

# 水土资源匹配视角下中国省域农产品 供需平衡分析及其政策启示

张永勋, 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:** 粮食安全关系到中国稳定与发展和国际贸易秩序。以省级行政区为基本单位, 基于2016—2018年各省份常住人口、农产品消费量、农业数据及相关参数, 采用生态足迹和水足迹评价方法, 在只考虑食用和再生产消费且不考虑地区耕地质量差异的条件下, 核算各省份农产品自给的水土资源需求, 评价中国省域水土资源承载力状态。结果显示: (1) 中国现有耕地资源总量可满足自身耕地总需求(前者是后者1.81倍), 但省际差异大, 东部沿海省市耕地不足。(2) 农业可用水资源总量亦可满足农业可持续生产需求, 但区域严重不平衡, 华北平原与宁夏水资源赤字严重, 而青藏高原地区、长江以南省份农业可用水资源丰富。(3) 水土资源空间不匹配制约了中国农业的粮食生产潜力, 不考虑环境净化用水, 水土资源匹配状态可满足全国粮食自给需求; 但考虑环境净化用水, 中国粮食难以实现自给, 承载力赤字达33715.50万人。以资源环境可持续为导向, 未来中国应从农业生产布局优化、农业结构调整、农业科技、产业与人口转移、农产品进口和农业国际合作等方面着手, 解决中国农产品需求问题。

**关键词:** 粮食安全; 资源承载力; 供需平衡; 农业生产布局; 耕地; 水资源

粮食安全问题一直是困扰人类生存和发展的全球性问题。据《世界粮食安全和营养状况2020》报告显示, 2019年全球饥饿人口达约6.9亿, 较5年前增加近6000万。2020年新冠肺炎在全球爆发, 扰乱了正常的国际国内农产品贸易和流通, 粮食安全问题更加严峻。2030年全球实现零饥饿的可持续发展目标面临巨大挑战。中国是世界人口最多的国家, 农产品自给能力不仅影响本国经济社会发展, 也影响世界农产品市场。目前, 中国农产品供需处于紧平衡状态, 农药和化肥过量使用已经导致农田土壤酸化、生态环境恶化、食品农药残留等系列问题<sup>[1-4]</sup>; 农业水土资源过度消耗以及空间上的不匹配, 导致中国在生态文明建设背景下的粮食生产潜力上升空间有限<sup>[5]</sup>, 利用国内国外“两种资源, 两个市场”已成为中国基本粮食安全政策。有效调配国内国外两个市场保障中国粮食安全须先摸清本国的农业生产能力。从资源环境承载力视角, 审视国内农产品自给能力, 科学制定农业生产布局和国际贸易政策, 对于协调生态文明建设和保障粮食安全的关系具有重要意义。

关于资源环境承载力评价研究20世纪80年代开始兴起, 随后区域资源环境承载力评

收稿日期: 2020-08-03; 修订日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(161005202004-1-1)

作者简介: 张永勋(1983-), 男, 河南光山人, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态农业与全球粮食安全。

E-mail: zhangyongxun@caas.cn

通讯作者: 李先德(1964-)男, 湖北监利人, 博士, 研究员, 研究方向为国际农业经济与贸易政策、全球粮食安全。E-mail: gjmy6160@caas.cn

价实证研究大量涌现<sup>[6,7]</sup>,其中针对中国农业资源环境承载力的研究已有较多的文献,主要集中于:(1)采用层次分析法、综合指标体系、熵值法等相对数值的指标体系评价法分析农业资源环境承载力的时空变化特征<sup>[8-12]</sup>;(2)采用水体污染物浓度、原生态粮食承载力、生态足迹、最小人均耕地面积、人口承载量等绝对数值指标法,分析评价农业的资源环境承载力及时空变化特征<sup>[13-15]</sup>;(3)区域粮食消费资源环境效应或粮食供需平衡状态的研究,如食物消费的生态足迹、水足迹<sup>[16-19]</sup>,区域粮食保障能力<sup>[20,21]</sup>。已有研究在农业资源环境承载力的综合评价与比较分析,以及针对水、土等单个要素测算区域资源承载力的研究方法有较多探索;在研究内容方面,主要偏重于口粮、畜禽产品或某几类食物的水资源和耕地资源承载力评价,或者对全国粮食供需的总体平衡状况进行宏观分析;在研究视角上,或从资源环境角度讨论区域承载力问题,或从粮食供求方面讨论某种消费水平下的平衡状态。这些研究反映了某个区域和全国概况,但要么选取的是间接指标,要么是比较单一的直接指标,从生产到消费各环节考虑较粗,资源环境承载力评价与农产品供求平衡研究之间的衔接不够。因此,在生态文明建设背景下,农业生产布局 and 制定科学的国际农产品贸易策略需要多视角、综合和更精确的农业资源环境承载力研究来支撑。

为此,本文拟以省级行政区为基本地理单元,以农业可持续发展为前提,核算各省份常住人口在当前全国平均食物消费水平、再生产用种和不可避免损耗下的农产品需求,再结合各省份水土资源匹配状况及复种指数,评价中国区域农产品生产与消费平衡状态,最后提出未来我国的农业发展政策。为尽可能真实地反映目前中国粮食消费需求,兼顾数据的可获得性,本文选取居民消费量较大的玉米、小麦、水稻、豆类、薯类、花生、油菜籽、甘蔗、甜菜、水果、蔬菜11类种植产品和猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、蛋和奶等6类畜禽产品,核算中国各省份农产品消费量及所需耕地面积和水资源量。比较分析各省份耕地和水资源需求量与实际耕地和水资源量之间的平衡关系,评价在目前食物消费水平和不同考量标准下的各省份水土资源承载力,最后提出农业生产布局、结构调整以及粮食贸易等应对策略。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 评价方法

#### 1.1.1 中国分省农产品消费量核算

一般而言,农产品消费主要包括直接食用、工业原料、饲用、种用和运储损耗五种方式<sup>[22,23]</sup>。事实上,部分工业原料和饲用农产品经加工/转化成食品 and 肉类,最终都成为食物被人们消费。本文重点分析各省份农产品消费总量,因此主要考虑居民直接消费农产品(内含直接食用 and 饲用)、种用 and 运储损耗三个部分。各省份农产品消费的具体算法如下:

$$TFD_{ij} = EF_{ij} + SF_{ij} + WF_{ij} \quad (1)$$

式中:  $TFD_{ij}$  指  $i$  省(市、自治区)对  $j$  类农产品总需求量 ( $10^4$  t);  $EF_{ij}$  指  $i$  地区内  $j$  类农产品消费量 (t);  $j=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  指农产品种类;  $SF_{ij}$  指  $i$  省份内  $j$  类农产品的种用量 ( $10^4$  t),  $j=1, 2, \dots, m$ ,  $m$  指农作物种类的数量,由  $i$  省份的  $j$  类农作物播种面积 ( $10^3$  hm<sup>2</sup>) 乘以  $j$

