

中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应

金涛^{1,2}

(1. 扬州大学农学院, 扬州 225009; 2. 粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州 225009)

摘要: 粮食种植结构调整会影响农业资源的消耗需求。20世纪90年代中后期以来, 玉米在我国粮食生产中的地位明显提升。以粮食种植结构无调整为参照情景, 一定产量下, 1996-2015年, 在国家层面, 因粮食种植结构调整对水土资源消耗的节省量约占现期需求量的4%左右。在区域层面, 从结构调整对种植面积的减省效应看, 耕地资源相对丰富的北方地区明显高于南方地区; 从对水资源消耗的减省效应看, 北方贫水区也普遍高于南方地区, 干旱度最高的西北地区最高。期间区域分品种粮食生产广泛受到作物种植比例变化的影响。研究结果表明, 要充分利用好南方水热资源, 恢复水稻生产, 主要取决于稻米需求及其种植效益, 而北方地区则要尽可能按降水规律调整农作制度, 合理控制水稻、小麦的种植面积。

关键词: 粮食生产; 结构调整; 粮食需求; 水土资源利用

粮食生产是全球耕地资源和淡水资源消耗的主要部门。中国是农业大国, 也是世界上水土资源相对匮乏的区域之一。中国的粮食问题实质上是水土资源短缺及其在地域分布上的不平衡, 主要表现为南方水多地少, 北方地多水少^[1-5]。粮食生产格局变迁, 不仅体现为粮食产出量的地域分化, 还伴随区域粮食作物配置构成的变化, 这种结构的变化也会影响到农业资源的消耗需求。粮食是水土资源密集型产品, 我国人多地少水缺, 水土资源的地域配置又很不均匀, 因此, 认识粮食生产种植结构调整及其地域变化对资源环境的影响, 对农业可持续发展战略实施有重要意义。

立足于粮食生产布局变化, 学界主要从水土资源配置^[6-8]、耕地资源利用^[9-11]、水资源利用^[12-14]等方面入手, 或评价粮食生产与耕地变化的关系, 或探讨粮食生产格局对资源环境的影响, 或引入虚拟水、虚拟土的概念, 估测粮食产品对水土资源消耗需求的空间后果。上述研究大多侧重粮食生产变化中的生产量, 对其中的作物种植结构变化的关注尚不多见。也有研究认识到粮食作物结构变化中的“单产差”对粮食产量的贡献^[15-16], 进而测评粮食内部结构变化对水土资源利用的影响^[17], 但仅限于粮食“十连增”时段的分析, 还缺乏对我国粮食格局变迁过程的水土资源影响效应的综合论证。

事实上, 随着膳食结构转型, 口粮消费比例在下降, 饲料粮和工业用粮逐渐增加。在人口大国粮食基本自给方针下, 粮食生产种植结构调整是粮食需求结构升级的必然结果。分析这种结构调整的资源环境效应, 某种意义上也可借此理解粮食需求结构转型对

收稿日期: 2018-07-18; 修订日期: 2018-10-19

基金项目: 中国工程院咨询项目 (2017-XY-28); 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100101); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 金涛 (1969-), 女, 江苏无锡人, 博士, 副教授, 研究方向为区域农业发展。E-mail: tjin@yzu.edu.cn

水土资源利用的影响。对此,相关研究思路大多将转型中的各类食物消费需求,或者响应需求变化的食物生产量,归一化为谷物当量或农田当量^[18-19],以估测食物需求扩张对农业资源利用的影响,但仍忽略了需求数量扩张中的需求结构变化的环节,测评结果不足以充分理解粮食需求变化对农业资源环境的影响。

20世纪90年代中后期,我国粮食供求基本实现由长期短缺到总量平衡和丰年有余的历史性转变^[10],粮食供给侧结构调整条件成熟。从资源高效利用出发,所谓合理的生产调整,在土地资源高度短缺地区,以高产品种替代低产品种,优先发展土地节约型作物;在水资源高度短缺地区,则优先选择节水型作物,即生产调整会自发以低耗水作物替代高耗水作物。本文以此为预设,运用情景比较法,以保持粮食作物初始结构不变为参照情景,重点观察20世纪90年代中后期以来我国粮食生产种植结构的调整,分析这一调整过程是否有利于水土资源的节约利用,并解析期间粮食生产变化的区域主导因素,由此作为理解区域粮食生产调整与水土资源利用相互关系的重要线索,为资源约束趋紧下的未来粮食生产结构调整提供可能的参考建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 粮食作物种植结构调整对土地资源消耗的影响测度

按作物单产水平的高低,一般情况下,稻谷>玉米>小麦>薯类>豆类。产量一定下,低产品种需要更多种植面积,某种意义上也意味着需要更多粮食生产土地资源。种植结构调整带来种植面积需求量变化的估测方法如下^[17]:

$$Q = A \cdot Y = \sum a_i \cdot y_i = A \cdot \sum \frac{a_i}{A} \cdot y_i = A \cdot \sum s_i \cdot y_i \quad (1)$$

