北京、宁夏、四川、重庆等省(市、自治区)却呈现>5万t/年的减产趋势($P<0.05$)。对于玉米,除北京、上海和贵州呈现减产趋势之外,全国其他省(市、自治区)均呈现增产的趋势,值得注意的是东北和华北地区的8省区的玉米增产超过了30万t/年($P<0.05$)。对于豆类,除内蒙古、四川、重庆、云南、江西等5省(市、自治区)外,全国其他省份均呈现减产的趋势,其中吉林、河北、山东、河南、江苏、湖北等省份减产率超过了2万t/年($P<0.05$)。对于薯类,甘肃、四川、重庆、贵州、云南等省市呈现2万t/年($P<0.05$)的增产趋势,而山东、河南、安徽、湖北等省的减产率却超过了5万t/年($P<0.05$)。

粮食产量变化主要归因于粮食作物播种面积的变化(图4),其根本原因主要是区域



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同; a为Y 1999—2003和Y 2014—2018两个时段各省份主要粮食作物总产量变化量及各省份每一粮食作物产量变化量占该省份内主要粮食作物总产量变化量的百分比; b—f为1999—2018年主要粮食作物产量变化趋势及显著性: b为稻谷, c为小麦, d为玉米, e为豆类, f为薯类。

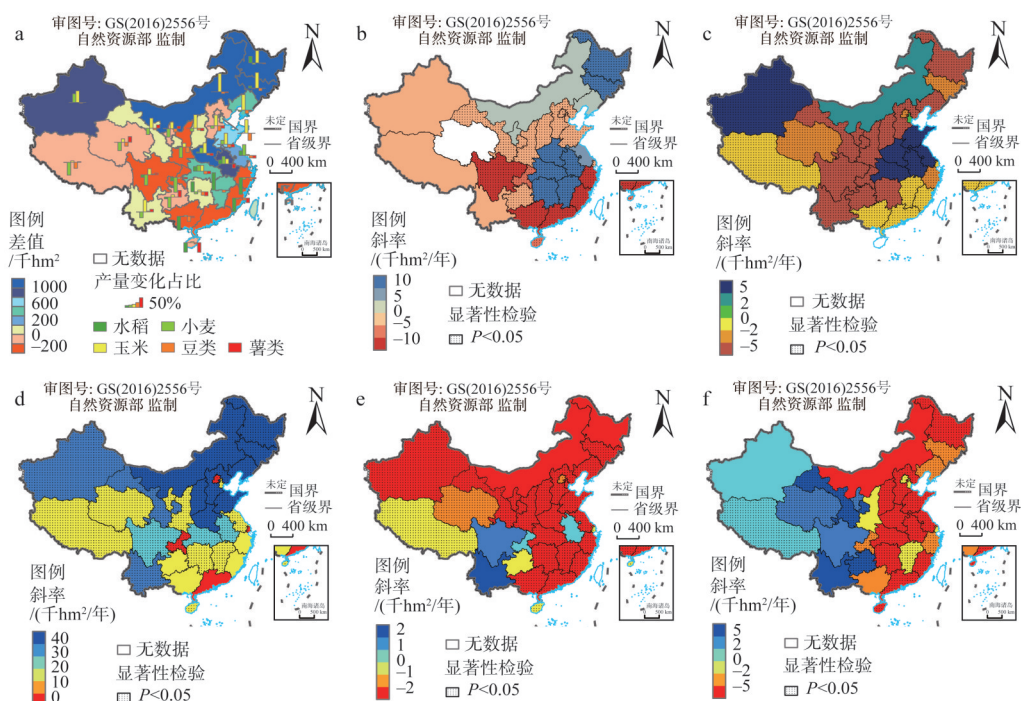
图3 粮食作物产量时空变化

Fig. 3 Spatiotemporal yield changes of five types of crops

土地利用价值驱动的属性、功能及质量的变化^[12,35,39,40]。总体而言, 播种面积明显减少的地区集中在城镇化发展速度较快省市(如北京、浙江、上海、广东等)、劳务输出型地区(如重庆、广西等)及生态优先型省份(如陕西等)。根据土地属性、功能及质量的变化可将耕地变化归纳为四种类型: “非农化” “非粮化” “荒废化” 和 “生态化”。

