

近 50 年安徽省气候生产潜力演变及粮食安全气候承载力评估^{*1}

卢燕宇^{1,2} 王胜^{1,2} 田红¹ 邓汗青^{1,2} 何冬燕^{1,2}

(1. 安徽省气候中心, 安徽 合肥 230031;

2. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

【摘要】:安徽省是重要的粮食产区,在保障我国粮食安全中发挥着重要作用,研究该省气候生产潜力的演变特征,面向粮食安全分析其气候承载力具有显著的现实意义。本文从粮食生产与光温水等气候因子的关系出发,采用逐级订正的方法计算了安徽省的气候生产潜力及其变化特征,并根据不同生活水平下的粮食需求指标,分析了安徽省的气候承载力和剩余空间。结果表明,安徽省气候生产潜力的地理分异特征显著,其中北部高于南部、平原高于山区,高值区主要集中在沿淮及淮北地区,与耕种条件配合较好,有利于生产潜力的发挥。1961~2013 年全省气候生产潜力基本呈一致下降趋势,近 50 年平均减少了约 10%。安徽省目前粮食消费水平和结构属温饱型向小康型过渡阶段,在充分发挥气候生产潜力的前提下,全省气候资源所能承载的粮食产量均显著超过不同生活水平下的总需求量。小康水平下,气候承载力的相对剩余率总体呈东北向西南递减的趋势,除部分城市地区和山区外,全省大部地区气候承载力的剩余空间仍较富裕,能够较好的保障粮食需求。总的来看,由于安徽省光温水以及耕地等条件配合较好,气候承载力较高;虽然受太阳辐射影响,近年来气候生产潜力下降,但在保障未来小康社会的粮食安全方面,安徽省仍具有较好的气候承载力,粮食生产还有较大的提升空间。

【关键词】:气候生产潜力; 粮食安全; 气候承载力; 相对剩余率; 时空变化特征

【中图分类号】:P49 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)03-0428-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201703013

随着全球气候变暖以及人口剧增,粮食安全面临的形势将更加严峻^[1]。气候条件与粮食生产密切相关,特定气候条件下所能承载

¹ 收稿日期:2016-08-22; 修回日期:2016-12-04

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF201507) [Climate Change Special Foundation of CMA (CCSF201507)]; 中国清洁发展机制基金赠款项目(2013028) [China Clean Development Mechanism Fund (2013028)]; 安徽省气象局创新团队建设计划[Anhui Meteorological Innovation Team Program]; 中国气象局青年英才计划[Young Talents Program of CMA]

作者简介: 卢燕宇(1981~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为气候变化与气象灾害风险. E-mail:ahqxlyy@163.com

的粮食产量乃至人口数量存在着一定的上限,即气候生产潜力^[2]。气候变化改变了气温、降水、光照等气象要素的时空分布格局^[3],从而直接影响了气候生产潜力,进而对农业生产以及粮食安全也构成一定威胁^[4]。因此,为有效应对气候变化、保障粮食安全,有必要分析气候生产潜力对气候变化的响应特征,科学评估气候条件对粮食供给和社会经济发展的承载能力。

作为一种重要的自然资源,气候条件对社会-经济-生态综合系统的承载力问题逐渐受到关注^[5, 6]。气候承载力的概念近年被提出,并给出了初步评估框架,但气候承载力研究还处于起步阶段,在概念内涵、评估指标和技术方法等方面还有待进一步厘清^[7]。在这种情况下,需要针对不同地区、不同群体,以及不同发展阶段下可持续发展的需求与适应能力的差异,积极探索因地制宜的评估方法。就粮食安全问题而言,可参照资源环境承载力的评估框架,采用“资源—食物供给—人口”框架^[8]来研究气候承载力,即以粮食供给为纽带将气候资源与社会需求相联系,分析二者之间供需关系来反映气候资源对人类社会的承载能力。因此,面向粮食安全的气候承载力评估实际上就归结于气候生产潜力和不同类型社会粮食需求水平问题,而对于这两方面问题,已有较多的研究涉及,例如采用Tharntwaite-Memorial模型^[9]、Miami模型^[10]以及AEZ模型^[11]等方法计算了不同地区的气候生产潜力;从模型法和推断法推算了不同经济水平下的人均粮食需求量^[12],这些研究将为气候承载力的评估提供重要技术手段和指标参考。

