

申红艳, 刘晶淼, 丁裕国, 等. 2011. 基于气候资源向量的相对气候生产潜力模型研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 369–377. Shen Hongyan, Liu Jingmiao, Ding Yuguo, et al. 2011. A study of relative climate production potential model based on climate resource vector [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 369–377.

基于气候资源向量的相对气候生产潜力模型研究

申红艳^{1,2} 刘晶淼³ 丁裕国² 马明亮¹ 郑春雨²

1 青海省气象局, 西宁 810001

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 从气候状态向量的观点出发, 借助于旋转主分量分析方法, 计算各站气候资源向量。在此基础上, 将光照、热量、水分等气候环境条件综合为气候资源向量并分别与某种作物的标准生长模式曲线型建立差异(作物生态适宜度)比较关系, 提出一种新的农业气候生产潜力模型。由此得到相对光合生产潜力、相对光热生产潜力和相对气候生产潜力, 从而改进了原有的经典计算方法。试验表明, 这种改进后的相对生产潜力, 具有普遍性和可比较性, 适合于对某一种作物在不同地区估算产量的比较。

关键词 气候状态向量 相对气候生产潜力 气候资源向量 生态适宜度

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0369-09 **中图分类号** P463.26 **文献标识码** A

A Study of Relative Climate Production Potential Model Based on Climate Resource Vector

SHEN Hongyan^{1,2}, LIU Jingmiao³, DING Yuguo², MA Mingliang¹, and ZHENG Chunyu²

1 *Qinghai Climate Centre, Xining* 810001

2 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044

3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081

Abstract Any regional climate resource is regarded as a kind of climate state vector from the view of climate vector, by means of rotating principal component analysis, the state vector of climate resources is calculated, on the basis of which, the light resource, heat resource, moisture, and other climatic and environmental conditions are integrated as the vector of climate resource. A comparative relationship with a crop growth model of the standard curve is established, and then one new model about the production potential of agro-climatic is put forward. Relative photosynthesis production potential, photo-thermal production potential, and climate production potential have been obtained, all of which prove the limitations of the classic method. The tests show that this improved relative production potential has better universality and comparability, which is suitable for comparing the crop production in different areas.

Key words climate state vector, relative climatic potential productivity, vector of climate resources, ecological adaptation

收稿日期 2009-08-06 收到, 2011-03-16 收到修定稿

资助项目 气象行业专项项目 GYHY (QX) 2007-6-30

作者简介 申红艳, 女, 硕士, 工程师, 主要从事气候分析与诊断工作。E-mail: ishyshen@163.com

1 引言

关于作物气候生产潜力的研究,最早可追溯到 20 世纪 40 年代,但更多的研究工作始于 60 年代以后,特别是 60 年代中期至 70 年代中期,由联合国教科文组织发起的国际生物圈计划 (International Biosphere Plan, IBP),以生物的生产量为中心对世界范围的生物资源进行了深入研究 (Odum, 1981; Lieth, 1985),对作物生产潜力的逐步认识过程使得最初仅从作物的光合效率及干物质生产力的角度考虑,发展为综合考虑光照、温度、水分等气候环境因素来探讨作物的生产潜力。目前,由此所提出的各种计算模型多种多样。

由于水分因素与作物生产力关系的复杂性,以及相关参数获得的难度与精确性等问题,气候生产潜力的研究在总体思路虽已成型,但研究成果的差异性比较以及可靠性程度方面仍存在较多的问题。因而作物生产力研究还未有较大的突破性进展,大多是对以往模型的完善或依据试验资料建立不同区域的模型参数体系。随着电子信息技术的迅速发展,计算机模型与高新技术的结合成为研究农田作物生产潜力的新发展趋势。由于模型复杂且机理性强,包含的参数多,因此模型参数的获取及其可靠性影响到模型的应用。