类农作物单位面积的平均用种量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) 算得 (水果多属于多年生木本植物, 本文中不计其种子用量);  $WF_{ij}$  指  $i$  省份内  $j$  类农产品运储损耗量,  $j=1, 2, \dots, m$ , 由  $j$  类农产品损耗系数乘以总产量求得, 水果和蔬菜因不便储存, 运储损耗率约为 30%<sup>[24]</sup>, 其他作物损耗率约 5%<sup>[22]</sup>。

$$EF_{ij} = (P_i \times F_{capj}) / (1 - \varnothing) \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  省 (市、自治区) 常住人口数量 (人);  $F_{capj}$  为农产品  $j$  的全国人均消费量 ( $\text{kg}/\text{人}$ );  $\varnothing$  为中国城乡居民外出就餐的比例。参照最新研究结果<sup>[25]</sup>, 中国城乡居民外出就餐比例为 13.9%。由于农产品消费数据统计未细分到了具体作物, 如谷物 (主要包括玉米、小麦和水稻)、食用植物油 (主要包括花生和油菜籽)、食糖 (主要包括甜菜和甘蔗), 蔬菜和水果皆为综合性统计, 在实际计算中取涉及的多种原料作物参数的平均值。在统计数据中, 由于食用植物油和食糖皆是工业制成品, 本文取花生和油菜籽加工成植物油的转化率为 40%<sup>[26]</sup>, 甘蔗和甜菜加工成食糖的转化率为 12%<sup>[27]</sup>, 计算原料需求。

### 1.1.2 各省份食物消费所需水土资源量核算方法

#### (1) 耕地需求量核算

采用生态足迹的方法原理, 基于当前农产品人均消费水平和各类农产品全国平均单产, 核算各省份所需要的总耕地面积。具体计算方法如下:

$$TAD_{arable i} = \left( \sum_{j=1}^n \frac{TFD_{ij}}{FY_j} \right) / CI_i \quad (3)$$

式中:  $TAD_{arable i}$  指  $i$  省份耕地面积的总需求量 ( $10^3 \text{ hm}^2$ );  $CI_i$  为  $i$  省份复种指数, 中国各省份复种指数参考谢林花等<sup>[28]</sup>关于中国各省耕地复种指数研究结果;  $FY_j$  指  $j$  类农产品全国平均单产 (本文将其作为“国家公顷”,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $n$  为农产品的种类, 包括种植产品 11 类, 畜牧产品 6 类。其中, 牛、羊和奶等畜产品单位重量产品既需要一定量耕地又需要一定量的草地, 本文参考谢鸿宏等<sup>[29]</sup>的研究, 仅计算所消耗的耕地面积。

#### (2) 水资源需求量核算

从资源环境的角度看, 在保障农业正常生产和环境清洁的前提下, 可持续农业生产耗水主要包括农业生产用水和农业污染物净化用水两个部分。农业生产用水量拟采用农业虚拟水量表示, 农业污染物净化用水拟采用农业水环境承载力的最大需水量表示。

粮食虚拟用水量的计算方法具体如下:

$$TWD_i = \sum_{j=1}^n AW_{ij} + PW_i \quad (4)$$

式中:  $TWD_i$  指  $i$  省份可持续农业生产总需水量 ( $10^8 \text{ m}^3$ );  $AW_{ij}$  指  $i$  省份内  $j$  类农产品生产的虚拟用水量 ( $10^8 \text{ m}^3$ ), 由各类农产品总需求量乘以其虚拟耗水系数求得<sup>[30-33]</sup>;  $PW_i$  指  $i$  省份内农产品生产的农业污染物净化用水 ( $10^8 \text{ m}^3$ )。

农业生产对水环境产生的压力源于氮、磷、钾等过剩营养物质的排放<sup>[34-36]</sup>, 本文采用水盈余量的最大过剩氮载荷量作为表征农业水环境承载力的指标, 计算方法如下:

$$PW_i = (N_{animal i} + N_{fertilizer i} + N_{soil i} - N_{crop i}) / (N_{max} \times 0.4) \quad (5)$$

式中:  $N_{animal i}$  为  $i$  省份牲畜排放粪便的含氮量 (t), 将通过各类粪肥总量与粪肥氮含量的乘积求得, 猪、牛、羊、禽粪肥含氮率分别取 0.238%、0.351%、1.014%、1.032%<sup>[37]</sup>;

$N_{fertilizer\ i}$  为  $i$  省份使用的化肥含氮量 (t), 为氮肥折纯量与复合肥中氮折纯量 (通常为氮肥折纯量的 1/3) 之和;  $N_{soil\ i}$  为  $i$  省份土壤氮蓄积量 (t), 可通过各类作物播种面积与单位面积氮蓄积量的乘积算得 (参数参考张晖等<sup>[36]</sup>的研究);  $N_{crop\ i}$  为  $i$  省份作物生产耗氮量 (t), 可通过某种农产品产量与其单位耗氮量的乘积求得;  $N_{max}$  为水环境承载力标准, 本文取欧盟农业政策推荐标准 50 mg/L; 0.4 指水环境污染负荷报警临界值, 即超过 0.4 时则水体氮含量对环境开始产生威胁<sup>[38]</sup>。当  $PW_i$  的数值为负时, 意为环境中不存在过剩氮, 即不需要额外水资源稀释氮素。

### 1.1.3 各省份水土资源环境承载状态评价

本文基于环境可持续视角, 分别从耕地资源承载力和水资源承载力两个维度评价各地区的农业资源环境承载盈亏状态。耕地资源的承载盈亏状态为:

$$BLS_i = AA_{arable\ i} - TAD_{arable\ i} \quad (6)$$

式中:  $BLS_i$  指  $i$  省份耕地资源盈亏量 ( $10^3\ \text{hm}^2$ ), 当值为正时, 表明该地区耕地资源有盈余, 否则该地区耕地资源不足;  $AA_{arable\ i}$  指  $i$  省份现有耕地资源总量 ( $10^3\ \text{hm}^2$ )。

本文将水资源承载盈亏状态分两种情况: 一种为水量型盈亏, 即是否能满足农业用水需求; 另一类为水质型盈亏, 即是否能满足农业用水和环境净化用水需求。

水量型盈亏状态的计算公式为:

$$BWS_{quan\ i} = AUW_i - 0.431 \times AW_i \quad (7)$$

水质型盈亏状态的计算公式为:

$$BWS_{qual\ i} = AUW_i - 0.431 \times TWD_i \quad (8)$$

式中:  $BWS_{quan\ i}$  和  $BWS_{qual\ i}$  分别指  $i$  省份水量型和水质型水资源盈亏量 ( $10^8\ \text{m}^3$ ), 当值为正时, 表明该地区水资源有盈余, 否则该地区水资源不足;  $AUW_i$  为  $i$  省份的农业可利用水资源总量 ( $10^8\ \text{m}^3$ ), 即  $i$  省份水资源总量减去其工业用水量、生活用水量和人工生态环境补水量的剩余水量。据研究, 农作物生长实际所需的水源 43.1% 为蓝水 (灌溉水), 故取系数为 0.431<sup>[39]</sup>。