安徽省是我国黄淮海及长江中下游粮食主产区的重要组成部分。境内交通发达,京沪、陇海、京九铁路线纵横交错,公路、水运网络发达,是连接南北东西的交通要冲,有利于粮食的运输调配。该区域光温水资源丰富,担负着为国家提供商品粮的重任,在我国农业和经济发展中占有十分重要的地位。但另一方面,安徽省又是我国生态环境脆弱区。由于该区地处南暖温带和北亚热带气候过渡地带,冷暖空气交汇频繁,特殊的下垫面条件对旱涝的适应性差,导致该地区旱涝灾害频繁发生,其旱涝发生率和成灾率均属全国高值区^[13],给该区域粮食生产和国民经济以及人民生命财产安全造成很大影响。在气候变化背景下,该地区的光温水等农业气候资源已发生了显著变化^[14, 15],但是气候生产潜力对气候变化的响应特征仍不明确,气候条件对未来社会发展的支撑能力研究尚有不足。因此,有必要对安徽省的农业气候资源配置、气候生产潜力演变以及气候资源承载力等方面进行分析评估,为在气候变异情况下科学布局农业生产、合理开发利用气候资源、确保粮食生产持续稳定发展及粮食安全提供科技支持和参考。

1 资料与方法

1.1 研究思路

气候生产潜力是指在一定时期内一定土地面积上,假设作物品种、土壤性状、耕作技术都适宜,在当地气候条件下作物可能获得的单位面积最高产量。根据“最适因子律”和“最低因子限制律”,可以分为光合生产潜力、光温生产潜力和光温水生产潜力三个层次(图1)。对气候生产潜力的估算一般方法是从太阳总辐射出发,求出作物的光合生产潜力(Y_p),然后根据温度、水分这2个主要限制因子对光合生产潜力进行逐级订正,得到光温生产潜力(Y_t)和光温水生产潜力(Y_w),其中光温水生产潜力就是通常所称的气候生产潜力。

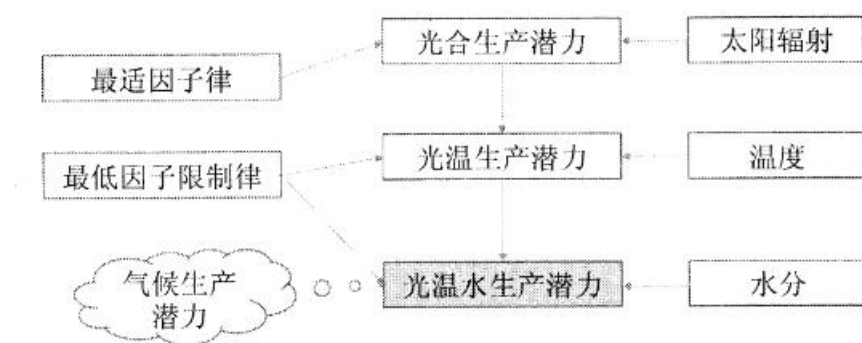


图1 气候生产潜力计算流程

Fig.1 Schematic Diagram for Calculating Climatic Potential Productivity

根据承载力的概念,面向粮食安全的气候承载力指的是在当地气候条件下的粮食生产力对该空间内人口的基本生存和发展的支撑能力,可以通过其所能承载人口的限度来表征。它不仅与当地气候生产潜力大小有关,还需要表明所供养人口的食物消费水平。因此,在得到气候生产潜力之后,可结合不同生活水平下的人均粮食需求量,从而计算出不同地区的气候承载力水平。

1.2 研究资料

选取安徽省 77 个气象台站 1960~2013 年逐日气象要素,包括降水量、气温(平均、最高及最低)、日照时数、相对湿度、平均风速等,资料来源于安徽省气象信息中心。

1.3 研究方法

1.3.1 光合潜力

光合潜力即以—个地区的年总辐射量在 CO₂ 含量正常和其他环境因素均适宜的条件下,达到光能利用率的上限所计算出的干物质产量,即为光合生产潜力^[1]。具体计算方法是利用太阳总辐射乘以作物光合有效系数得到,其中光合有效系数主要考虑光能利用率、经济系数等因素^[16]。光合生产潜力计算公式如下:

$$Y_q = \frac{10^5}{C} \cdot F \cdot E \cdot Q \quad (1)$$

式中:Y_q 的单位为 kg·ha⁻¹; C 是干物质发热量,即能力转换系数,用 1 g 干物质所结合的化学能来表示,多数作物的平均值为 4.25 kcal·g⁻¹; F 是光能利用率,取 2%; E 为经济系数,对水稻、玉米、小麦等大多数禾谷作物,E 取值在 0.35~0.5 之间^[16],本文不针对作物类型计算生产潜力,参考文献 E 取值 0.4; Q 是太阳总辐射,单位是 kcal·cm⁻²。由于太阳辐射观测较为复杂,气象观测中太阳辐射观测