式中: Q 为粮食产量; A 为粮食播种面积; Y 为粮食单产; a_i 为粮食作物 i 的种植面积; y_i 为 i 作物单产水平; s_i 为 i 作物种植面积占粮食总播种面积的比例。

假定种植结构无调整,即保持初期(0)结构不变,在末期(t)粮食产量一定的条件下:

$$Q_t = A'_t \cdot \sum s_{i0} \cdot y_{it} = A'_t \cdot \sum s_{it} \cdot y_{it} \quad (2)$$

由式(2),无结构调整情景种植面积(A'_t)与实际有结构调整的种植面积(A_t)的关系:

$$A'_t = A_t \cdot \frac{\sum s_{it} \cdot y_{it}}{\sum s_{i0} \cdot y_{it}} \quad (3)$$

$A'_t - A_t$ 的差值,即为产量一定的条件下,相较于结构无调整情景,种植结构调整所节约的种植面积。

1.2 粮食作物种植结构调整对水资源消耗的影响测度

农产品生产所消耗的水资源量,一般由农作物生长发育期间累积的蒸发蒸腾水量估算而得,即国内外通用的农作物产品虚拟水含量^[13]。基于单位质量农产品虚拟水含量的测算值,种植结构调整带来水资源消耗量变化的估测方法如下^[17]:

$$W = \sum a_i \cdot y_i \cdot m_i = A \cdot \sum s_i \cdot y_i \cdot m_i \quad (4)$$

式中: W 为粮食生产所需水量; m_i 为单位质量的作物 i 生长所耗水量。在产量一定的条件下,相对于结构无调整情景(即保持初始结构不变)的耗水量(W'_t),因结构调整带来

的耗水节约量为:

$$W_t' - W_t = A_t' \cdot \sum s_{it} \cdot y_{it} \cdot m_{it} - A_t \cdot \sum s_{it} \cdot y_{it} \cdot m_{it} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),则可测得种植结构调整带来的节水量为 $W_t' - W_t$ 。

1.3 粮食作物产量变化的构成因素分解

某种粮食作物的产量是该粮食作物的单产及其播种面积共同变化的结果,其中,粮食作物播种面积又受耕地面积、复种指数(农作物总播种面积/耕地面积)和作物种植比例(作物播种面积/农作物总播种面积)趋势的影响,即粮食作物产量是作物单产、耕地面积、复种和作物种植比4因素的乘积^[11]。测算这4个因素变化对粮食作物产量影响效应的方法如下^[11,20]:

假设 Q 可以分解成4个因素: X_1, X_2, X_3, X_4 , 且 $Q = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$

$$\Delta Q = Q_t - Q_0 = \sum_k^4 X_{k-effect} \quad (6)$$

$$Q_{k-effect} = \frac{Q_t - Q_0}{\ln Q_t / Q_0} \cdot \ln X_{kt} / X_{k0} \quad (7)$$

1.4 区域划分及数据处理

根据我国地理分区和粮食作物种植制度区域特点,划分六大区域^[21-22](表1),其中,三北地区(东北、华北和西北)为北方粮食产区,长江中下游地区、西南地区 and 东南沿海地区属南方粮食产区。六大区域的基础数据由省级行政区汇总而得。主要粮食作物的产量和播种面积、农作物播种面积、耕地面积数据来自相应年份的《中国统计年鉴》。粮食作物分类中的其他类,由粮食产量及其播种面积减去水稻、小麦等主要作物的产量和面积测得。研究时段为1996-2015年,为去除粮食生产年际波动的影响,取分省作物产量和播种面积的前后3年(1995-1997年和2014-2016年)的平均值,由此测算3年平均的作物单产和种植份额。

关于种植结构调整对水资源消耗影响的分析,由于同一地区的不同作物,或者不同地区的同一作物,生长所消耗的水资源量存在较大的差异。考虑到主要粮食作物产品单位质量虚拟水含量的区域差异,本文基于文献[13]省级尺度的虚拟水参数值,分区域测算省级行政区分作物产品单位质量虚拟水含量的加权平均值,权重取该作物在大区域作物产量的份额,由此得到六大区域的分作物粮食产品单位质量虚拟水含量(表1)。

此外,因素分解中涉及到耕地面积,2009年及以后为第二次全国土地调查统计口径,1996年数据则为第一次全国土地调查的结果。以“二调”数据系列为基础,通过趋势回推,获得2008年与“二调”接轨的耕地数据,基于当年不同调查口径的差值,采用平加法,将1996年耕地面积数据订正为与“二调”接轨数据(表1)。

2 结果分析

2.1 粮食生产结构调整的基本特征

改革开放以来,我国粮食生产从1978年的3.05亿t波动增长至2016年的6.16亿t,期间粮食作物产量构成也有明显变化,稻谷、小麦和玉米的产量份额从1978年的44.9%、17.7%、18.4%,到2016年分别为33.6%、20.9%和35.6%,玉米已替代稻谷成为我国第一大粮食作物(图1)。1996年,我国人均粮食产量首次突破400 kg,随后农业结构进入战