类型一: 建设用地扩张下的土地利用类型变化, 或称之为耕地的 “非农化” 现象。出现这种现象的区域多集中在胡焕庸线以东以南侧的省份, 快速的城镇化以及人口的增多, 扩大了建设用地占用耕地的数量。根据2000年和2015年1 km遥感土地利用数据统计的结果, 在总体减少的耕地面积中, 有约70%是由于建设用地扩张导致的耕地流失, 而这些区域恰恰多集中在经济速度发展较快的中国东部和东南部地区^[12,37]。特别典型的是京津冀地区、长三角地区及珠三角地区的省份。不但城市地区的建设用地在扩张, 大部分平原地区的乡村建设用地也在扩张, 居民地及道路等的扩张在一定程度上打破了原有耕地种植的规模效益。

类型二: 经济收益驱动下的耕地功能和用途变化, 或称之为耕地的 “非粮化” 现象。改革开放以来, 特别是21世纪以来, 人民生活水平不断提到, 对生活质量的要求也在不断提升, 对水果以及蔬菜的需求量也不断增大。受经济收益的驱动, 在离城市较近或者交通较为便利的地方, 更多的耕地被用于发展蔬菜种植、水果种植等。这种用途的



注：a为Y 1999—2003和Y 2014—2018两个时段各省份主要粮食作物总播种面积变化量及各省份每一粮食作物播种面积变化量占该省份内主要粮食作物总播种面积变化量的百分比；b~f为1999—2018年主要粮食作物播种面积变化趋势及显著性；b为稻谷，c为小麦，d为玉米，e为豆类，f为薯类。

图4 粮食作物播种面积时空变化

Fig. 4 Spatiotemporal area changes of five types of crops

变化给从事农业活动的劳动者也带了较为实惠的经济收益^[41]。同时，这种效益也有连锁效应，带动了更多农户进行耕地“非粮化”经营。这种现象几乎在全国各个省（市、自治区）都可以发现，并多集中在近城镇地区。从长期的区域粮食安全和耕地可持续利用角度出发，决策部门应当制定积极的中长期土地规划或激励政策管控耕地“非粮化”现象。

类型三：劳动力外出务工或土地收益低而导致的耕地“荒废化”或“撂荒”现象。目前的研究表明，耕地常年撂荒或季节性撂荒等现象越来越普遍，从区域角度来看，目前更多以南方省份出现该现象居多^[40]，这对区域粮食生产也带来了巨大挑战。分析其原因可能更多聚焦两个方面：（1）农业生产效率低以及农业和非农就业的收入差距影响着农户种粮积极性；（2）农村空心化、农业生产主体的老龄化现象突出，愿意种地的青壮年农民越来越少，在中西部的一些省份也表现为“人少地多”。有研究也指出撂荒格局的形成过程与区域经济发展和产业结构调整背景下的农业劳动力析出基本同步^[40]。针对耕地“荒废化”或“撂荒”现象，一方面建议通过土地整治的手段，提高现有耕地土壤肥力水平、机械化耕种水平以及基础设施水平等，提高土地规模经营效益和产出效益；另一方面，结合区域耕地利用特征，建立因地制宜土地流转机制，借助流转等手段，将闲散耕地、季节性撂荒或者常年撂荒耕地流转到大户手中，开展规模经营提高收益。这方面比较有代表性和参考价值的是广西“小块并大块”整治以及黄土高原地区“治沟造地”整治等^[42,44]。

类型四：生态建设和生态恢复政策下的坡耕地或低质量耕地“生态化”现象。长期以来受不合理土地利用的影响，部分生态较为脆弱的地区出现严重生态退化的现象，并已经严重制约了当地社会经济发展及人民生活安全^[45]。例如黄土高原地区，过去严重的水土流失给当地老百姓生活带来巨大困难，随着一系列的生态恢复措施，如1999年发起的“退耕还林草”计划，有效地降低了当地水土流失情况，但同时由于大量坡耕地转为生态用地，导致耕地数量减少^[37,46,47]。

加强对以上四类耕地的有效管理对增加或提高区域粮食产量具有重要的现实意义。此外，积极响应气候变化带来的正面效应（例如积温带北移），开展区域粮食种植的优化调整，提高土地生产效益，也有助于提高农户种植积极性，提高区域粮食产量^[29,43]。