站较少,常通过分析日射站观测太阳辐射和天文太阳辐射的关系,并建立统计回归公式推算得出。参照常用的 Angstrom 气候学^[17]方法,采用合肥与屯溪站辐射观测资料,得到安徽省地表太阳总辐射的气候学计算公式^[18]为:

$$Q = Q_0 (0.1538 + 0.5372 S) \quad (2)$$

式中:Q 为到达地表的太阳总辐射量(kcal · cm⁻²); Q₀ 为起始天文辐射量,主要与天文因子及地理纬度有关,可由理论公式计算得出; S 为日照百分率,可由常规气象站观测的日照时数计算得到。

1.3.2 光温生产潜力

在光合生产潜力(Y_c)的基础上,经过温度有效系数 f_t 衰减计算,可得到光温生产潜力(Y_t)^[19]。无霜期(n)与作物可能的生长季密切相关,其物理意义与生物学意义比较明确,因而一直是农业气候热量条件分析中的重要指标之一。因此采用无霜期在全年所占的比值作为温度有效系数^[16],光温生产潜力计算公式如下:

$$f_t = \frac{n}{365} \quad (3)$$

$$Y_t = f_t \cdot Y_q \quad (4)$$

1.3.3 气候生产潜力

对光温生产潜力进行水分有效系数订正后的值计算光温水生产潜力,即气候生产潜力(Y_w)。在农业气候学中湿润系数是常用的水分供应指标,并用作水分有效系数来对光温生产潜力进行订正^[16]。气候生产潜力的估算可用降水量(r)与蒸发力(E₀)的比值对光温生产潜力进行订正,即:

$$f_w = \begin{cases} 1 & r \geq E_0 \\ r/E_0 & r < E_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_w = f_w \cdot Y_t \quad (6)$$

ET₀为作物可能蒸散量,可采用联合国粮农组织(FAO, 1998)推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[20]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_d - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)} \quad (7)$$

式中:ET₀ 单位为 mm·d⁻¹; Δ 为饱和水汽压曲线斜率(KPa·℃⁻¹); R_n 为作物冠层表面净辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹); G 为土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹), 在逐日计算公式中, G≈0; T 为 2 m 高度处平均气温(℃); U₂ 为 2 m 高度处风速(m·s⁻¹), 由气象台站观测到的 10 m 的风速计算后得到; e_d 为饱和水汽压(KPa), 根据气象台站每天观测到的相对湿度计算后得到; e_a 为实际水汽压(KPa), 由气象台站观测资料直接得到; γ 为干湿表常数(KPa·℃⁻¹)。

1.3.4 气候承载力

根据前文所述气候承载力定义, 气候承载力可表示为特定区域内气候资源所能承载的人口数量, 其计算公式为:

$$\text{气候承载力} = \frac{\text{气候生产潜力}}{\text{人均粮食需求指标值}} \quad (8)$$

为进一步定量评估气候承载力的空间差异及特征, 并反映当前社会经济状况对气候承载力的影响, 将环境承载力中相对剩余率的概念^[21, 22]引入到研究中, 采用该指标来进一步分析气候承载力的空间分布特征, 评估当地气候条件下粮食生产能否承载现有口数量, 在保障粮食安全条件下是否存有剩余空间等。气候承载力的相对剩余率计算公式为:

$$\text{相对剩余率} = \frac{\text{气候承载力} - \text{实际人口数}}{\text{实际人口数}} \quad (9)$$

2 结果分析

2.1 气候生产潜力的空间分布

气候生产潜力的空间分布受光温水要素的共同影响。安徽省光能资源较丰富, 光合生产能力较高, 1981~2010 年安徽省光合生产潜力平均为 29 816 kg·ha⁻¹·a⁻¹, 受太阳辐射分布特征影响, 光合生产潜力总体呈纬向分布, 北高南低(图 2a), 主要是由于皖北气候相对较为干燥, 大气中水汽和云量较少, 对太阳光的遮蔽较少, 相应的日照时数较多, 辐射资源较好; 而皖南地区一方面气候较为湿润, 另一方面皖南多为山区, 山地气候特征明显, 云雾多, 这导致了皖南地区日照百分率显著少于皖北, 因而光合生产潜力也较低。安徽省光温同季, 温度条件有利于光合生产潜力利用率的提高, 光温生产潜力平均为 22 542 kg·ha⁻¹·a⁻¹, 空间分布类似光合潜力, 但由于南方热量条件好于皖北, 无霜期较长, 因此皖北光温潜力受温度的影响较皖南明显(图 2b)。安徽省降水变率大, 在一定程度上限制了气候生产潜力的发挥, 尤其在皖北地区, 水分胁迫对气候生产潜力的影响更加显著, 全省气候生产潜力平均为 22 157 kg·ha⁻¹·a⁻¹, 空间分

布以北高南低,平原高于山区为特征(图 2c),高值区主要分布在沿淮及淮河以北地区,可以看出安徽省气候生产潜力的空间分布与土地耕种条件的配合较好,有利于气候生产潜力的发挥,气候生产潜力的高值区也与当前粮食主产区分布较为一致。

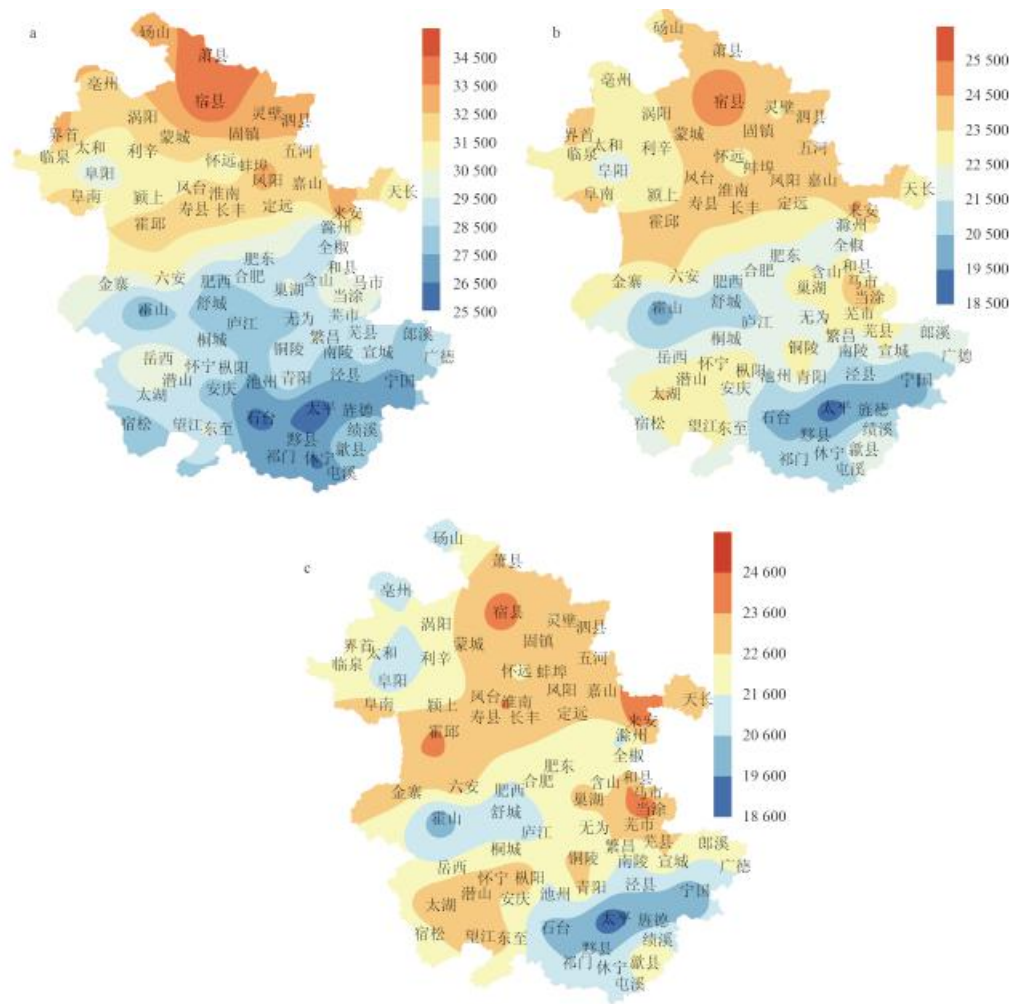


图 2 安徽省1981~2010年平均光合生产潜力(a)、光温生产潜力(b)及气候生产潜力(c)的空间分布(单位: $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)
Fig.2 Spatial Distribution of Mean Photosynthetic Potential Productivity(a), Light-temperature Potential Productivity(b), and Climatic Potential Productivity(c) During the Period of 1981~2010 in Anhui Province (Unit: $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