### 1.1.4 中国省域耕地与水资源匹配状态评价

中国省域的耕地和水资源的盈亏状态用供养的“人数”作为统一量纲来表征。按照“木桶原理”, 判断各省份耕地资源和水量型/水质型水资源的盈余或赤字, 以其供养“人数”低值作为依据。耕地资源与水量型和水质型水资源匹配, 将其分别称为 A 类匹配和 B 类匹配:

A 类匹配: 即耕地资源与水量型水资源组合的农业资源盈亏  $FS_{quan\ i}$  取值, 表达式如下:

$$FS_{quan\ i} = \min \left\{ \frac{BLS_i}{ADC_{arable\ i}}, \frac{BWS_{quan\ i}}{AWC_i} \right\} \quad (9)$$

B 类匹配: 耕地资源与水质型水资源组合的农业资源盈亏  $FS_{qual\ i}$  取值, 表达式如下:

$$FS_{qual\ i} = \min \left\{ \frac{BLS_i}{ADC_{arable\ i}}, \frac{BWS_{qual\ i}}{AWC_i} \right\} \quad (10)$$

当  $FS_{quan\ i}$  和  $FS_{qual\ i}$  为正值, 指  $i$  省份的水土资源生产的粮食可额外满足农产品需求的人数 (万人); 为负值, 意味着  $i$  省份的水土资源生产的粮食无法满足农产品需求的当



地人数（万人）。 $ADC_{arable_i}$  为  $i$  地区人均耕地需求面积（ $hm^2/人$ ），本文主要考虑各省份农产品自我保障，故可通过各省份农产品消费所需耕地总面积除以其人口数量求得； $AWC_i$  为  $i$  地区人均农产品消费的所需生产用水量（ $m^3/人$ ），可通过各省份农产品消费量所需生产用水除以其人口数量求得。

1.2 数据来源

为避免单一年份因市场或灾害等原因导致的数据较大波动，采用2016年、2017年和2018年三年各省份相关数据的均值，有关各类农产品生产用水及农业污染物净化用水参数参考相关研究。本文涉及的各省（市、自治区）（不包括港澳台地区）各类农作物播种面积、总产量、全国平均单产、人均消费量、氮肥折纯量与复合肥中氮折纯量、耕地资源面积、水资源总量等统计数据源于2017年、2018年、2019年《中国统计年鉴》；各种作物的单位面积用种量数据来源于2017年、2018年、2019年《全国农产品成本收益资料汇编》；畜禽存栏或出栏数量来源于2017年、2018年、2019年《中国农村统计年鉴》；各省（市、自治区）工业用水、生活用水、人工生态环境补水的用水量数据来源于2017年、2018年、2019年《中国水利统计年鉴》。

2 结果分析

2.1 中国耕地资源供需平衡状况

从各省（市、自治区）耕地需求看，据式（1）~式（3）算得各省份满足自己农产品需求所需的耕地面积由大到小依次为（表1）：山东位居第一，为 $5573.5\times10^3\text{ hm}^2$ ；广东、河南、河北位居第二、三、四位，在 $4000\times10^3\sim5000\times10^3\text{ hm}^2$ 之间；四川、江苏、浙江、黑龙江、云南、辽宁依次位居第五至十位，耕地需求量均在 $3000\times10^3\sim4000\times10^3\text{ hm}^2$ ；安徽、陕西、山西、广西、湖北、贵州、湖南、甘肃、吉林、内蒙古耕地需求量在 $2000\times10^3\sim3000\times10^3\text{ hm}^2$ ；新疆、江西、福建、重庆、北京耕地需求量在 $1000\times10^3\sim2000\times10^3\text{ hm}^2$ ；上海、天津、海南、宁夏、青海、西藏的耕地需求量在 $1000\times10^3\text{ hm}^2$ 以下。满足全国人民农产品需求所需总耕地面积为 $74629.4\times10^3\text{ hm}^2$ 。

在耕地资源供需状态方面，根据式（6）算得中国耕地资源赤字的省份有6个，盈余的省份有25个（表2）。耕地资源赤字的地区主要分布于东部沿海经济发达省市，广东、浙江两省的耕地赤字最大，其缺口在 $1000\times10^3\sim1980\times10^3\text{ hm}^2$ ；其次是北京和上海，两市耕地需求缺口在 $500\times10^3\sim1000\times10^3\text{ hm}^2$ 之间；第三档

表1 中国各省（市、自治区）的耕地需求  
Table 1 Arable requirement of different provinces in China ( $10^3\text{ hm}^2$ )

地区	耕地需求	地区	耕地需求
山东	5573.5	湖南	2311.3
广东	4582.6	甘肃	2251.8
河南	4302.0	吉林	2172.8
河北	4166.2	内蒙古	2104.6
四川	3822.6	新疆	1646.4
江苏	3732.7	江西	1638.8
浙江	3169.1	福建	1569.1
黑龙江	3150.7	重庆	1450.3
云南	3109.7	北京	1128.7
辽宁	3020.7	上海	950.2
安徽	2987.9	天津	934.2
陕西	2786.0	海南	590.9
山西	2751.8	宁夏	479.0
广西	2663.4	青海	386.2
湖北	2551.1	西藏	315.4
贵州	2329.4		

为天津和福建，两地的耕地缺口在 $500\times 10^3\text{ hm}^2$ 以下。其他省（市、自治区）耕地皆为盈余状态，盈余量大的省（自治区）主要分布在东北和内蒙古，其中黑龙江的耕地资源盈余量最大（ $12696.44\times 10^3\text{ hm}^2$ ）；其次为内蒙古和吉林，盈余量在 $4500\times 10^3\sim 8000\times 10^3\text{ hm}^2$ 。中部的河南、安徽和湖北等省，西部的新疆、甘肃、云南、四川等耕地盈余量也较大，在 $2500\times 10^3\sim 4500\times 10^3\text{ hm}^2$ 。河北、贵州、山东、辽宁、湖南、广西等地区耕地盈余量在 $1500\times 10^3\sim 2500\times 10^3\text{ hm}^2$ 之间。江西、山西、陕西、重庆、江苏、宁夏、青海、海南和西藏等地区耕地盈余量在 $1500\times 10^3\text{ hm}^2$ 以下。

全国现有的耕地总面积为 $134894.50\times 10^3\text{ hm}^2$ ，是需求量的1.81倍，说明全国现有耕地资源完全可以满足自身农产品食用和再生产需求，绝大部分省份的耕地也能实现农产品自给。就各省（市、自治区）而言，80%以上省份的耕地资源也可满足自己农产品需求，耕地盈余量较大的省份分布在东北、西南、西北地区，主要原因在于这些地区地广人稀，耕地面积大，人口数量少；而耕地资源赤字的东部沿海几个经济发达省份，或人口稠密、城市建设占地面积大，或山地分布广，耕地面积十分有限。此外，各省份的气候条件和种植结构不同，复种指数存在差异，也对耕地盈亏量产生一定的影响，但决定耕地供需平衡的仍然是地区人口数量和耕地面积的大小。