2.3 人均粮食/两大口粮占有量变化特征及对区域粮食供需格局的影响

本部分主要对比Y 1999—2003和Y 2014—2018两个时段人均粮食占有量及人均两大口粮占有量的变化特征。在全国尺度上，人均粮食占有量在Y 1999—2003时段和Y 2014—2018时段分别为368.0 kg/人和461.5 kg/人；人均两大口粮占有量在Y 1999—2003时段和Y 2014—2018时段分别为220.3 kg/人和247.6 kg/人。按照联合国粮农组织推荐的粮食安全标准（400 kg/人）及我国现阶段人均两大口粮消费标准（150 kg/人）来看，现阶段中国的粮食总量及两大口粮需求均可以满足人均需求。

本文也分析了两个时段粮食总量及两大口粮供需格局的空间变化特征。在省域尺度上人均总粮食占有量和人均两大口粮占有量展示了差异较大的空间格局（图5）。两个研究时段对比分析发现，全国人均总粮食占有量在供需平衡标准线以上的省份数目在增加，而人均两大口粮占有量在供需平衡标准线以上的省份数目却在减少。

对于人均总粮食占有量，在Y 1999—2003时段，粮食供过于求型和自给自足型省份仅有10个，其中，粮食供过于求型省份主要集中在北方地区，仅有黑龙江、吉林、内蒙古和宁夏四省区。在Y 2014—2018时段，粮食供过于求型和自给自足型省份增加到了16个，其中，粮食供过于求型省份变为了12个（北方地区有9个，南方地区3个）；与此同时，四川和甘肃也从Y 1999—2003时段的粮食供给不足型和供略少于求型变为了粮食自给自足型。此外，浙江（-113.2 kg/人）、广东（-93.7 kg/人）、福建（-86.3 kg/人）、海南（-74.6 kg/人）、北京（-64.5 kg/人）、西藏（-55.2 kg/人）、上海（-53.6 kg/人）、广西（-16.9 kg/人）、天津（-14.4 kg/人）、青海（-5.3 kg/人）等10省（市、自治区）人均粮食占有量在近20年均有一定程度的减少。在近20年，全国人均总粮食占有量增加的有21个省份，粮食供过于求型省份也从单一的中国东北部地区扩大到新疆、华北平原、长江中下游平原等地区，其中玉米产量增加贡献较大。

对于人均两大口粮占有量，在Y 1999—2003时段，两大口粮供过于求型和自给自足型省份有19个，其中，两大口粮供过于求型省份主要集中在胡焕庸线以东以南地区的江西、湖南、江苏、安徽、湖北、黑龙江、河南、广西、四川、山东、浙江以及西北地区的宁夏和新疆等13省区。在Y 2014—2018时段，两大口粮供过于求型和自给自足型省份减少为16个，吉林和河北分别从Y 1999—2003时段的供略少于求型和自给自足型变为两大口粮供过于求型省份，与此同时，宁夏和浙江则由两大口粮供过于求型分别转变为了自给自足型和供略少于求型省区。值得注意的是，在近20年有18省份两大口粮为负增长，其中浙江（-100.0 kg/人）、宁夏（-96.4 kg/人）、广东（-75.5 kg/人）、福建（-64.0 kg/人）等省区负增长超过了50 kg/人。东南沿海地区的浙江、福建和广东从21世纪初的