2.2 气候生产潜力的演变特征

安徽省气候生产潜力自 1960 年以来呈显著下降趋势,主要是受太阳辐射下降的影响^[15],但是与此同时气候变暖、无霜期变长在一定程度上抵消了太阳辐射减少的效应。由于安徽省降水年际变化大,气候生产潜力年际波动较为明显。从线性趋势来看,1960~2013 年全省气候生产潜力下降的线性倾向率为 $-47.6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (通过 0.01 的信度检验)。从年代际变化来看,1960s 最大(平均为 $24373\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$),而 2010s 最小($22022 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$),减少了约 10%(图 3)。

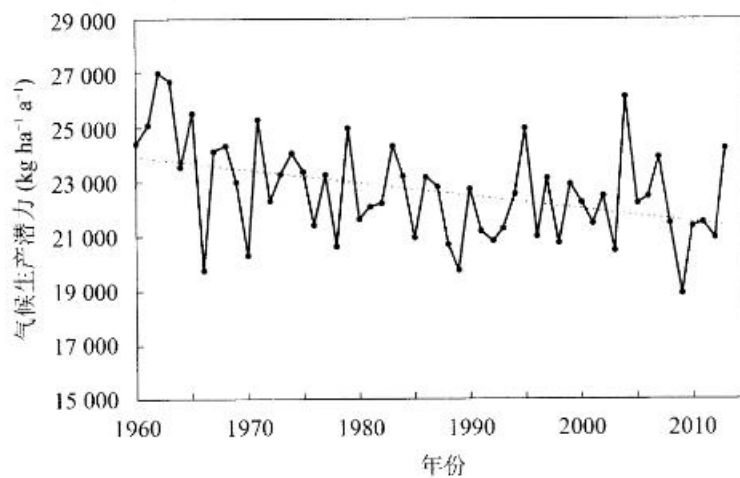


图3 1960~2013年安徽省气候生产潜力演变

Fig.3 Temporal Variation of Climatic Potential Productivity During the Period of 1960–2013 in Anhui Province

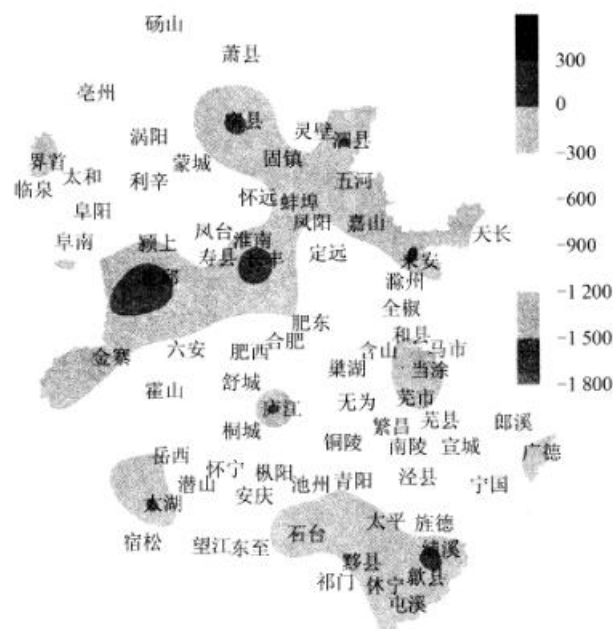


图4 1960~2013年安徽省气候生产潜力线性倾向率的空间分布(单位: $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

Fig.4 Spatial Distribution of Linear Trend of Climatic Potential Productivity During the Period of 1960-2013 in Anhui Province (Unit: $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