2.2 中国水资源供需平衡状况

2.2.1 当前粮食消费水平下农产品生产的水资源供需空间差异

按照式（4）和式（5）算得，中国各省（市、自治区）满足自身需求的农产品生产虚拟用水量依次为（表3）：山东、广东、河南虚拟用水量最高，均超过 $600\times 10^8\text{ m}^3$ ；四川、江苏、河北、湖南、广西5省区虚拟用水量较高，为 $410\times 10^8\sim 510\times 10^8\text{ m}^3$ ；安徽、湖北、浙江、云南4省虚拟用水量为 $300\times 10^8\sim 400\times 10^8\text{ m}^3$ 。江西、辽宁、陕西、黑龙江、福建、山西、贵州7省的所需农产品生产虚拟用水量为 $200\times 10^8\sim 300\times 10^8\text{ m}^3$ ，新疆、重庆、甘肃、吉林、内蒙古、上海、北京所需农产品生产虚拟用水量较低，为 $100\times 10^8\sim 200\times 10^8\text{ m}^3$ 。天津、海南、宁夏、青海、西藏因人口最少，所需农产品的生产虚拟用水量最少，都在 $100\times 10^8\text{ m}^3$ 以下。满足全国国人需求的农产品生产虚拟用水量共需 $8852.57\times 10^8\text{ m}^3$ 。

根据式（7）算得，中国绝大多数省份水资源可满足自身农产品生产需求用水（表4），水量型水资源从西南、东北向华北平原地区由盈变亏。山东、上海、河北、北京、天津、河南、江苏和宁夏8个省（市、自治区）处于水量型缺水状态，其中，山东农业用

表2 中国省域耕地资源供需状态

Table 2 Supply-demand balance status of different

provinces in China						( $10^3\text{ hm}^2$ )
排序	地区	耕地供需状态	排序	地区	耕地供需状态	
1	广东	-1980.27	17	湖南	1838.98	
2	浙江	-1192.90	18	辽宁	1951.87	
3	北京	-914.18	19	山东	2021.95	
4	上海	-758.94	20	贵州	2193.16	
5	天津	-497.38	21	河北	2353.26	
6	福建	-232.44	22	湖北	2687.89	
7	西藏	128.82	23	安徽	2879.09	
8	海南	131.55	24	四川	2905.16	
9	青海	203.68	25	云南	3101.74	
10	宁夏	810.53	26	甘肃	3123.71	
11	江苏	839.88	27	新疆	3585.46	
12	重庆	923.77	28	河南	3809.82	
13	陕西	1199.11	29	吉林	4816.10	
14	山西	1304.68	30	内蒙古	7161.95	
15	江西	1445.93	31	黑龙江	12696.44	
16	广西	1726.61				

表3 中国各省（市、自治区）的水资源需求量

Table 3 Water demand of different provinces in China (10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

地区	粮食生产虚拟耗水量	农业污染物净化需水量	地区	粮食生产虚拟耗水量	农业污染物净化需水量
山东	678.59	855.05	福建	230.30	435.11
广东	677.39	763.27	山西	223.10	140.44
河南	659.61	939.37	贵州	221.41	230.61
四川	504.43	549.86	新疆	188.67	619.10
江苏	500.68	669.46	重庆	187.36	252.54
河北	484.22	608.88	甘肃	166.27	183.05
湖南	428.75	477.28	吉林	165.90	213.14
广西	415.62	566.72	内蒙古	164.54	518.62
安徽	386.41	559.59	上海	127.85	21.75
湖北	375.95	604.08	北京	113.85	30.86
浙江	326.41	221.33	天津	84.43	43.82
云南	313.26	611.41	海南	64.73	141.87
江西	281.11	223.08	宁夏	46.57	99.72
辽宁	267.49	351.52	青海	32.55	67.91
陕西	265.40	491.71	西藏	17.94	61.99
黑龙江	251.76	64.99			

表4 中国水量型水资源供需平衡状态的空间分布

Table 4 Water supply-demand balance status based on food production demand in different provinces of China (10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

排序	地区	水量型水资源需求量	排序	地区	水量型水资源需求量
1	山东	-105.04	17	安徽	656.72
2	上海	-98.97	18	黑龙江	719.22
3	河北	-95.60	19	青海	766.10
4	北京	-49.70	20	浙江	789.08
5	天津	-36.69	21	新疆	866.28
6	河南	-26.79	22	贵州	891.97
7	江苏	-23.46	23	湖北	895.83
8	宁夏	-17.51	24	福建	1116.77
9	山西	2.91	25	江西	1462.91
10	辽宁	85.84	26	湖南	1495.47
11	甘肃	151.74	27	广东	1543.31
12	陕西	214.71	28	广西	1862.47
13	内蒙古	277.52	29	云南	1983.75
14	吉林	345.43	30	四川	2262.19
15	海南	390.57	31	西藏	4671.24
16	重庆	462.38			

水缺口最大，超过100×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。河北、河南、宁夏水资源匮乏，农业用水也有一定的缺口；人口密度高的上海、北京、天津和江苏农业用水缺口也较大。水盈余量最大的地区为西藏，达4671.24×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；其次为四川、云南、广西、广东、湖南和江西，在1200~

2300×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；再次为福建、湖北、贵州、新疆，水盈余量在800×10<sup>8</sup>~1200×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；浙江、青海、黑龙江、安徽等省份的水盈余量在500×10<sup>8</sup>~800×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；重庆、海南和吉林农业用水盈余在300×10<sup>8</sup>~500×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；其余的省份水资源盈余量较小，在0~300×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。可见，从农业生产用水角度，目前气候较干旱的华北平原、宁夏平原和人口稠密的大都市区水资源紧缺；人口稀少的青藏高原、新疆、黑龙江等地区，以及降水丰富的西南、江南和华南地区水资源较为丰富。就全国而言，可供农业用水资源总量为27276.13×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>，是农业生产所需蓝水（3815.46×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>）的7.15倍。因此，中国可供农业生产的水资源完全可满足全国人民所需粮食的生产用水需求。

2.2.2 当前农业生产状态下农产品可持续生产的水资源供需平衡状态

为保持农田环境可持续，中国各省份农产品生产中农业污染物净化亦需一定的用水量，且高于生产用水量。表3显示，河南、山东、广东的农业污染物净化需水量仍然最大，位居前三位，分别达939.37×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>、855.05×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>和763.27×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；江苏、新疆、云南、河北和湖北农业污染物净化需水量也较大，在600×10<sup>8</sup>~700×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；广西、安徽、四川、内蒙古农业污染物净化需水量在500×10<sup>8</sup>~600×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；陕西、湖南、福建3省份农业污染物净化需水量在400×10<sup>8</sup>~500×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；辽宁、重庆、贵州、江西、浙江、吉林农业污染物净化需水量200×10<sup>8</sup>~400×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>；甘肃等10省份农业污染物净化用水量相对较少，均在200×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>以下。特别需要指出的是，黑龙江因作物消耗的氮素大于环境蓄积、畜禽粪便和施入化肥中的氮含量，因此数值为负，故不需要额外的水净化氮素。综合来看，保证环境可持续性而额外需要农业污染物净化用水为11488.14×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