我国对气候生产潜力研究的历史虽然不长,但发展迅速。从 1960 年代以来,众多学者都相继进行了生产潜力的研究 (竺可桢, 1964; 侯光良和刘充芬, 1985; 黄秉维, 1985),至今这些思想与方法仍为广大农学、气候学、地理学等专家所接受。此后,多位研究者先后提出并计算过各种气候生产潜力模型,不仅涉及光温对作物生长发育的影响,还考虑了作物叶面积动态对作物产量的影响,使得我国光合、光温生产潜力的研究思想体系基本完善。20 世纪 80 年代中期以后,我国作物生产力研究更加广泛 (于沪宁, 1982; 冷石林, 1997; 吕建华和季劲钧, 2002; 梁妙玲和谢正辉, 2006; 莫兴国等, 2006; 黄玫和季劲钧, 2008; 智海等, 2009),例如,将灾害因子引入作物生产力计算中;提出了气候—土壤生产潜力模式,运用了联合国粮农组织 (Food Agriculture Organization, FAO) 的农业生态区域法计算光温

生产潜力,根据作物需水量和降水季节分配的吻合程度,确定各阶段作物水分满足率,计算自然降水生产潜力理论值。随着国外生产潜力数值模型的发展,国内学者也尝试利用生产潜力数值模型模拟计算作物生产潜力,刘建栋等 (2001) 在总结了前人统计模式的基础上,借鉴了国内外地理学、农学、气象学、生物学等领域的最新研究成果,建立了一个光合生产潜力数值模拟模型,并利用中国小麦生态实验资料建立了黄淮海地区冬小麦发育阶段模式和光合作用、呼吸作用等模式 (James et al., 2000; 刘建栋等, 2001)。随着研究手段的不断提高,我国模型研究不断地得到完善和发展。

一般而言,农业气候生产潜力实际上就是当地光、温、水 3 类气候要素的某种复杂函数。所有模型几乎都毫无例外的用各地光合辐射、平均温度、降水蒸发等气候统计量来作为输入因子。从更广泛意义上理解,对于以气候条件为代表的农作物生长环境的需求,不仅要考察光合辐射、平均温度、降水、蒸发等气象要素,还应当考虑更多的气象要素,例如日照时数、太阳总辐射,光合有效辐射、平均温度、最高温度、最低温度、降水量、土壤湿度、蒸发量等。显然,这些要素分别代表了农作物所需要的光照资源、热量资源、水分资源。从理论上说,仅仅考察平均温度并不能代表当地的全部热量条件,而仅仅考察降水量也不能代表当地农作物所要求的水分条件,因为,降水必须通过土壤渗透到作物的根部才能起到充填作物水分需求的功效,这就必然涉及到土壤蒸发和土壤含水量。研究表明,气温、降水、光照 3 个主要气候因子的差异状况与气候生产潜力的对应关系非常明显。由逐级订正的农业气候生产潜力模型的计算过程可以发现,它们涉及到很多气候要素,那么,究竟哪些气候要素才是影响气候生产潜力的最关键因子?

本文利用多个气象要素借助因子分析方法构建气候资源状态向量,提取主要因子,尝试构建一种新的气候生产潜力模型。从理论上说,任何一地的气候状态实质上是由若干个典型气候特征 (气候型) 各按不同权重线性迭加而成的,气候状态的变化则集中反映到这些基本气候型的振幅函数的变化上。基本气候型是每一主因子所对应的

荷载向量，而其振幅函数就是各主因子所构成的向量，当取定有代表意义的主因子个数时，就组成了气候状态向量，因此气候状态向量实质上是 将气候系统的主要信息集中于少数几个分量所组成的状态向量，用来描述系统中各种气候要素的协变性（covariability）特点，即彼此的相互作用，它可集中有效地反映该地气候变化特征（Odum, 1981）。研究表明，光热、湿度和水分指数可反映出主要气候资源丰富程度的信息，它们与气候生产潜力有很好的相关性，对气象产量的积累有很高的指示作用，这也为试图直接建立气候指数与气候生产潜力的定量关系模型提供了依据。