从近 50 年线性演变趋势空间分布来看,除沿淮的部分地区外,全省气候生产潜力基本呈一致的减少趋势,其中淮北西部、江淮之中南部、江南东部减少幅度最大(图 4)。

2.3 气候承载力分析

根据 FAO 组织推荐,人均每年粮食消耗量 400kg 这一标准仍可以作为调控粮食安全的基本参考线^[12]。安徽省目前农村人口总体消费水平仍属温饱型,城市人口消费水平逐步向小康型过渡。由于当前城乡居民食品消费仍然呈二元性特征^[23],而安徽省农村人口比重较大,因此全省人均消费粮食指标不到 $380\text{ kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。随着经济的发展,安徽省城乡人民食品结构不断改善,粮食比重下降,动物性食物消费增长。虽然目前安徽省粮食、蔬菜、蛋类等食物消费结构仍不尽合理,农村人口食物消费水平仍未达宽裕水平,但是 2000 年后城市居民食物消费结构已接近小康水平。

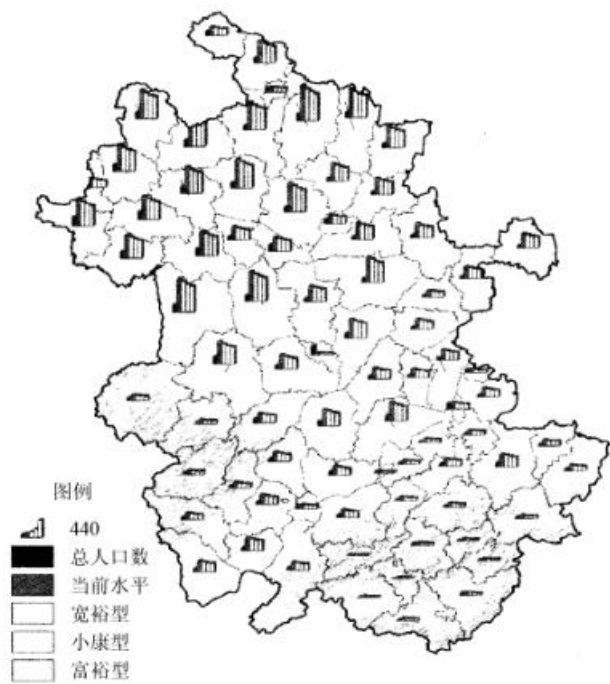


图 5 安徽省不同粮食需求水平下的气候承载力分布
Fig.5 Spatial Distribution of Climatic Capacity under Different Food Demand Levels in Anhui Province

表 1 粮食消费水平及指标^[12, 24]

标准		人均粮食(kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)		
消费水平	当前	宽裕型	小康型	富裕型
指标	380	420	460	490

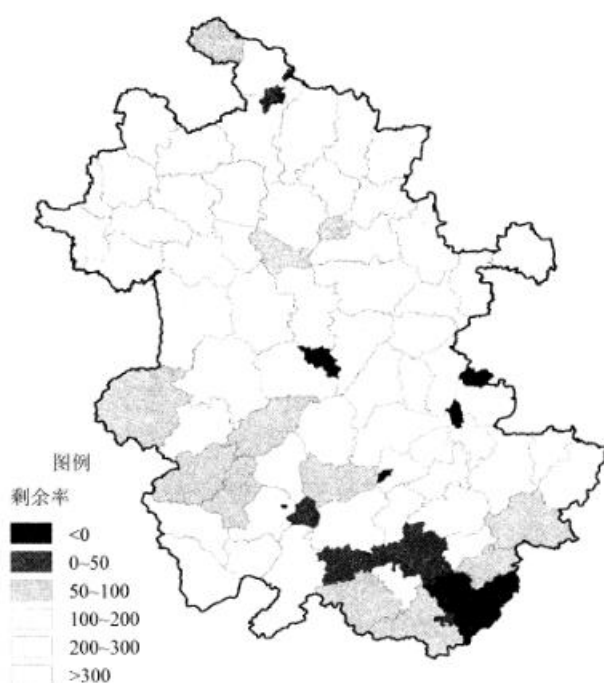


图 6 小康水平下安徽省粮食生产气候承载力的相对剩余率(%)
Fig.6 Spatial Distribution of Relative Surplus Rate (%) of Climatic Capacity under the Well-off Standards in Anhui Province