根据式（8）算得，中国各省满足自身粮食需求的农业生产用水水质型水资源盈亏状态（表5）。与水量型水资源供需平衡状态的空间分布一致，水质型水资源也是从西南和东北向华北平原由盈转亏，水质型缺水的省份有13个。河南、山东和河北水资源赤字严重，在700×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>以上，其中河南水资源缺口最大达966.16×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。其次为江苏、陕西和辽宁，水资源缺口在250×10<sup>8</sup>~700×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；再次为内蒙古、山西、上海和宁夏，水资源缺口在100×10<sup>8</sup>~250×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>之间；北京、天津和甘肃也存在一定的水质型水资源赤字，均在100×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>以下。水资源足以维持其农产品自给的环境可持续生产地区主要分布在西藏、四川、云南、广西、江西、湖南、黑龙江、广东、青海、福建、贵州和浙江等地，水盈余量都有500×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>以上；其余水资源可自给的省份，水盈余量

表5 中国省域水质型水资源供需状态  
Table 5 Water supply-demand balance status based on both food production and pollutant purification demand in different provinces of China (10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

排序	地区	总需水	排序	地区	总需水
1	河南	-966.16	17	新疆	247.1854
2	山东	-960.093	18	海南	248.6977
3	河北	-704.478	19	湖北	291.7548
4	江苏	-692.918	20	浙江	567.7503
5	陕西	-276.996	21	贵州	661.3655
6	辽宁	-265.675	22	福建	681.6619
7	内蒙古	-241.104	23	青海	698.1985
8	山西	-137.527	24	广东	780.0428
9	上海	-120.718	25	黑龙江	784.2153
10	宁夏	-117.226	26	湖南	1018.194
11	北京	-80.5617	27	江西	1239.831
12	天津	-80.513	28	广西	1295.744
13	甘肃	-31.3153	29	云南	1372.337
14	安徽	97.13144	30	四川	1712.332
15	吉林	132.2873	31	西藏	4609.25
16	重庆	209.8384			



均在  $300\times10^8\text{ m}^3$  以下。总体来看，中国水质型缺水的省份约占 38%，多为粮食主产区，农业资源环境可持续性不容乐观。满足全国人民农产品食用和再生产需求的环境可持续农业用水需  $15303.60\times10^8\text{ m}^3$ ，全国可供农业利用的水资源是其 1.78 倍。从全国来看，中国可供农业生产水资源可保证环境可持续的农业用水需求。

从结果看，全国水资源总量皆可满足农业生产和污染物净化用水需求，与其他类似研究结果一致<sup>[8]</sup>。然而，由于水资源空间分配不均以及因人口数量、耕地面积和作物种植结构的差异，导致省间水资源供需存在严重不匹配，从青藏高原、西南、东北向华北平原地区由盈余转为严重赤字。水质型缺水大增的原因可能是多年来化肥在农业生产中的过度施用，使得氮素在土壤中大量蓄积，同时畜牧业快速发展导致粪肥增加，加大了土壤氮输入量<sup>[1,4]</sup>，使得环境过剩氮稀释需要大量的水资源，这在河南、山东、河北、江苏等农业大省表现得尤为突出。

2.3 中国省域水土资源人口承载盈亏状况

2.3.1 A类水土资源匹配的中国省域承载力状况

计算得出，各省份农产品自给所需实际人均水资源量约  $511.13\text{ m}^3/\text{人}$ ，但因热量条件和社会经济发展等因素的地域差异，各省份复种指数存在较大地域差异，各省份满足农产品需求所需的实际人均耕地面积在  $0.027\sim0.086\text{ hm}^2/\text{人}$ （表6）。按照式（9）算得，在A类水土资源匹配下，水土资源供养现有人口有盈余的省份有 20 个，无力承载现有人口的省份有 11 个，需要从外部调入农产品。就全国而言，水土资源承载力盈余 73028.44 万人。从水土资源匹配来看，耕地资源人口承载力低于其水资源的省份居多，共有 19 个，主要分布于长江以南地区、青藏高原、西北，以及北京和天津人口密集的北方特大城市；水资源

表6 A、B类水土资源匹配下承载力			
Table 6 Population carrying capacity of arable land and water under the A and B scenarios			
地名	人均耕地需求/hm <sup>2</sup>	A类匹配供养人数/万人	B类匹配供养人数/万人
黑龙江	0.058	14055.98 <sup>*</sup>	15326.15 <sup>*</sup>
湖北	0.035	7703.50	5701.85 <sup>*</sup>
四川	0.038	7612.51	7612.51
安徽	0.039	7355.59	1898.27 <sup>*</sup>
新疆	0.049	7331.90	4830.82
吉林	0.063	6750.88 <sup>*</sup>	2585.33 <sup>*</sup>
湖南	0.028	6505.32	6505.32
云南	0.054	5740.13	5740.13
内蒙古	0.061	5423.57 <sup>*</sup>	-4711.96 <sup>*</sup>
江西	0.031	4736.03	4736.03
贵州	0.054	4058.70	4058.70
广西	0.043	4043.61	4043.61
甘肃	0.069	2965.47 <sup>*</sup>	-612.00 <sup>*</sup>
重庆	0.039	2360.08	2360.08
陕西	0.058	2081.62	-5413.42 <sup>*</sup>
辽宁	0.058	1677.69 <sup>*</sup>	-5192.16 <sup>*</sup>
青海	0.058	349.86	349.86
海南	0.052	252.07	252.07
西藏	0.089	145.41	145.41
山西	0.064	56.92 <sup>*</sup>	-2687.73 <sup>*</sup>
宁夏	0.054	-342.12 <sup>*</sup>	-2290.98 <sup>*</sup>
江苏	0.038	-458.47 <sup>*</sup>	-13541.91 <sup>*</sup>
河南	0.033	-523.57 <sup>*</sup>	-18881.94 <sup>*</sup>
福建	0.036	-643.34	-643.34
天津	0.057	-878.76	-1573.49 <sup>*</sup>
北京	0.051	-1791.65	-1791.65
河北	0.044	-1868.36 <sup>*</sup>	-13767.81 <sup>*</sup>
上海	0.038	-1988.67 <sup>*</sup>	-2359.23 <sup>*</sup>
山东	0.043	-2052.83 <sup>*</sup>	-18763.37 <sup>*</sup>
浙江	0.051	-2344.36	-2344.36
广东	0.037	-5286.27	-5286.27
全国	0.044	73028.44	-33715.50

注：\*为水资源人口承载量低于耕地人口承载量。

人口承载力低于其耕地的省份12个,集中分布在北方的华北平原和东北地区,另有西部的甘肃、宁夏和东部的江苏和上海。总的来说,全国以耕地人口承载量低于水资源的省份为主,说明耕地资源仍是中国粮食生产的主要限制因素;黑龙江省的水土资源承载力盈余量最大,达14055.98万人,是全国最重要的粮食供应地,湖北、四川、安徽、新疆、吉林、湖南、云南、内蒙古等省(自治区)水土资源承载力盈余也在5000万人以上;广东、浙江以及华北平原地区的水土资源匹配度差,水土资源承载力赤字较大,仅广东省因耕地资源短缺,赤字达5286.27万人。