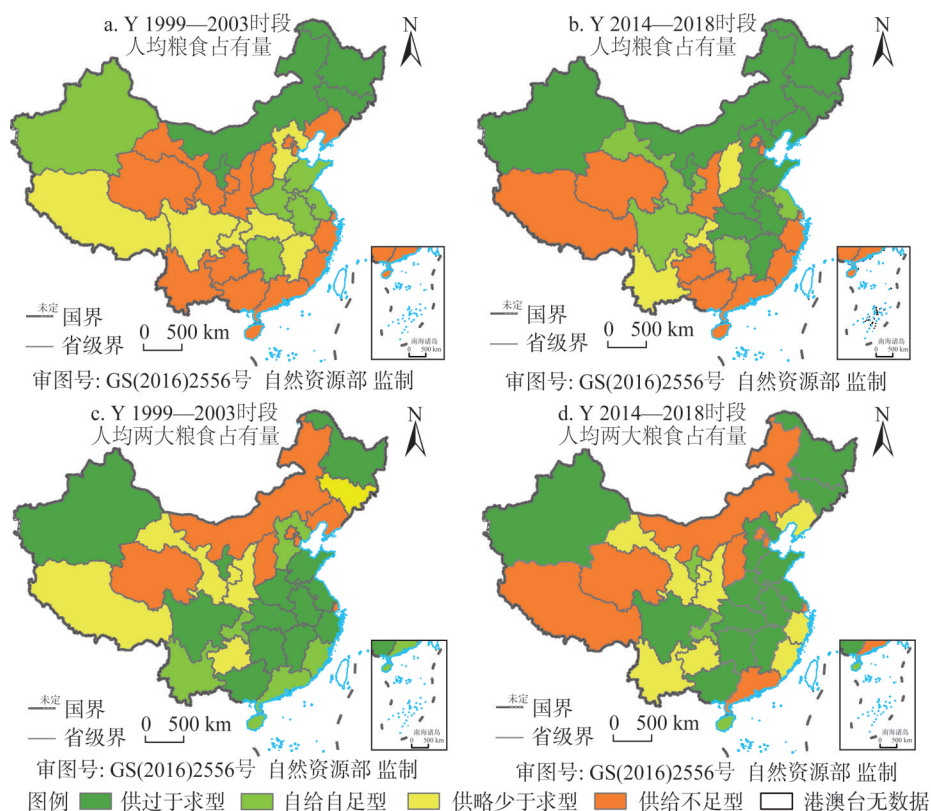


图5 Y 1999—2003和Y 2014—2018两个时段各省份人均粮食占有量及人均两大口粮占有量变化情况
Fig. 5 Provincial changes of per capita share of grain and rice-wheat in two typical periods Y 1999–2003 and Y 2014–2018

两大口粮供过于求型或自给自足型省份变为了供略少于求型或供给不足型省份。这些地区稻谷和小麦种植面积显著下降以及常住人口大量增加（广东省Y 2014—2018时段比Y 1999—2003时段常住人口增加了3千万以上）是人均两大口粮占有量显著下降的直接原因。此外，位于北方农牧交错地区的内蒙古、辽宁和甘肃，尽管其人均总粮食占有量在供需平衡标准线以上（玉米产量在粮食总产量中占比相对较高），但人均两大口粮占有量却在供需平衡标准线以下。

3 结论与讨论

本文以省为基本单元，基于粮食产量数据（总产量及稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类五种主要粮食作物产量）、年末常住人口数据、1 km遥感土地利用数据（2000年和2015年）等社会经济和自然本底数据，分析了1999—2018年中国粮食生产变化的总体特征、地域格局演变特征以及这些变化对区域粮食供需格局的影响。研究表明，全国粮食总产量呈现显著增加的趋势，增长率为0.11亿t/年。北方粮食总产量呈显著增长趋势，而南方粮食总产量基本维持稳定。自2005年开始，北方粮食总产量超过了南方粮食总产量，并且二者之间的差距呈现0.08亿t/年（ $P < 0.01$ ）的趋势在拉大。玉米产量的增加对这些变化起到了主导作用。在省域尺度上，近20年五种主要粮食作物产量时空变化具有较大差异。稻谷产量增加区域主要集中在长江中下游平原及东北地区；小麦产量增

加区域主要集中在华北平原和新疆地区；玉米产量在北方地区增加更为明显；豆类产量增加区域主要集中在西南地区；薯类产量增加区域主要集中在中西部地区。粮食产量的变化对区域粮食供需格局产生了较大影响。特别是东南沿海地区的广东、浙江、福建三省，从稻谷和小麦两大口粮供过于求型变为了供给不足型省份。这些地区稻谷和小麦种植面积显著下降以及常住人口大量增加是人均两大口粮占有量显著下降的直接原因。在全国尺度上，Y 2014—2018时段（2014—2018年五年平均情况）人均粮食占有量为461.5 kg/人；人均两大口粮占有量247.6 kg/人。参照联合国粮农组织推荐的粮食安全标准（400 kg/人）及我国现阶段人均两大口粮消费标准（150 kg/人），现阶段中国的粮食总量及稻谷和小麦两大口粮需求均可以满足人均需求。这一结论并未考虑饲料、加工等用粮需求，也未考虑地区间饮食差异性，而是仅聚焦粮食总占有量和两大口粮占有量的分析。中国地域辽阔，区域间水土资源差异明显，加之饮食习惯的不同，因此不同区域面临的粮食供需问题复杂且差异较大。这种复杂差异的弥补得益于中国粮食产销政策制度的保障，可以通过区域调拨的方式调节区域间供需不平衡的关系。然而，从中长期尺度和区域可持续发展的角度出发，对于粮食供给不足型省份或者比较集中的片区，一方面，建议有必要采取积极的粮食种植格局调整、特殊粮食种植补贴等措施鼓励实现其粮食供需类型的转型，以促进其向粮食或两大口粮自给自足型省份转型；另一方面，受区域水土资源等自然条件约束难以达到标准的，建议应当采取积极的粮食贸易流通政策或粮食储备计划，以保障和满足区域对中短期粮食需求。