2 气候资源状态向量的构成

选取日照时数、太阳总辐射、光合有效辐射、平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、蒸发比共计 9 个气象要素指标，分别用来表征光、温、水气候条件，利用 1971~2007 年京津冀地区各代表站逐日资料，统计出各指标在冬小麦生长期内（10 月上旬至次年 6 月中旬）的累年逐候平均值，构成基本资料集，即以 9 个指标为变量，构成一个样本为 52、变量为 9 的数据阵，逐站进行因子分析。研究表明，在作物生长期内，气候生产潜力（以最终产量为标志）的年际变化往往与环境气象因子具有一定的对应关系，例如在冬小麦生长期内，其气候生产潜力与气象因子具有十分明显的响应关系，所以作者对气象资料

作累年细化，以便研究一地平均气象条件下的气候生产潜力状况。具体实施方案是：1）首先采用主分量分析提取累积方差贡献达到一定标准（≥85%）的主因子及其荷载；2）对主因子荷载阵进行正交旋转，获取控制该地的少数几个主要气候因子；3）借助于多元线性回归模型建立各公因子与气候生产潜力的关系式。该方法不仅考虑了模型的准确性，而且注重模型的实用性，能较全面并很直接地揭示气候条件与作物气候生产潜力的关系。

在上述 9 个气象指标中，涉及到光合有效辐射和蒸发比的估算，有必要引入有关的计算方法（周允华和项月琴，1996）。现以个别站点为例，来探讨因子分析结果与气候生产潜力的关系。石家庄站旋转前后第一主因子（见表 1）均能较全面反映该站的总体气候特征，但旋转前高荷载值的分布没有明显的分异，各要素对应的荷载值相当，因此不能明确反映气候特征；而旋转后的荷载值分配出现很大的变异，能更加直接地反映出气候形态，其中第一主因子的高荷载值集中于有关光热条件的气候要素（日照时数为 0.83，辐射项均为 0.91，3 个温度指标同为最高荷载项，达 0.97），后两个主因子则突出反映水分状况（其中第二主因子高荷载值 0.99 为相对湿度，第三因子高荷载值 0.64 为降水量，蒸发比为 0.62），其余站点的情况与此相类似。在此将经因子轴旋转后的前三个主分量依次称作光热指数（因子 1）、湿度指数（因子 2）、水分指数（因子 3），并统称为气候指数。

表 1 石家庄站气候状态向量阵正交旋转前后各主因子荷载及累积方差贡献
Table 1 Loading values of every main factor and cumulative variance contribution of the climate state vector matrix before and after rotated at Shijiazhuang station

荷载											
	序号	日照时数	总辐射	光合有效辐射	平均温度	最高温度	最低温度	降水量	相对湿度	蒸发比	累积方差贡献
旋转前	1	0.36	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.35	-0.05	0.15	78.80%
	2	-0.26	-0.19	-0.19	0.15	0.14	0.18	0.28	0.84	0.58	96.10%
	3	-0.03	-0.12	-0.12	-0.18	-0.20	-0.18	0.89	-0.26	-0.50	98.10%
旋转后	1	0.83*	0.91*	0.91*	0.97*	0.97*	0.97*	0.75	-0.01	0.08	60.70%
	2	-0.40	-0.32	-0.32	0.05	0.05	0.09	0.16	0.99*	0.23	81.80%
	3	0.17	0.17	0.17	0.23	0.23	0.24	0.64*	0.06	0.62*	96.60%