表1 耕地面积数据订正与主要粮食作物产品单位质量虚拟水含量

Table 1 Data revision of provincial cultivated land area and regional virtual water contents in the main grain products

地区	省份	1996年耕地面积/10 ³ hm ²		2008年耕地面积/10 ³ hm ²		单位质量虚拟水含量/m ³ /kg				
		一调结果	二调接轨订正	一调口径	二调接轨订正	水稻	小麦	玉米	大豆	薯类
华北地区	北京	343.9	336.6	231.7	224.4	1.33	1.15	0.83	2.88	1.01
	天津	485.6	488.6	441.1	444.1					
	河北	6883.3	7122.4	6317.3	6556.4					
	山西	4588.6	4598.2	4055.8	4065.4					
	山东	7689.3	7832.3	7515.3	7658.3					
	河南	8110.3	8361.6	7926.4	8177.7					
东北地区	辽宁	4174.8	5119.1	4085.3	5029.6	1.22	1.20	0.78	2.55	1.62
	吉林	5578.4	7065.1	5534.6	7021.3					
	黑龙江	11773.0	15802.2	11830.1	15859.3					
西北地区	内蒙古	8201.0	10242.8	7147.2	9189.0	1.43	1.38	0.88	3.19	1.54
	陕西	5140.5	5083.4	4050.3	3993.2					
	甘肃	5024.7	5764.4	4658.8	5398.5					
	青海	688.0	733.3	542.7	588.0					
	宁夏	1268.8	1448.3	1107.1	1286.6					
	新疆	3985.7	4987.1	4124.6	5126.0					
长江中下游地区	上海	315.1	259.7	244.0	188.6	1.34	1.09	0.96	2.55	1.09
	江苏	5061.7	4896.8	4763.8	4598.9					
	安徽	5971.7	6138.2	5730.2	5896.7					
	江西	2993.4	3252.7	2827.1	3086.4					
	湖北	4949.5	5597.8	4664.1	5312.4					
	湖南	3953.0	4301.0	3789.4	4137.4					
东南沿海地区	浙江	2125.3	2188.4	1920.9	1984.0	1.55	1.26	1.24	2.38	1.14
	福建	1434.7	1443.9	1330.1	1339.3					
	广东	3272.2	3007.1	2830.7	2565.6					
	广西	4407.9	4616.1	4217.5	4425.7					
西南地区	海南	762.1	763.8	727.5	729.2					
	重庆			2235.9	2443.2	1.34	1.55	1.11	2.59	1.42
	四川	9169.1	10152.1	5947.4	6723.1					
	贵州	4903.5	4981.6	4485.3	4563.4					
	云南	6421.6	6588.7	6072.1	6239.2					
	西藏	362.6	443.6	361.6	442.6					

略性调整时期，1996-2015年，我国稻谷、小麦、玉米和三大谷物以外粮食的产量增长率依次为7.0%，14.6%，91.9%和-13.0%，三大谷物以外粮食的产量份额和增产量均有相对缩减态势（图1），三大谷物内部，玉米的地位逐步凸显，期间玉米增产量占粮食总增量的83.3%。

在区域层面，仍以粮食增产构成调整较大的1996-2015年为观察期，三东北地区粮食增量占全国粮食总增量的92.6%，基本主导全国粮食增产格局。东北为最大粮食增产区，

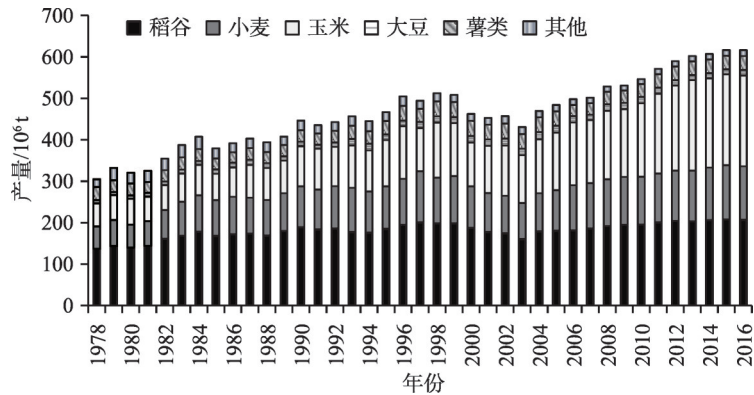


图1 1978-2016年我国粮食产量及其构成变化

Fig. 1 Total amount and structure of grain production in China during 1978-2016

增产以玉米为主，其次稻谷，稻谷增量略超玉米的一半（图2）。小麦、大豆，以及高粱、谷子等杂粮作物种植比例下调明显，被玉米、稻谷替代。华北地区为第二增产区，增产以玉米为主，其次小麦，传统优势作物小麦产量净增，但种植面积及种植比例均有缩减，主要是单产的大幅提升；华北玉米种植比大幅上调，而豆类、薯类和谷子等杂粮种植比明显下降。西北地区也以玉米增产主导，薯类亦扩面增产，被替代品种主要是小麦及谷子等杂粮。长江中下游地区为南方主要增产区，以小麦、稻谷和玉米的增产为主，品种调整中有玉米替代薯类的态势。西南地区稻麦增产有所停滞，尤其小麦种植比例显著下调，玉米、薯类则扩面增产明显。东南沿海地区为粮食减产区，减产主要由水稻大幅减产导致，本区唯玉米有扩面增产（图2）。