### 2.3.2 B类水土资源匹配下的中国省域人口承载盈亏状况

按照式(10)算得(表6),在B类水土资源匹配下,水土资源承载力有盈余的省份下降到15个,无法实现农产品自给自足的省上升到16个。就全国而言,如果考虑农业资源环境的可持续,目前水土资源不足生产以满足全国人民需求的农产品,大约有33715.50万人的农产品消费需要从国外进口,说明水资源环境问题是当前中国农业可持续发展的重要问题。从水土资源匹配来看,分布与A类匹配总体一致,耕地资源承载力低于其水资源的省份共有15个,较A类匹配有所减少;相反情况的省份16个,增加了陕西、天津、安徽和湖北。黑龙江省由于过剩氮为负值,水质型水土资源组合的承载力盈余量较水量型大,盈余量为15326.15万人;四川、湖南、云南盈余量为5000万人以上,水资源很丰富,但耕地资源是农产品生产的短板;河南、山东、河北、江苏等地承载力赤字分别达13000万人以上,其中河南最高达到18881.94万人,说明水资源是这些省农业可持续生产的主要约束。在生态文明建设背景下,未来需要考虑通过大力发展节水农业、调整农业生产布局和发展国际粮仓,以降低这些地区农业生产的环境压力。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论与讨论

本文得到如下主要结论:

(1) 在现有农业生产和消费水平条件下,只考虑食用、再生产用种和不可避免的损耗三个方面,中国耕地资源总量是耕地总需求量的1.81倍,即可生产足够供养中国人的粮食。耕地资源省际差异巨大,东部沿海发达省市的耕地粮食生产力难以满足自身需求,而东北三省、内蒙古、新疆、甘肃、云南、四川等地广人稀的地区耕地有较大盈余,是保障中国农产品自给的重点区。这一结果与其他学者关于耕地资源赤字空间分布的研究相似<sup>[18]</sup>,但耕地赤字省份数量较其结果少很多,原因可能在于过去八九年农业科技进步和农业生产趋向地域专业化带来的单产大幅上升<sup>[41]</sup>,而核算出的耕地面积则无质量差别,降低了人均耕地需求,本文只采用了17类农产品消费全国平均值推算出的结果总体上也降低了人均耕地需求量。本文主要考虑人们日常消费农产品类型的数量、再生产的用种量和当前水平的粮食损耗量,与消费不直接相关的农产品消费(如工业用粮占我国粮食总消费近1/4)未被列入,因此也是导致算得的农产品需求比实际情况要低,是所需耕地也较少的最重要原因之一。

(2) 中国现有水资源总量是水量型和水质型农业用水需求量的7.15倍和1.78倍,无论是否考虑环境可持续性,中国水资源总量皆可满足生产中国人所需粮食的农业用水需求。但是农业水资源供需状态省际差异很大,目前粮食主产区——华北平原、宁夏以及

像上海这样特大城市水资源匮乏,无论是水量型还是水质型水资源,赤字皆十分严重,已威胁到了农业可持续发展;青藏高原、长江以南省份农业可用水资源较为丰富。本文水量型水资源赤字省份与封志明等<sup>[19]</sup>关于中国人口分布的水资源限制省份的空间分布高度一致,但是水质型水资源赤字的省份明显增多,主要分布在长江以北的第二、三阶梯地区。可见,考虑环境可持续性,中国北方地区农业生产的水资源限制相当严重。主要原因在于两个方面:一是因降水量少导致农业可用水资源少,净化农业污染物的水资源更欠缺;二是因多属于平原地区,以高化学投入品和灌溉为特征的农业现代化生产推广更快,加速了这些地区的水质型缺水。本文在计算水质净化需水时,畜禽粪便含N量基于各省份年出栏数推算,较实际结果偏小,反映出实际水资源限制可能更为严重。

(3) 水土资源空间不匹配大大制约了中国农业的粮食生产潜力。水资源丰富的青藏高原、广东、四川、云南、广西、江西、福建等地区耕地资源短缺,而黑龙江、内蒙古、河南、吉林、安徽、河北等耕地较丰富的省份,水资源却匮乏。只考虑农业生产用水情景下的水土资源匹配状态,中国粮食生产可以满足全国需求;但考虑环境污染净化用水下的水土资源匹配状态,则中国农产品生产难以实现自给,承载力赤字达33715.50万人,其中华北、江淮地区及东部沿海省市都是赤字区,需要大量运进农产品。

(4) 本文基于各省份当前水土资源匹配下的农业生产力和常住人口农产品需求而开展的研究,研究结果与当前各省份农产品生产实际情况可能存在一定的差异。主要原因在于:一是以省级行政区为基本单元,省内的水土资源空间不匹配问题无法反映,特别是面积较大、内部气候和地形差异大的省份,这会导致一些省份的人口承载力大于或小于实际情况;二是以静态视角研究水土资源匹配问题,没有考虑区际调水等人为干预,如河南、河北、北京和天津每年接受南水北调的水资源量 $95 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[42]</sup>,缓和了其水资源短缺的问题,增强了其人口承载力;三是华北平原等粮食主产区因没有充分考虑本地资源环境可持续问题,出现以水土资源过度使用换取粮食产量,使得实际人口承载力高于本文结果,但造成地下水过度开采引起的地下漏斗和环境污染等问题<sup>[5]</sup>;四是由于缺乏最新作物生产耗水等研究,本文采用的某些参数有些偏老,也可能造成结果的偏差。由于各因素导致的正负向作用,综合而言结果能相对准确地反映当前中国水土匹配现状下的农产品供需实际情况。此外,本文是基于各省份水土资源现状和人口现状核算出的结果,没有考虑到社会经济因素对农业生产的影响,如耕地复种指数下降、耕地抛荒造成的地区粮食产量下降<sup>[43]</sup>。在新冠肺炎、自然灾害频发和反全球化的国际背景下,研究结果与实际农业生产状况的差异,恰好对于未来农业生产布局调整、农业结构调整和国内国际农产品贸易策略的安排,提升新形势下的中国粮食安全具有一定参考意义。

### 3.2 政策建议

以资源环境保护为目标导向,未来中国农业在生产布局和粮食生产与贸易方面可采取如下措施:

(1) 在区域农业功能定位上,要扭转粮食重心北移的局面。除继续稳固黑、吉粮仓功能外,应加强长江以南的湘、赣、鄂、川、滇、黔、渝、桂等水土资源有较大盈余地区的农业开发,通过政策激励和科技投入提升其农业生产能力;重视新疆、甘肃等地广人稀地区的农业生产潜力挖掘,以减小华北平原粮食主产区的水资源压力,促进粮食生产的可持续发展。

(2) 优化农业支持政策,减轻水土资源赤字地区的农业生产强度。在长江以南水资源丰富的地区,加大高标准农田设施建设和省工省力的农机研究利用<sup>[44]</sup>,支持水稻、蔬菜和水果种植等适宜作物种植,以满足中国人民不断升级的食物消费需求;在西北地区,发展耗水量较低的薯类作物,加大节水保热技术和农业设施建设投入,强化中国主粮的保障能力;在华北平原地区发展节水抗旱作物种植,加强农业科技投入和农民培训,提高水资源使用效率,减少化肥、农药使用量,缓解其水资源的压力。