* 表示高荷载值。

3 气候主因子与气候生产潜力的关系

表 2 给出各气候指数在冬小麦生长期的不同阶段及全生育期与气候生产潜力的关系。由表 2 可见,不同生长阶段内的气候指数与气候生产潜力的相关程度并不相同,反映出不同时期何种气候指数起了关键性作用。在前期(出苗至越冬)及中期(返青至拔节),光热指数与气候生产潜力的相关较大,冬小麦生理需水量较少,而且土壤底墒也可补充一定的水分供给,所以对自然降水的依赖性不是很大,但光温条件会直接影响冬小麦能否正常分蘖、安全越冬及顺利进入返青期继续生长;而在后期(孕穗至成熟),气候生产潜力与水分指数有很好的相关性,因为这个阶段冬小麦实际需水量较大,依高产小麦标准,大约需要 240 mm(周允华和项月琴,1996),如小花分化时段,正是水分需求量日益增大时期,花粉母细胞四分体形成期是小麦需水临界期。如水分不足,将使小花大量退化,对产量形成不可逆转的影响,因此这个时期水分条件至关重要。湿度指数则在出苗至越冬期相关较好,大气湿度会对土壤湿度有正效应,可间接影响产量积累。由此可见,主要气候指数对产量的影响与冬小麦生长规律比较吻合。就全生育期来讲,光热指数的相关程度最高(0.715),水分指数次之(0.573),且两者均通过 0.001 显著性相关检验,而湿度指数表现出微弱的负相关关系(−0.158)。

表 2 石家庄站光热、湿度、降水指数与气候生产潜力的相关系数

Table 2 Correlation efficients of the light and heat index, humidity index, and precipitation index with the climatic production potential at Shijiazhuang station

时期	光热指数	湿度指数	降水指数
出苗—越冬	0.891***	0.740***	0.104
返青—拔节	0.746***	−0.352**	−0.371**
孕穗—成熟	0.185	0.392**	0.852***
全生育期	0.715***	−0.158	0.573***

*** 和 ** 分别为通过 0.001 和 0.05 的显著性相关检验。

以上分析表明,各气候指数在冬小麦生长阶段对产量形成有不同程度的影响,且指数值的大小对气候生产潜力具有一定的指示作用,所有这

些都一致地表明,气候生产潜力的物理本质就是当地气候资源(光、热、水三者)的丰富程度及其对于农作物生长的影响大小。

4 构建因子分析模型

经以上分析可知,光、热及水分指数可反映主要气候资源丰富程度的信息,它们与气候生产潜力有很好的相关性,对气象产量的积累有很大的指示作用,这也为我们试图直接建立气候指数与气候生产潜力的定量关系模型提供了依据。根据因子分析原理可知,各公因子之间互不相关,因此可利用多元回归方程直接建立气候生产潜力的因子分析模型,以下是依据该方法所建的模型(石家庄站):

$$p = 75.824 + 85.536c_1 - 18.879c_2 + 68.551c_3,$$
$$R = 0.930$$

(1)

其中, p 为气候生产潜力值, c_1 、 c_2 、 c_3 分别为前三个旋转公因子, R 为相关系数。

经检验,因子分析模型具有良好的回归效果,全区所有代表站的回归模型的复相关系数都在 0.899~0.986 之间,一致通过 0.001 的显著性水平检验,拟合误差相当小。由表 3 可见,两种方案所得结果基本吻合,所以利用公因子直接用于生产潜力计算的方法是切实可行的。换言之,在

表 3 华北区各代表站逐级订正值及因子分析模型所得气候生产潜力对照

Table 3 Comparisons of the climate production potential between progressively revised value and factor analysis model for each station in Huabei region $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

站名	逐级订正值	模拟值	站名	逐级订正值	模拟值
蔚县	795.8	795.7	怀来	572.7	572.6
邢台	520.4	520.5	遵化	811.0	811.1
饶阳	553.7	553.6	唐山	751.9	752.0
天津	643.4	643.3	霸县	564.9	565.1
丰宁	703.0	703.3	保定	551.6	551.4
围场	715.4	715.3	沧州	622.3	622.4
青龙	901.8	901.6	石家庄	628.2	628.3
乐亭	814.4	814.5	南宫	530.7	530.6
塘沽	655.1	655.1	北京	853.3	853.2
承德	907.6	907.8	邯郸	551.2	551.2
张家口	571.6	571.7			

建立了主因子回归方程的基础上，利用公因子可以直接计算出各地的气候生产潜力。基于该思路，也可建立主因子与作物实际产量的关系模型，从而为农业产量预报提供一条新的途径。