注：基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1570号标准地图制作，底图无修改。

图2 1996-2015年三大谷物区域生产变化

Fig. 2 Production change of the three major cereals for 6 regions during 1996-2015

2.2 粮食种植结构调整对土地资源消耗的影响

1996-2015年，我国粮食种植面积扩增约119.3万hm²，实现粮食增产1.26亿t，其中，玉米种植面积比例从21.2%上升到33.0%，小麦和稻谷则从26.4%、28.0%分别下调至21.3%、26.7%。以初期种植结构不变为参照情景，则期间因结构调整节约的粮食种植面积达417.6万hm²，这一面积减省量约占现期种植面积的3.7%，达实际粮食面积扩增量的3.5倍（表2）。可见，在既定产量下，这期间我国粮食作物结构调整有助于缓解耕地资源开发压力。

表2 1996-2015年粮食种植结构调整对粮食种植面积的影响

Table 2 Effect of grain cropping structure adjustment during 1996-2015 on grain sown area

地区	现实增减 /10 ³ hm ²	有调整情景 /10 ³ hm ²	无调整情景 /10 ³ hm ²	因调整节约的面积 /10 ³ hm ²	节约率 /%
东北地区	5641.1	20043.5	22701.2	2657.7	13.3
华北地区	-292.7	27812.9	29742.7	1929.7	6.9
西北地区	923.3	15032.5	17648.1	2615.6	17.4
长江中下游地区	-498.5	25259.8	25527.2	267.4	1.1
东南沿海地区	-4281.1	8390.1	8399.8	9.7	0.1
西南地区	-299.0	16494.4	16717.2	222.8	1.4

在区域层面，因粮食增产对粮食种植面积扩增需求，主要在北方地区。因种植结构调整节约的种植面积数量和节约幅度（节约量占现期种植面积量的比率），也以北方地区较为明显。产量既定条件下，因调整节约的种植面积，东北最大，其次西北，西北的节约幅度最高（表2）。东北主要是高产的稻谷和玉米，对小麦、大豆等相对低产作物的替代，西北是玉米对小麦的替代。如果没有结构调整，要达到现实粮食产量，相对于1996年的初期种植面积，东北、西北和华北还需大幅扩增粮食种植面积。

南方稻作区由于高产作物水稻的种植比例上调空间有限，结构调整对种植面积的减省量相对有限。1996-2015年，西南地区粮食缩面增产，如果没有玉米对小麦的替代，要达到末期产量，粮食种植面积的扩增需求会有明显放大。长江中下游地区由于三大谷物对其他粗杂粮品种的替代，某种程度上也节约了一定的种植面积。粮食缩面减产明显的东南沿海地区，结构调整节约的种植面积最小（表2）。东南沿海地区和长江中下游地区的人地矛盾较为突出，这期间因结构调整而减省的种植面积数量却相对较小。

2.3 粮食种植结构调整对水资源消耗的影响

粮食增产总体倾向于增加我国水资源的消耗量，但增产过程中的粮食种植结构调整，某种程度上有助于缓解粮食生产水资源消耗需求的压力。1996-2015年，全国粮食增产对水资源消耗量的需求增量高达1178.2亿m³，因低耗水作物替代高耗水作物减省的水资源量达到304.7亿m³，节水量占末期粮食生产需水量的4.2%，约占期间实际需求增量的25.9%（表3）。

分地区看，北方地区粮食种植结构调整带来水消耗量的节省，以干旱度最高的西北地区最为显著，本区全年大气降水较少，农业生产主要依赖水浇地，结构调整基本节省的是灌溉水量，因玉米、薯类替代小麦带来的节水量，占到本区粮食生产水资源需求量的近1/8。东北地区和华北地区是我国最主要粮食增产区，也是水资源需求扩增量最大地区，东北地区大幅扩增玉米和稻谷，缩减小麦、大豆和杂粮的种植比例，华北扩大玉米

表3 1996-2015年粮食种植结构调整对粮食生产水资源消耗量的影响

Table 3 Effect of grain cropping structure adjustment during 1996-2015 on the consumption of water resources

地区	现实增减/亿m ³	有调整情景/亿m ³	无调整情景/亿m ³	因调整的节水量/亿m ³	节水率/%
东北地区	486.4	1184.2	1245.2	61.1	5.2
华北地区	299.7	1603.1	1679.0	75.9	4.7
西北地区	269.1	809.0	909.2	100.2	12.4
长江中下游地区	174.7	1887.7	1888.1	0.4	0
东南沿海地区	-229.5	669.5	673.5	4.0	0.6
西南地区	114.3	1040.9	1050.6	9.7	0.9
全国平均	1178.2	7211.5	7516.2	304.7	4.2