(3) 加强相关政策引导,改善水土资源与常住人口不匹配问题。例如,通过产业布局的宏观调控,将耗水产业及劳动密集型产业转移至水土资源承载力有盈余的省份,以缓解赤字严重省份的压力;优化现有农业补偿政策,加大粮食主产区的生态补偿力度,引导农业生产向节水化、绿色生态化发展。

(4) 调整粮食进口和农业国际合作策略。适度提高小麦、玉米、大豆等粮食的进口量,以减轻主产区华北平原、江苏北部等地区水土资源环境压力,促进其土壤和水环境质量恢复;积极与水土资源丰富、具有地缘优势且与我国贸易往来便利的地区(如中亚地区、俄罗斯)建立稳定全方位的农业合作关系,利用外部水土资源作为国内农产品生产的补充。

## 参考文献(References):

- [1] GUO J H, LIU X, ZHANG J Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968): 1008-1010.
- [2] 王秀丽, 关小克, 张凤荣, 等. 资源环境约束下的天津市盐渍土农业利用研究. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1764-1772. [WANG X L, GUAN X K, ZHANG F R, et al. Agricultural utilization of saline-alkaline soil under the constraint of resources and environment in Tianjin. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1764-1772.]
- [3] 仇相玮, 胡继连. 我国农药使用量增长的驱动因素分解: 基于种植结构调整的视角. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 325-333. [QIU X W, HU J L. Decomposition and calculation of contribution factors of pesticide use increase in China: Based on the perspective of cropping structure adjustment. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(3): 325-333.]
- [4] HE G, ZHAO Y, WANG L, et al. China's food security challenge: Effects of food habit changes on requirements for arable land and water. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 739-750.
- [5] SU Y, GUO B, ZHOU Z, et al. Spatio-temporal variations in groundwater revealed by GRACE and its driving factors in the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Sensors*, 2020, 20: 922.
- [6] FENG Z, SUN T, TAMARTASH R, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: From single-factor carrying capacity research to comprehensive research. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(2): 125-134.
- [7] SUN T, FENG Z, YANG Y, et al. Research on land resource carrying capacity: Progress and prospects. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(4): 331-340.
- [8] HE L, DU Y, WU S, et al. Evaluation of the agricultural water resource carrying capacity and optimization of a planting-raising structure. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106456, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106456>.
- [9] LIU R, PU L, ZHU M, et al. Coastal resource-environmental carrying capacity assessment: A comprehensive and trade-off analysis of the case study in Jiangsu Coastal Zone, Eastern China. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 186: 105092, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105092>.
- [10] 李慧, 周维博, 庄妍, 等. 延安市农业水土资源匹配及承载力. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 156-162. [LI H, ZHOU W B, ZHUANG Y, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an city. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(5): 156-162.]
- [11] 文倩, 李小弯, 鄢雨早, 等. 河南省农业水土资源承载力的时空分异. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 104-112. [WEN Q, LI X W, YUN Y H, et al. Temporal-spatial differentiation of carrying capacity of agricultural water and soil re-



- sources in Henan province. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(3): 104-112.]
- [12] FU J, ZANG C, ZHANG J. Economic and resource and environmental carrying capacity trade-off analysis in the Haihe River Basin in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122271, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122271>.
- [13] 蔡运龙, 傅泽强, 戴尔阜. 区域最小人均耕地面积与耕地资源调控. *地理学报*, 2002, 57(2): 127-134. [CAI Y L, FU Z Q, DAI E Z. The minimum area per capita of cultivated land and its implication for the optimization of land resource allocation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 127-134.]
- [14] 郑微微, 易中懿, 徐雪高. 中国农业生产水环境承载力分析. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(5): 5134-5140. [ZHENG W W, YI Z Y, XU X G. Analysis on water environmental carrying capacity of agricultural production in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(5): 5134-5140.]
- [15] 刘静暖, 孙媛媛, 杨扬. 中国土地原生态承载力变化趋势分析. *当代经济研究*, 2014, (3): 49-54. [LIU J N, SUN Y Y, YANG Y. Analysis of the change trend of China's original ecological carrying capacity. *Contemporary Economic Research*, 2014, (3): 49-54.]
- [16] 林永钦, 齐维孩, 祝琴. 基于生态足迹的中国可持续食物消费模式. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 338-347. [LIN Y Q, QI W H, ZHU Q. Chinese sustainable food consumption pattern based on ecological footprint model. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 338-347.]
- [17] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹. *资源科学*, 2011, 33(6): 1145-1152. [WU Y, WANG X K, LU F. Ecological footprint and water footprint of food consumption in Beijing. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1145-1152.]
- [18] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究. *地理研究*, 2014, 33(8): 1395-1405. [FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Research on land resources restriction on population distribution in China, 2000-2010. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1395-1405.]
- [19] 封志明, 杨艳昭, 游珍. 中国人口分布的水资源限制性与限制度研究. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1637-1648. [FENG Z M, YANG Y Z, YOU Z. Research on the water resources restriction on population distribution in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1637-1648.]
- [20] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 等. 南疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 176-180. [DENG X J, XIE S Y, CUI T S, et al. Research of the water footprint of cotton consumption and its effect on ecological environment in southern of Xinjiang. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 176-180.]
- [21] 季翔, 刘黎明, 起晓星. 区域耕地粮食生产保障能力及其风险评价方法. *农业工程学报*. 2014, 30(7): 219-226. [JI X, LIU L M, QI X X. Risk assessment method of grain production guarantee capacity of regional cultivated land. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(7): 219-226.]
- [22] 肖玉, 成升魁, 谢高地, 等. 我国主要粮食品种供给与消费平衡分析. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 927-936. [XIAO Y, CHENG S K, XIE G D, et al. The balance between supply and consumption of the main types of grain in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 927-936.]
- [23] 唐华俊, 李哲敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究. *中国农业科学*, 2012, 45(11): 2315-2327. [TANG H J, LI Z M. Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2315-2327.]
- [24] 方净, 吴建毅, 杨富华. 果蔬预冷及冷链物流中外对比研究. *冷藏技术*, 2016, (1): 16-18. [FANG Z, WU J Y, YANG F H. Precooling of garden stuff and cold-chain logistic contrastive study at home and abroad. *Cold Storage Technic*, 2016, (1): 16-18.]
- [25] ZENG Q, ZENG Y. Eating out and getting fat? A comparative study between urban and rural China. *Appetite*, 2018, 120 (1): 409-415.
- [26] 农产品里, 出油率最高的作物是什么? <http://news.wugu.com.cn/article/1054773.html>. [What is the crop with the highest oil yield? <http://news.wugu.com.cn/article/1054773.html>.]
- [27] 黄彩云, 张文彬, 姜淑芬. 我国糖料作物甜菜与甘蔗主要性状指标的比较. *中国糖料*, 2006, (2): 41-44, 54. [HUANG C Y, ZHANG W B, JIANG S F. Comparison of important characters and productive status between sugarbeet and sugarcane in China. *Sugar Crops of China*, 2006, (2): 41-44, 54.]
- [28] XIE H L, LIU G Y. Spatiotemporal differences and influencing factors of multiple cropping index in China during 1998-