由气候生产潜力乘以当前耕地面积得出的粮食总产为当地气候条件下的最大生产潜力, 也即气候资源承载力的上限。由于安徽省较高气候生产潜力地区大多位于平原, 与耕地资源的分布配合较好, 有利于气候承载力的提升。在不同需求水平下(表 1), 安徽省粮食生产的气候资源承载力均超出当前实际人口数(6 千万人), 在现状粮食需求条件下, 最大气候资源承载力平均养活人口 2.4 亿人, 富裕水平粮食需求条件下, 平均养活人口 1.9 亿人, 能够较好的满足本省人口的粮食需求(图 5)。由于气候资源承载力有一定年际波动, 优年景比差年景高约 40%。在空间分布上, 全省具有较明显的差异, 沿淮及淮北地区气候生产潜力高, 耕地面积大, 因此气候资源承载力显著高于皖南地区, 大别山区和皖南山区由于气候生产潜力和耕地面积均较小, 其气候承载力也为全省最低。从小康水平下全省气候承载力相对剩余率来看, 气候承载力剩余空间的分布总体呈东北向西南递减的趋势。除合肥、马鞍山、芜湖、铜陵等城市地区和歙县这一典型山区外, 全省其他地区气候资源所能承载的最大人口均显著高于现状(图 6), 因此, 就保障粮食安全方面看, 安徽省气候资源还有较大潜力。

3 结论

根据气候生产潜力的定义以及作物生长与气候因子的关系, 本文从太阳辐射出发, 采用温度、水分为限制因子进行逐级订正, 计算了 1960~2013 年安徽省的气候生产潜力。结果表明, 安徽省气候生产潜力平均为 $22157 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 空间分布呈北高南低、平原高于山区的特征, 并且近 50 年来全省各地基本呈一致下降趋势, 气候生产潜力的时空演变特征主要受太阳辐射的变化影响。

安徽省目前人均消费粮食量与粮食安全调控指标基本一致, 就消费结构来看属温饱型向小康型过渡阶段。根据不同生活水平下的粮食需求指标, 计算了安徽省的气候承载力。结果表明, 在充分发挥气候生产潜力的前提下, 全省气候资源所能承载的总人口均显著超

出当前实际人口数。除部分城市地区和山区外,全省其他地区气候承载力均能保证小康水平下的粮食需求量,能够较好的保证粮食自给自足。

由于气候生产潜力仅为粮食生产的理论上限,气候资源潜力的利用与农业生产能力、灾害防御水平等因素具有很大关系。因此有必要不断提高农业生产技术水平、增强农业应对气象灾害和气候变化的能力,才能实现该地区粮食生产的高产稳产,在全省乃至全国的粮食安全保障中发挥更加重要的作用。

此外,承载力的计算并非是简单的数学运算,还涉及到多方面的问题^[10],本文仅从食物消费的角度探讨了气候资源对当地人口的承载能力,未涉及粮食跨区供给、加工存储等环节,考虑的角度较为单一;并且气候承载力不仅包含气候资源供给能力,还应进一步探讨气候灾害对社会经济的破坏能力,即气候变化所造成的气候风险,以及气候系统与承载对象相互作用的时空变化模式等^[7]。因此,系统评估气候承载力还面临很多挑战,特别是构建完善气候承载力评估框架、拓宽应用领域和对象、融入量化技术方法等方面还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 谢立勇,李悦,徐玉秀,等. 气候变化对农业生产与粮食安全影响的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 235 - 239.
- 【XIE L Y, LI Y, XU Y X, et al. Updated understanding on the impacts of climate change on food production and food security[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(4):235 - 239.】
- [2] 邓根云. 气候生产潜力的季节分配与玉米的最佳播期[J]. 气象学报, 1986, 44(2): 192 - 198.
- 【DENG G Y. The seasonal distribution of climatic potential productivity and the optimum seeding time of maize[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1986, 44(2): 192 - 198.】
- [3] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3 - 8.
- 【DING Y H, REN G Y, SHI G Y, et al. National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3 - 8.】
- [4] 葛亚宁,刘洛,徐新良,等. 近 50a 气候变化背景下我国玉米生产潜力时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 784 - 795.
- 【GE Y N, LIU L, XU X L, et al. Temporal and spatial variations of Chinese maize production potential on the background of climate change during 1960 - 2010[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 784 - 795.】
- [5] 潘家华,郑艳,王建武,等. 气候容量: 适应气候变化的测度指标[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(2): 1 - 8.

【PAN J H, ZHENG Y, WANG J W, et al. Climate capacity: a measurement for adapting to climate change[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(2): 1-8.】

[6] 张 强, 马 芳, 王 莺, 等. 浅论气候容量及其对气候安全风险管理的作用[J]. 地球科学进展, 2015, 30(6): 709-714.