种植比例, 减缩豆类、杂粮和薯类的种植份额, 这种调整虽有助于减少水消耗量, 但对于粮食生产扩增水量和现期生产需水规模, 节水量仍相对有限。

南方地区水资源相对充裕, 粮食种植结构调整带来的节水效应明显弱于北方贫水区。长江中下游地区为南方最主要粮食增产区, 虽高耗水的稻麦作物种植比例稳中有升, 但低耗水玉米的比例也上调明显, 两相抵消, 生产调整对水消耗需求的影响甚微。西南地区以玉米和薯类替代小麦, 总体有利于粮食生产耗水量的减省, 节水规模和节水幅度在南方地区较为明显。湿润度最高的东南沿海减产区, 水稻比例明显调减, 玉米比例相对抬升, 这种调整有利于水消耗量的进一步减省。

2.4 影响粮食作物产量变化的区域主导因素

将粮食简单分成稻谷、小麦、玉米和其他等4类, 对六大区域分作物产量消长的贡献上, 作物种植比例因素的影响最为广泛(表4)。种植比例反映种植业内部粮经饲作物对耕地用途的竞争, 包含种植效益的因素。北方是粮食增产的主阵地, 东北地区和西北地区, 种植比例因素均为各作物产量变化的主要贡献因子, 且大多对其产量变化起同向促进作用。华北地区, 作物单产提升是小麦和稻谷增产的首要贡献因素, 稻麦种植比均为增产的抑制因素, 华北玉米等产量变化亦主要由其种植比例因素决定。

南方人多地少, 土地资源是粮食生产的主要约束, 长江中下游地区, 耕地面积减少是构成本区粮食稳产增产的重要制约因素(表4)。但东南沿海地区, 对水稻在内的粮食减产效应, 种植比例因素的贡献最大, 远超复种调减和耕地减少的影响(表4), 可见, 种植效益因素才是本区粮食减产的主导因素。分地区看, 东南沿海地区粮食减产主要来自水稻, 水稻减产又主要由稻作比锐降所致, 水稻以外作物的产量变化也大多受作物种植比变化的影响。西南地区, 水稻和小麦的减产也主要受稻麦种植比例因素的制约, 玉米等产量则更多受作物单产和复种调增的作用。长江中下游地区粮食增产主要依赖水稻和小麦, 且增产量主要是单产和复种上升的结果, 稻麦种植比是减产因素, 此外, 本区玉米等产量变化仍主要受作物种植比例因素的影响。

3 讨论

3.1 粮食生产调整的需求侧分析及其空间后果

不同粮食作物增产走势的分化, 是市场需求和政策支持等相互作用的结果, 稻谷、小麦、玉米均受到国家粮食生产政策的扶持, 20世纪90年代中后期以来, 唯玉米增产幅

表4 1996-2015年分区域粮食作物产量变化的构成因素

Table 4 Factors decomposition of production changes during 1996-2015 by region and by crop (万t)

	品种	产量变化	作物单产	种植比例	复种指数	耕地面积
东北地区	稻谷	2002.6	272.4	1098.5 [*]	646.1	-14.3
	小麦	-351.8	26.8	-421.2 [*]	43.6	-1.0
	玉米	3882.9	856.4	1486.7 [*]	1574.6 [*]	-34.9
	其他	-150.0	-8.6	-440.2 [*]	305.5 [*]	-6.8
华北地区	稻谷	112.0	96.8 [*]	-11.7	68.6 [*]	-41.7
	小麦	1701.9	1914.8 [*]	-492.6	713.2	-433.5
	玉米	2489.4	741.4	1527.9 [*]	561.2	-341.1
	其他	-815.0	9.6	-871.8 [*]	120.3	-73.1
西北地区	稻谷	29.4	54.9	-92.0 [*]	92.0 [*]	-25.5
	小麦	-6.0	578.3	-995.5 [*]	569.3	-158.1
	玉米	2713.3	653.2	1399.2 [*]	914.9	-254.0
	其他	99.6	312.1 [*]	-446.7 [*]	324.2 [*]	-90.0
长江中下游地区	稻谷	695.5	746.1 [*]	-264.5	754.2 [*]	-540.3 [*]
	小麦	750.1	769.1 [*]	-77.9	207.5	-148.7
	玉米	487.6	124.4	341.5 [*]	76.7	-54.9
	其他	-442.4	-126.5	-337.7 [*]	76.7	-55.0
东南沿海地区	稻谷	-1478.3	379.0	-1191.4 [*]	-327.7	-338.2
	小麦	-58.4	16.3	-65.7 [*]	-4.4	-4.6
	玉米	185.8	127.6 [*]	106.8 [*]	-23.9	-24.7
	其他	-141.4	155.7 [*]	-192.7 [*]	-51.4	-53.0
西南地区	稻谷	-3.2	126.0	-594.5 [*]	732.8 [*]	-267.5
	小麦	-396.6	119.7	-634.7 [*]	186.5	-68.1
	玉米	776.8	434.2 [*]	92.8	393.3 [*]	-143.6
	其他	562.7	312.1 [*]	15.2	370.7 [*]	-135.3