参考文献(References):

- [1] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [2] XIONG W, HOLMAN I, LIN E D, et al. Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135(1): 58-69.
- [3] FRITZ S, SEE L, MCCALLUM I, et al. Mapping global cropland and field size. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 1980-1992.
- [4] 成升魁, 李云云, 刘晓洁, 等. 关于新时代我国粮食安全观的思考. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 911-926. [CHENG S K, LI Y Y, LIU X J, et al. Thoughts on food security in China in the new period. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 911-926.]
- [5] 谢高地, 成升魁, 肖玉, 等. 新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 895-903. [XIE G D, CHENG S K, XIAO Y, et al. The balance between grain supply and demand and the reconstruction of China's food security strategy in the new period. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 895-903.]
- [6] 胡甜, 鞠正山, 周伟. 中国粮食供需的区域格局研究. *地理学报*, 2016, 71(8): 1372-1383. [HU T, JU Z S, ZHOU W. Regional pattern of grain supply and demand in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1372-1383.]
- [7] ZUO L J, ZHANG Z X, CARLSON K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 304-313.
- [8] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 2000—2014年全球粮食安全格局的时空演化及影响因素. *地理学报*, 2020, 75(2): 332-347. [MA E P, CAI J M, LIN J, et al. Spatio-temporal evolution of global food security pattern and its influencing factors in 2000-2014. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(2): 332-347.]
- [9] FARRELL P, THOW A M, WATE J T, et al. COVID-19 and Pacific food system resilience: Opportunities to build a robust response. *Food Security: The Science, Sociology and Economics of Food Production and Access to Food*, 2020, 12(4): 783-791.
- [10] GODENAU D, CACERES-HERNANDEZ J J, MARTIN-RODRIGUEZ G, et al. A consumption-oriented approach to measuring regional food self-sufficiency. *Food Security*, 2020, Doi: 10.1007/s12571-020-01033-y.