5 定义相对气候生产潜力

某一品种的农作物产量在地区间具有一定的差异，其原因可能是多方面的，如品种、土壤、施肥、灌溉条件及环境气候因子等。但气候条件通常是影响最终产量的直接因子。换言之，假定 Y_t 为某时期内的实际气象要素值， Y_0 为对应于作物最高产量的适宜气候要素值，则必定可以求得实际的气象要素与适宜气候条件的相对差异 $|Y_t - Y_0|/Y_0$ 。这个相对差异实际上反映了在一地种植该作物时它对于生态环境的适应性状况，即所谓作物生态适应性（ecological adaptation），它表明了“作物生存对生态环境条件的要求与实际生态环境的吻合程度”（魏瑞江和张文宗，2007）。因此，定义作物生态适应度 E 为

$$E = 1 - \frac{|Y_t - Y_0|}{Y_0}, \quad 0 \leq E \leq 1 \quad (2)$$

以冬小麦为例，其生长期内的适宜气候条件如表 4 和表 5。

表 4 河北省冬小麦生长适宜光热条件
Table 4 Light and heat conditions suitable for winter wheat in Hebei Province

生长期	日照时数/h	温度/°C		
		平均	最高	最低
分蘖期	7.1	14	30	0
越冬期	6.8	−2	13	−5
返青期	8.3	5	16	2
拔节期	9.2	14	32	8
抽穗期	9.9	20	35	9
灌浆期	10.3	20	35	10
成熟期	10.5	21	35	11

表 5 河北省冬小麦分旬生理需水量
Table 5 Physiological water in a period of ten days for winter wheat in Hebei Province

	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
上旬	非生理期	10	14	4	2	2	10	20	50	20
中旬	非生理期	8	14	2	2	2	20	40	50	非生理期
下旬	10	8	6	2	2	6	20	40	40	非生理期

利用各代表站 1971~2007 年逐日资料分别统计出冬小麦生长期内的各气象要素的累年平均值，与冬小麦生长期内的适宜气候条件（如表 4 和表 5）相比较，即可计算各地实际气候值与适宜气候值的相对差异即作物生态适宜度。显然，若 E 越大，说明实际气候与所需生态气候条件吻合程度越高，生态适应性越强，作物距高产、优质、高效、生态平衡目标愈近。反之，则不然。

对照按经典方法计算的气候生产潜力图，可以发现日照时数生态适宜度高值区（见图 1）对应光合潜力的高值区；平均温度相对差异由南向北递减（见图 2），对应光温潜力则由南向北逐渐减少；实际降水量与适宜气候条件下需水量的相对差异则是西低东高（见图 3），对应气候生产潜力为西低东高。这反映出生态适宜度与气候生产潜力在区域分布上的完全一致性，说明实际气象条件越接近最适气候条件，会更有利于作物生长，气候潜力相应就越高。在生长期内，日照时数的相对差异与光合生产潜力的相关系数为−0.61，平均温度的相对差异

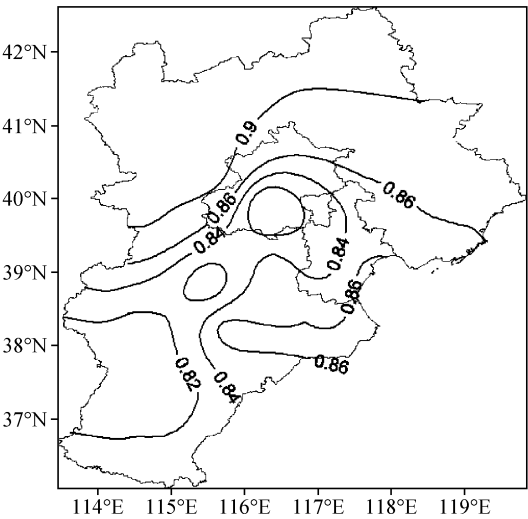


图 1 京津冀地区冬小麦日照时数生态适宜度
Fig.1 Ecological adaptation of the sunshine-hour about winter wheat in Beijing, Tianjin, and Hebei region