注：*为基于效应值的首位贡献因子，以及效应值超过首位因子2/3的第二/三因子。

度最高，主要在于粮食需求结构的变化。稻谷和小麦是我国的主要口粮作物，玉米则以饲料用途和工业用途为主。从粮食需求侧变化的视角，可以再解读学界广泛探讨的我国粮食生产格局变迁问题。

其一，粮食增产重心的北移西扩。粮食需求结构的变化，对口粮以外的饲料粮需求上升，饲料粮生产增量明显超过稻麦口粮。玉米就成为我国种植面积和产量扩展最大的粮食品种，华北地区，传统小麦优势产区的小麦种植比下降而玉米上升，南方水稻优势产区的玉米种植比也大多上升（图2）。我国最适玉米种植的气候为中温带和寒温带半干旱、半湿润气候，玉米适种区大体呈东北—西南带状分布^[23]，三北地区和西南地区由此成为我国玉米、进而也就是粮食的主要增产区。

其二，南方粮食生产的衰退。随着人均口粮消费水平不断下降，稻麦口粮作物的扩产空间相对有限。如小麦，20世纪90年代中后期以来，小麦种植比例大多下降（图2）。稻米是我国最重要口粮，南方稻作区主产籼米，而适合于寒凉气候区生长的粳稻，口感

优于籼米,消费人群持续增长,粳米需求量不断增加。对稻米需求结构的这种变化,使得北方贫水区粳米性质的稻谷产量相对稳定,尤其东北地区稻谷种植比强势上升,地域稻作专业化生产趋势明朗。而南方水稻优势生产区,在口粮供给相对宽裕的背景下,稻作比大多下调,南方又非小麦、玉米、大豆的适宜生产区,缺乏其他粮食品种替代,南方粮食生产的地位只能相对下降。

3.2 粮食需求结构变化对水土资源利用的影响

粮食需求扩张要求粮食增产,粮食增产又以高强度开发利用水土资源为代价。粮食种植面积扩增和水资源消耗需求扩增的压力显然集中在北方地区。以复种指数为例,复种提高一般要以农业机械投入和灌溉为条件,它是在时空上强化水土资源利用的重要指标。虽然北方地区复种的自然潜力相对较低,但从1996年到2015年,东北地区复种指数从59.1%上升到79.5%,西北地区则从64.9%调升到92.1%,华北地区从128%上升到143%。

研究结果显示,在国家层面,以无结构调整参照情景,要实现既定产量,1996-2015年,因种植结构调整节省的水土资源消耗量大约占现期资源总需求量的4%左右(表2、表3)。以粮食生产品种调整作为观察粮食需求与水土资源利用关系的中间变量,这一结果意味着粮食需求结构变化,玉米等饲料粮种植比例相对上调,某种程度上有助于缓解粮食生产水土资源消耗的压力。1990年代中后期以来,全国耕地面积减少态势不变下,我国粮食能够波动中实现增产,仍需要付出扩增粮食种植面积和水资源消耗量的代价,但若期间粮食品种没有调整,以当期粮食产量为标准,显然还需扩增更多的水土资源消耗量。

3.3 区域粮食种植结构调整对水土资源利用的影响

从资源利用效率出发,北方适种低产低耗水作物,南方适合高产高耗水作物,南方水田多,原是高产耗水的水稻的理想产区,但稻作比大多下调,使得粮食结构调整对种植面积和水资源消耗的减省效应上,南方地区普遍低于北方(表2、表3)。许多研究提出要充分挖掘南方地区的粮食生产潜力,提高其满足自身粮食需求的自给能力^[3-6]。但从食物结构变化看,随着经济发展,面食替代大米,稻米尤其是籼米需求相对有限,南方多季稻作区又缺乏小麦、玉米、大豆等作物的区域生产优势,在国家口粮供给相对宽余的背景下,水热资源最为丰富的东南沿海地区水稻复种下降、粮食难以自给有其经济合理性。

北方粮食作物结构调整的节水节地效应上,西北地区明显好于华北和东北。未来农业结构调整上,华北地下水超采地区还需适当压减小麦面积,地下水开采较重的东北三江平原地区,要合理控制水稻种植面积,因生态需要主动调整种植结构。此外,本文估测的水资源消耗量,包含作物生长期所消耗雨水和灌溉用水的蒸散量,并假定同样产品单位质量耗水量基本相当。但事实上,粮食作物品种的不同生产安排,或在雨养或灌溉的不同农区,对农业环境的潜在影响是不同的。如华北地区种植小麦和玉米,水消耗估测量可能差别不大,但小麦生产需要抽水灌溉,而玉米与降雨的耦合度较高不会大量消耗地下水。因此,要建立适合当地降水状况的农作制度,华北地区最好实施雨养农业,

要尽可能种植雨热同季的春小麦、马铃薯和耐旱耐瘠薄的杂粮杂豆。

4 结论

估测粮食作物种植结构调整对水土资源消耗需求的影响,并以粮作结构调整为中间变量,探讨人口大国膳食转型期粮食需求结构变化的水土资源影响效应,主要结论如下:

(1) 20世纪90年代中后期以来,玉米主导我国粮食增产格局。我国粮食生产结构的这种调整,总体有利于农业水土资源消耗需求量的节省,1996-2015年,相对于无种植结构调整的情景,产量一定下,实际调整所节省的水/土资源消耗量分别约为现期粮食生产总需求量的4.2%和3.7%。这一结果意味着,人口膳食转型虽总体加大对水土资源利用的需求压力,但同步进程中的粮食需求结构变化,某种程度上有助于缓解粮食生产水土资源消耗的压力。

(2) 从结构调整对种植面积的减省效应看,1996-2015年,耕地资源相对丰富的北方地区明显高于南方地区,节地规模上,东北地区 and 西北地区较高,西北地区节地幅度最高,东南沿海地区节地效应最弱;从结构调整对水资源消耗的减省效应看,北方地区普遍高于南方地区,干旱度最高的西北地区最高,长江中下游地区的节水效应则极小。

(3) 区域分品种粮食产量变化广泛受作物种植比例因素的影响。种植比例包含经济效益因素,其根源是消费需求。饲料粮需求增量超过稻麦口粮,使得适合玉米种植的北方地区成为我国粮食主要增产区,而南方稻作区因稻米需求空间相对有限,又缺乏小麦、玉米、大豆等替代粮食品种的区域生产优势,造成南方粮食生产相对停滞。为此,南方要恢复粮食生产,充分利用好水热资源潜力,主要取决于市场需求和农户种植效益。北方地区要合理控制好高耗水作物如水稻、小麦的种植面积,为减少地下水灌溉量,要按降水规律调整农作制度,尽可能实施雨养农业。

参考文献(References):

- [1] 刘彦随,吴传钧.中国水土资源态势与可持续食物安全.自然资源学报,2002,17(3): 271-275. [LIU Y S, WU C J. Situation of land-water resources and analysis of sustainable food security in China. Journal of Natural Resources, 2002, 17 (3): 271-275.]
- [2] BROWN L R, HALWEIL B. China's water shortage could shake world food security. World Watch, 1998, 11(4): 10-18.
- [3] 刘玉杰,杨艳昭,封志明.中国粮食生产的区域格局变化及其可能影响.资源科学,2007,29(2): 8-14. [LIU Y J, YANG Y Z, FENG Z M. The change of the main regions for China's foodgrain production and its implications. Resources Science, 2007, 29(2): 8-14.]
- [4] LI T T, LONG H L, ZHANG Y N, et al. Analysis of the spatial mismatch of grain production and farmland resources in China based on the potential crop rotation system. Land Use Policy, 2017, 60: 26-36.
- [5] 王立祥.论“北粮南运”与我国水资源合理利用.干旱地区农业研究,2001,19(1): 1-7. [WANG L X. On the situation of sending grains from the North to the South and rational utilization of water resources in China. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(1): 1-7.]
- [6] 王浩,杨贵羽,杨朝晖.水土资源约束下保障粮食安全的战略思考.中国科学院院刊,2013,28(3): 329-336. [WANG H, YANG G Y, YANG Z H. Thinking of agriculture development in China based on regional water resources and land cultivation. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 329-336.]
- [7] 梁美社.基于虚拟水土资源贸易的区域农业结构优化研究.杨凌:西北农林科技大学,2011. [LIANG M S. Optimal regional agricultural planting structure under the trade of virtual water-land resources. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011.]