【ZHANG Q, MA F, WANG Y, et al. A brief discussion about climatic capacity and its effect on risk management of climate safety[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(6): 709-714.】

[7] 於 琨, 卢燕宇, 黄 玮, 等. 气候承载力评估的意义及基本方法[C]//王伟光, 郑国光, 巢清尘, 等. 应对气候变化报告(2015). 北京: 社会科学文献出版社, 2015: 268-280.

[8] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity[J]. Ecological Economics, 1999, 31(3): 395-408.

[9] 白美兰, 郝润全, 高建国, 等. 内蒙古地区气候资源生产潜力及其人口承载力分析评估[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 253-257.

【BAI M L, HAO R Q, GAO J G, et al. Climatic resources potential productivity and its population capacity evaluation in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 253-257.】

[10] 李艳春. 宁夏干旱区气候承载力分布特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 96-99.

【LI Y C. Climate capacity distribution characteristics in Ningxia arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 96-99.】

[11] 付修勇, 张 晶, 王景平, 等. 基于栅格的中国一季稻生产潜力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(4): 99-103.

【FU X Y, ZHANG J, WANG J P, et al. GIS-based study on potential productivity of single-cropping rice in China[J]. China Population, Resource and Environment, 2008, 18(4): 99-103.】

[12] 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[J]. 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[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(11): 2315-2327.】

[13] 王艳君, 高 超, 王安乾, 等. 中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(6): 391-398.

【WANG Y J, GAO C, WANG A Q, et al. Temporal and spatial variation of exposure and vulnerability of flood disaster in China[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(6): 391-398.】

-
- [14] 许莹, 马晓群, 吴文玉. 气候变化对安徽省主要农作物水分供需状况的影响[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 198 - 204.
- 【XU Y, MA X Q, WU W Y. Impact of climate changes on water demand and supply of rice and winter wheat in Anhui Province[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(3): 198 - 204.】
- [15] 何彬方, 冯妍, 荀尚培, 等. 安徽省 50 年日照时数的变化特征及影响因素[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1275 - 1285.
- 【HE B F, FENG Y, XUN S P, et al. Climatic change of sunshine duration and its influencing factors over Anhui Province during the last 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1275 - 1285.】
- [16] 程传周, 杨小唤, 李月娇, 等. 基于不同模型组合的山东省耕地生产潜力计算与分析[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2165 - 2171.
- 【CHENG C Z, YANG X H, LI Y J, et al. Calculation and analysis of cropland potential productivity in Shandong province with different models[J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2165 - 2171.】
- [17] ÅNGSTRÖM A. Solar and terrestrial radiation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50(210): 121 - 126.
- [18] 卢燕宇, 田红, 鲁俊, 等. 近 50 年安徽省太阳总辐射的时空变化特征[J]. 气象科技, 2016, 44(5): 769 - 775.
- 【LU Y Y, TIAN H, LU J, et al. Spatial-Temporal variation characteristics of gross solar radiation in Anhui province from 1961 to 2010[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(5): 769 - 775.】
- [19] 孙懿慧, 贺立源. 基于 GIS 的湖北省水稻生产潜力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1209 - 1215.
- 【SUN Y H, HE L Y. Study of rice potential productivity in Hubei province based on GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1209 - 1215.】
- [20] XU C Y, GONG L B, JIANG T, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2): 81 - 93.
- [21] 陈楷根. 区域环境承载力理论及其应用[D]. 福州: 福建师范大学硕士学位论文, 2002.
- 【CHEN K G. Theory of regional environmental carrying capacity and its application[D]. Fuzhou: Master Dissertation of Fujian Normal University, 2002.】

[22] 姜大川, 肖伟华, 范晨媛, 等. 武汉城市圈水资源及水环境承载力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 761 - 768.

【JIANG D C, XIAO W H, FAN C Y, et al. Research on waterresources and water environment carrying capacities of Wuhan citycircle[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(5): 761 - 768.】

[23] 王东杰. 我国城镇不同收入阶层居民食物消费结构升级研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2012.

【WANG D J. A research about food consumption structure' s upgradeof China urban residents of different income households[D]. Beijing:Master Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.】

[24] 曹志宏, 陈志超, 郝晋珉. 中国城乡居民食品消费变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1173 - 1178.

【CAO Z H, CHEN Z C, HAO J M. Analysis on food consumptionchange tendency of Chinese urban and rural residents[J]. Resourcesand Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1173 - 1178.】