2012. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, (11): 1283-1297.
- [29] 谢鸿宇, 陈贤生, 杨木壮, 等. 中国单位畜牧产品生态足迹分析. *生态学报*, 2009, 29(6): 3264-3270. [XIE H Y, CHEN X S, YANG M Z, et al. The ecological footprint analysis of 1kg livestock product of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3264-3270.]
- [30] 谢素华, 杨明高. 人民渠平原灌区油菜需水量及需水规律研究. *四川水利*, 2001, (1): 33-35. [XIE S F, YANG M G. Study on rap's water requirement and regularity in Renmin Qu plain irrigated area. *Sichuan Water Resources*, 2001, (1): 33-35.]
- [31] 石明权, 王晓林, 段莹, 等. 花生生长发育对水分的需求情况. *农学学报*, 2004, (9): 18. [SHI M Q, WANG X L, DUAN Y, et al. Water requirements for peanut growth and development. *Chinese Countryside Well-Off Technology*, 2004, (9): 18.]
- [32] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价. *水利学报*, 2016, 47(9): 1119-1124. [SUN S K, WANG Y B, LIU J, et al. Quantification and evaluation of water footprint of major grain crops in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9): 1119-1124.]
- [33] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995. [CHEN Y M, GUO G S, WANG G X, et al. *Water Demand and Irrigation for Major Crops in China*. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.]
- [34] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究. *农业经济问题*, 2011, (8): 81-87. [RAO J, XU X Y, JI X T. Research on current situation, occurrence mechanism and countermeasures of agricultural non-point source pollution in China. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, (8): 81-87.]
- [35] 葛继红, 周曙东. 农业面源污染的经济影响因素分析: 基于1978—2009年的江苏省数据. *中国农村经济*, 2011, (5): 72-81. [GE J H, ZHOU S D. Analysis of economic influence factors of agricultural non-point source pollution: Based on data of Jiangsu province from 1978 to 2009. *Chinese Rural Economy*, 2011, (5): 72-81.]
- [36] 张晖, 胡浩. 农业面源污染的环境库兹涅茨曲线验证: 基于江苏省时序数据的分析. *中国农村经济*, 2009, (4): 48-53, 71. [ZHANG H, HU H. Verification of Environmental Kuznets Curve for agricultural non-point source pollution: An analysis based on temporal data of Jiangsu province. *Chinese Rural Economy*, 2009, (4): 48-53, 71.]
- [37] 主要有机肥养分含量表. 中国化肥数据. <http://www.fert.cn/1005/2005/9/16/20059161405737185.shtml>. [Nutrient content table of main organic fertilizer. Fertilizer data in China. <http://www.fert.cn/1005/2005/9/16/20059161405737185.shtml>.]
- [38] OENEMA O, VAN LIERE L, PLETTE S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands. *Water Science & Technology*, 2004, 49(3): 101-108.
- [39] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索. *中国农业科学*, 2015, 48(17): 3493-3503. [LI B G, HUANG F. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3493-3503.]
- [40] 陈鹏程, 班洪赞, 田旭. 中国农业生产地区专业化现状及演变规律. *农林经济管理学报*, 2019, 18(1): 54-62. [CHEN P C, BAN H Y, TIAN X. The present situation and evolution of agricultural production areas in China. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2019, 18(1): 54-62.]
- [41] LU C X, LIU A M, XIAO Y, et al. Changes in China's grain production pattern and the effects of urbanization and dietary structure. *Journal of Resource Ecology*, 2020, 11(4): 358-365.
- [42] 张雪. 南水北调“北调”之水都给了谁? 四省市为“受益方”. 中国经济网. [http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201412/26/t20141226\\_4206758.shtml](http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201412/26/t20141226_4206758.shtml). [ZHANG X. Who gets the water from the South-to-North Water Transfer project? The four provinces and cities are "beneficiaries". *China Economic Net*. [http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201412/26/t20141226\\_4206758.shtml](http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201412/26/t20141226_4206758.shtml).]
- [43] 程晓兵, 方银来. 我国农村耕地撂荒原因及对策研究. *现代农业科技*, 2015, (10): 343-345. [CHENG X B, FANG Y L. Abandoned reasons of rural farmland and the countermeasures in China. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015, (10): 343-345.]
- [44] 杨宗辉, 李金锴, 韩晨雪, 等. 我国粮食生产重心变迁及其影响因素研究. *农业现代化研究*, 2019, 40(1): 36-43. [YANG Z H, LI J K, HAN C X, et al. The evolution path of China's grain production base and the influencing factors. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40(1): 36-43.]

## Analyses of supply-demand balance of agricultural products in China and its policy implication

ZHANG Yong-xun, LI Xian-de

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

**Abstract:** Food security is crucial to China's stability, development and international trade order. In this study, provincial-level administrative regions were taken as the basic unit to calculate the soil and water resources demand that can ensure the food self-sufficiency of each province continuously and to evaluate the carrying capacity of water and soil resources in each province. This study calculated the agricultural products for eating and reproducing and unavoidable food loss, without considering the difference of farmland quality in different regions of China. The required data referred to the provincial permanent population, food consumption per capita, data on agricultural products per unit area, and arable land and water resources from statistical yearbooks of China from 2017 to 2019; the arable land and water consumption parameters were obtained from relevant literature. Using ecological footprint and water footprint method, this study results are as follows: The total arable land resource in China is 1.81 times as much as the total demand for arable land, which means that the current arable land resource can fully meet the food production demand of Chinese people. However, there are large differences between provinces. The arable land in provinces or municipalities with a developed economy in coastal China is insufficient. The total available water resources for agriculture are 7.15 times as much as the general agricultural water demand and 1.78 times as much as the agricultural water demand to keep environmental sustainability, respectively. Thus, the available water resources for agriculture can fully meet the agricultural products demand of Chinese people. But the water resource of the North China Plain and Ningxia Hui Autonomous Region, as the important regions producing agricultural products, is deficit; the provinces on the Qinghai-Tibet Plateau and south of the Yangtze River have more available water resources. The spatial mismatch of water and soil resources restricts the crops production potential. If we do not consider the water demand for environmental pollution purification, the matching state of soil and water resources can meet the need of agricultural products nationwide; however, if we consider that, it is difficult to achieve self-sufficiency in agricultural products. There is a huge food deficit in food demand of 337155 thousand persons. Guided by the theory of sustainable development of resources and environment, China should take the following measures to ensure food security: (1) optimizing the distribution of agricultural production; (2) adjusting agricultural structure; (3) moving industries with highly consumed water and labor-intensity to the regions with rich water resources; (4) promoting technological progress, products import, and international cooperation in agriculture in the future.

**Keywords:** food security; resource carrying capacity; supply-demand balance; trades of agricultural products; distribution of agricultural production; cultivated land; water resources