- [8] JIN T, QIN X Y, HUANG L Y. Changes in grain production and the optimal spatial allocation of water resources in China. *Journal of Resources & Ecology*, 2016, 7(1): 28-35.
- [9] YOU L, SPOOR M, ULIMWENGU J, et al. Land use change and environmental stress of wheat, rice and corn production in China. *China Economic Review*, 2011, 22(4): 461-473.
- [10] 陈佑启. 中国区域性耕地资源变化影响评价与粮食安全预警研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010. [CHEN Y Q. Study on the Impact Assessment of Regional Cultivated Land Resources Change and the Early Warning of Grain Security in China. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2010.]
- [11] 金涛. 中国粮食生产时空变化及其耕地利用效应. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 911-919. [JIN T. Effects of cultivated land use on temporal-spatial variation of grain production in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 911-919.]
- [12] KUANG W, HU Y J, DAI X Q, et al. Investigation of changes in water resources and grain production in China: Changing patterns and uncertainties. *Theoretical & Applied Climatology*, 2015, 122(3/4): 557-565.
- [13] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水-耕地资源区域时空差异演变. *资源科学*, 2009, 31(1): 84-93. [SUN C Z, ZHANG L. Changes in spatial and temporal differences of agricultural product virtual water versus cultivated land in China. *Resources Science*, 2009, 31(1): 84-93.]
- [14] 邹君, 谢杨艳, 李伯华, 等. 虚拟水战略背景下的中国粮食生产空间布局优化研究. *地域研究与开发*, 2010, 29(5): 22-27. [ZOU J, XIE Y Y, LI B H, et al. Study on spatial adjustment of food production under the background of virtual water strategy. *Areal Research and Development*, 2010, 29(5): 22-27.]
- [15] 朱晶, 李天祥, 朱珏. 江苏省粮食增产的贡献因素分解与测算(2004-2013年): 基于粮食内部种植结构调整的视角. *华东经济管理*, 2015, 29(3): 11-16. [ZHU J, LI T X, ZHU Y. Estimating and decomposing the contribution factors of Jiangsu province's from 2004 to 2013 grain production growth: From the perspective of intercrop structural adjustment. *East China Economic Management*, 2015, 29(3): 11-16.]
- [16] 金涛, 张森, 陆建飞. 江苏省粮食单产空间差异的因素分解. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(5): 48-53. [JIN T, ZHANG M, LU J F. Decomposition analysis for spatial variation of grain yield per hectare in Jiangsu province. *Geography and Geo-information Science*, 2014, 30(5): 48-53.]
- [17] 李天祥, 朱晶. 近十年来中国粮食内部种植结构调整对水土资源利用的影响分析. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(9): 96-102. [LI T X, ZHU J. Impacts of inter-crop structural adjustment on China's water and land use in grain production in the last ten years. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(9): 96-102.]
- [18] 曹志宏. 基于谷物当量的中国居民食物消费变化及其对农业生产需求分析. *资源科学*, 2013, 35(11): 2181-2187. [CAO Z H. Changes in Chinese food consumption and agricultural production requirements based on cereal equivalent. *Resources Science*, 2013, 35(11): 2181-2187.]
- [19] 任继周, 林慧龙. 农田当量的涵义及其所揭示的我国土地资源的食物生产潜力: 一个土地资源的食物生产能力评价的新量纲及其在我国的应用. *草业学报*, 2006, 15(5): 1-10. [REN J Z, LIN H L. Arable land equivalent unit and potential food productivity of land resources in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(5): 1-10.]
- [20] 封志明, 孙通, 杨艳昭. 2003-2013年中国粮食增产格局及其贡献因素研究. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 895-907. [FENG Z M, SUN T, YANG Y Z. Study on the spatiotemporal patterns and contribution factors of China's grain output increase during 2003-2013. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 895-907.]
- [21] 谭永忠, 何巨, 岳文泽, 等. 全国第二次土地调查前后中国耕地面积变化的空间格局. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 186-197. [TAN Y Z, HE J, YUE W Z, et al. Spatial pattern change of the cultivated land before and after the second national land survey in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 186-197.]
- [22] 刘书通, 李春生, 方福平, 等. 我国水稻生产区域变化及其比较优势分析. *中国稻米*, 2014, 20(4): 9-13. [LIU S T, LI C S, FANG F P, et al. Study on the variation and comparative advantage of regional rice production structure in China. *Chinese Rice*, 2014, 20(4): 9-13.]
- [23] 何奇瑾, 周广胜. 我国玉米种植区分布的气候适宜性. *科学通报*, 2012, 57(4): 267-275. [HE Q J, ZHOU G S. Climatic suitability of maize cultivation distribution in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(4): 267-275.]

The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources

JIN Tao^{1,2}

(1. Agriculture College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;

2. Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract: Estimation of the effect of grain production adjustment on the consumption of water and land resources will help to formulate the strategy for sustainable agricultural development. Since the mid and late 1990s, the proportion of corn in China's grain production has been obviously improved. Taking grain cropping structure without adjustment as the base scenario, and under certain grain output, the actual grain production adjustment in China during 1996-2015 has brought about the savings of water and land resources, accounting for about 4.2% and 3.7% of current demand in grain production respectively. The adjustment of grain production comes from grain demand structure change, which helps to alleviate the consumption pressure of water/land resources in grain production to some extent, though China's dietary transformation requires more agricultural resources. At the regional level, from the effect of structural adjustment on the demand for planting area, the savings in northern regions with relatively abundant arable land resources are significantly higher than those in the south. The area saving effect is higher in the northeast and northwest regions, and the least in southeastern coastal areas. From the effect of structural adjustment on the demand for water resources, the savings in northern regions are generally higher than those in the south, the highest in the northwest region with the highest drought degree, and the water saving effect in the middle and lower reaches of the Yangtze River is minimal. During the period, the output of regional grain crops has been widely affected by the change of cropping proportion, which is the indicator of the planting benefit and implies the change of consumption demand. Feed grain demand has increased more than rice and wheat rations, making the northern region suitable for corn planting become China's main grain production area. In the southern rice region, the demand for rice is relatively limited, and the regional production advantages of wheat, corn and soybeans are also lacking, which causes the relative stagnation of grain production in the south. To this end, in southern China, the recovery of grain production and full utilization of the potential of water/heat resources mainly depend on the consumption demand for rice and farmers' planting benefit. For the northern region, in order to reduce the amount of groundwater irrigation, it is necessary to rationally control the cropping area of rice and wheat and to adjust farming system according to the law of precipitation as far as possible.

Keywords: grain production; structural adjustment; grain consumption demand; consumption of land and water resources