- [11] 周墨竹, 王介勇. 基于复杂网络的全球稻米贸易格局演化及其启示. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1055-1067. [ZHOU M Z, WANG J Y. Implications from pattern and evolution of global rice trade: A complex network analysis. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1055-1067.]
- [12] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802. [LIU J Y, NING J, KUANG W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [13] LIU Y S. Introduction to land use and rural sustainability in China. *Land Use Policy*, 2018, 74: 1-4.
- [14] GANDHI V P, ZHOU Z Y. Food demand and the food security challenge with rapid economic growth in the emerging economies of India and China. *Food Research International*, 2014, 63: 108-124.
- [15] XIONG W, CONWAY D, LIN E D, et al. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production. *Climate Research*, 2009, 1: 23-35.
- [16] LI Y, CONWAY D, XIONG W, et al. Effects of climate variability and change on Chinese agriculture: A review. *Climate Research*, 2011, 50(1): 83-102.
- [17] JU H, VELDE M, LIN E, et al. The impacts of climate change on agricultural production systems in China. *Climatic Change*, 2013, 120(1): 313-324.
- [18] YE L M, XIONG W, LI Z G, et al. Climate change impact on China food security in 2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 363-374.
- [19] 钱凤魁, 王文涛, 刘燕华. 农业领域应对气候变化的适应措施与对策. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 19-24. [QIAN F K, WANG W T, LIU Y H. Research of adaptive counter measures of addressing climate change in agriculture field. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(5): 19-24.]
- [20] CHEN X X, WANG L C, NIU Z G, et al. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020: 282-283.
- [21] TAO F L, PALOSUO T, RÖTTER R P, et al. Why do crop models diverge substantially in climate impact projections? A comprehensive analysis based on eight barley crop models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 1-18.
- [22] ESHA Z, JASON R, RICHARD D. Rainfall anomalies are a significant driver of cropland expansion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(19): 10225-10233.
- [23] JONATHAN F, NAVIN R, KATE B, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [24] GERTEN D, HECK V, J Ä GERMEYR J. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 2020, 3(3): 200-208.
- [25] RUDEL T K, SCHNEIDER L, URIARTE M. From the cover: Agricultural intensification and changes in cultivated areas, 1970-2005. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(49): 20675-20680.
- [26] J Ä GERMEYR J, PASTOR A, BIEMANS H, et al. Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-9.
- [27] LIU J, ZHANG Z, XU X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [28] 李亚婷, 潘少奇, 苗长虹. 中国县域人均粮食占有量的时空格局: 基于户籍人口和常住人口的对比分析. 地理学报, 2014, 69(12): 1753-1766. [LI Y T, PAN S Q, MIAO C H. The spatial-temporal patterns of per capita share of grain at the county level in China: A comparison between registered population and resident population. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1753-1766.]
- [29] LIU Z J, LIU Y S, LI Y R. Extended warm temperate zone and opportunities for cropping system change in the Loess Plateau of China. *International Journal of Climatology*, 2018, 39(2): 658-669.
- [30] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. 地理学报, 2018, 73(2): 203-218. [LIU Y S, ZHANG Z W, WANG J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 203-218.]
- [31] 王介勇, 刘彦随. 1990年至2005年中国粮食产量重心演进格局及其驱动机制. 资源科学, 2009, 31(7): 1188-1194. [WANG J Y, LIU Y S. The changes of grain output center of gravity and its driving forces in China since 1990. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1188-1194.]

- [32] 丁金梅, 杨奎, 马彩虹, 等. 中国粮食产量时空格局演变研究. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1290-1297. [DING J M, YANG K, MA C H, et al. Spatial-temporal evolution of grain production in China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(6): 1290-1297.]
- [33] LIU Y S, WANG D W, GAO J, et al. Land use/cover changes, the environment and water resources in Northeast China. *Environmental Management*, 2005, 36(5): 691-701.
- [34] 殷培红, 方修琦, 田青, 等. 21 世纪初中国主要余粮区的空间格局特征. 地理学报, 2006, 61(2): 190-198. [YIN P H, FANG X Q, TIAN Q, et al. Distribution and regional difference of main output regions in grain production in China in the early 21st century. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(2): 190-198.]
- [35] 赵其国, 周生路, 吴绍华, 等. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策. 土壤学报, 2006, 43(4): 662-672. [ZHAO Q G, ZHOU S L, WU S H, et al. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 662-672.]
- [36] 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 等. 1990—2010 年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响. 地理学报, 2014, 69(12): 1767-1778. [LIU L, XU X L, LIU J Y, et al. Impact of farmland changes on production potential in China during recent two decades. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1767-1778.]
- [37] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatio temporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [38] 徐新良, 庞治国, 于信芳. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用. 北京: 科学技术文献出版社, 2014: 90-108. [XU X L, PANG Z G, YU X F. *Spatial-temporal Pattern Analysis of Land Use/Cover Change: Methods & Applications*. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2014: 90-108.]
- [39] 刘彦随, 李裕瑞. 中国县域耕地与农业劳动力变化的时空耦合关系. 地理学报, 2010, 65(12): 1602-1612. [LIU Y S, LI Y R. Spatio-temporal coupling relationship between farmland and agricultural labor changes at county level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1602-1612.]
- [40] 张学珍, 赵彩杉, 董金玮, 等. 1992—2017 年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征. 地理学报, 2019, 74(3): 411-420. [ZHANG X Z, ZHAO C S, DONG J W, et al. Spatio-temporal pattern of cropland abandonment in China from 1992 to 2017: A Meta-analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 411-420.]
- [41] SU S L, ZHOU X C, WAN C, et al. Land use changes to cash crop plantations: Crop types, multilevel determinants and policy implications. *Land Use Policy*, 2016, 50: 379-389.
- [42] 卢艳霞, 黄盛玉, 王柏源, 等. 农村土地整治创新模式的思考: 基于广西壮族自治区崇左市龙州县“小块并大块”的启示. 中国土地科学, 2012, 26(2): 84-87. [LU Y X, HUANG S Y, WANG B Y, et al. The innovative pattern of the rural land readjustment: The implication of the aggregation from small to large parcel (ASLP) in Longzhou county, Chongzuo city, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *China Land Sciences*, 2012, 26(2): 84-87.]
- [43] 刘彦随, 陈宗峰, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区饲料油菜种植试验及其产业化前景: 以延安治沟造地典型项目区为例. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2065-2074. [LIU Y S, CHEN Z F, LI Y R, et al. The planting technology and industrial development prospects of forage rape in the Loess Hilly Area: A case study of newly-increased cultivated land through gully land consolidation in Yan'an, Shaanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2065-2074.]
- [44] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-9. [LIU Y S, LI Y R. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10): 1-9.]
- [45] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 等. 黄土高原社会—生态系统变化及其可持续性. 资源科学, 2020, 42(1): 96-103. [WANG S, FU B J, WU X T, et al. Dynamics and sustainability of social-ecological systems in the Loess Plateau. *Resources Science*, 2020, 42(1): 96-103.]
- [46] 杜国明, 孙晓兵, 刘彦随, 等. 黄土高原生态退耕的时空分异特征. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 355-364. [DU G M, SUN X B, LIU Y S, et al. Temporal and spatial-differentiation characteristics of ecological restoration in Loess Plateau. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(3): 355-364.]
- [47] 王凤娇, 梁伟, 傅伯杰, 等. 近年来的黄土高原耕地时空变化与口粮安全耕地数量分析. 干旱区地理, 2019, 43(1): 161-171. [WANG F J, LIANG W, FU B J, et al. Spatial and temporal changes of cultivated land and quantitative analysis of ration safe cultivated land on the Loess Plateau in recent years. *Arid Land Geography*, 2019, 43(1): 161-171.]

Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades

LIU Zheng-jia^{1,2,3}, ZHONG Hui-min^{1,2}, LI Yu-rui^{1,2}, WEN Qi⁴, LIU Xue-qi⁵, JIAN Yu-qing⁶

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

5. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: China is feeding roughly 20% of the world's population with less than 9% of the world's cultivated land. The food security at national and regional scales has been a major concern. In this study, we took the province-level area as the research unit and utilized GIS spatial analysis and statistical tools to examine the overall characteristics of grain production changes, the evolution characteristics of regional patterns and the impact of these changes on regional grain supply and demand pattern in China during 1999-2018. The results showed that the total national grain output significantly increased with an annual rate of 1.1 million tons. The total grain output of Northern China showed a significant growth trend, while that of Southern China remained stable. The increment of maize yield played a leading role in these changes. The spatio-temporal yield variations of five major food crops (rice, wheat, maize, beans and tubers) were quite different in the past 20 years at provincial-level scale. The change of grain yield had great influence on regional grain supply and demand pattern. Particularly, Guangdong, Zhejiang and Fujian provinces located in the southeast coastal region had changed from supply-oriented provinces of major grains with rice and wheat into demand-oriented provinces. However, the per capita share of grain was 368.0 kg/person in Y 1999-2003 period (the five-year average during 1999-2003) and 461.5 kg/person in Y 2014-2018 period (the five-year average during 2014-2018) at national-level scale, respectively; and the per capita share of the two major grains was 220.3 kg/person and 247.6 kg/person in Y 1999-2003 and Y 2014-2018 periods, respectively. The change of sown area was the direct reason for the change of grain crop yield at national and regional scales. Nevertheless, the fundamental reason was more attributed to the change of attribution, function and quality, which is driven by land use value. Our study classified the reasons for the decrement of cultivated land into "non-agriculture" "non-grain" "wastage" and "ecology" types. Considering the formation causes of each type, the corresponding countermeasures and suggestions for the sustainable use of regional cultivated land were put forward in order to provide reference for the adjustment of regional grain planting pattern and the transformation of demand-oriented provinces of two major types of grain to self-sufficient provinces.

Keywords: grain yield; rice and wheat; land use; spatial pattern; China