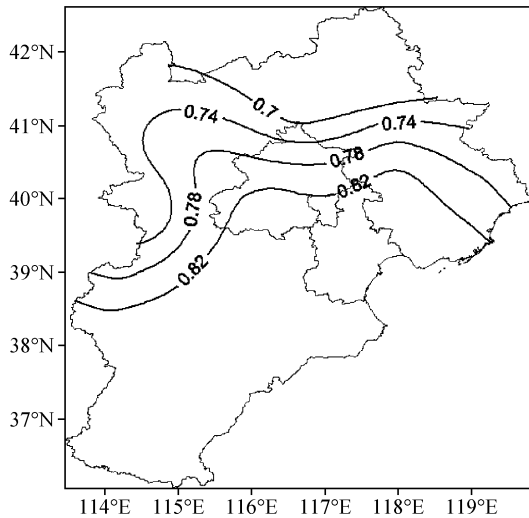


图2 同图1, 但为温度生态适宜度

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for ecological adaptation of the temperature

与光温生产潜力的相关系数为 -0.603 , 降水量的相对差异与气候生产潜力的相关系数为 -0.674 , 均通过信度 99% (相关系数临界值为 0.5368) 的显著性检验, 表明气象条件的差异程度与气候生产潜力具有显著的相关性。对比光、温、水3大要素, 其中日照时数的生态适应度最高, 全区平均 85.6% , 温度次之, 水分适宜度最小, 反映了自然降水与作物最适生长条件下的需水量差距最大。

以上大致讨论了单个气象因子的主要影响, 而作物的气候产量是由光、温、水等综合气象条件所决定的, 那么气象条件的综合优劣程度会对作物的生产力产生多大的影响, 下面将做进一步评估。将上节理想化高产干物重通过经济系数 (冬小麦取 0.4) 换算为产量指标, 以此作为该地区冬小麦的理想化最高产量 (董树亭, 2007), 即是指气候、土壤、社会生产条件等均适宜的状况下之产量, 而气候生产潜力是在社会生产水平、土壤、肥力等条件均满足时的最高气象产量, 所以气候生产潜力偏离理想化产量的多少就是由于各项气候条件综合亏缺引起的理论减产量。基于此, 本文提出综合气候条件亏缺引起的减产率为

$$p_c = (Y_m - Y_c) / Y_m \times 100\%, \quad (3)$$

其中, Y_m 为理想化产量, Y_c 为气候生产潜力。同样可依次定义温度不适引起的减产率 p_t 和水分亏缺引起的减产率 p_r 分别为

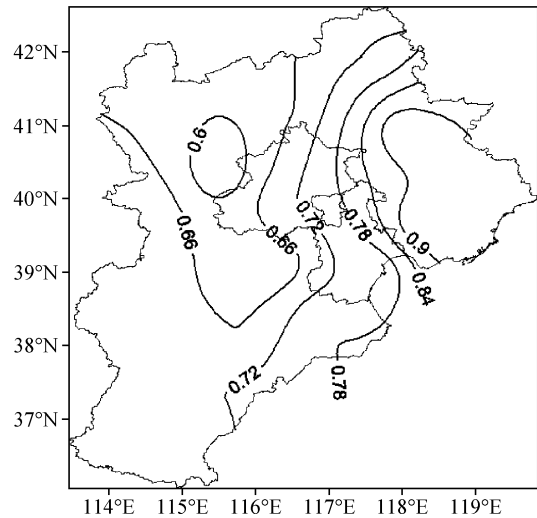


图3 同图1, 但为水分生态适宜度

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for ecological adaptation of the water

$$p_t = (Y_s - Y_t) / Y_s \times 100\%, \quad (4)$$

$$p_r = (Y_t - Y_c) / Y_t \times 100\%, \quad (5)$$

其中 Y_s 、 Y_t 分别为光合及光温生产潜力。以上各项减产率可全面反映不同的气候要素及其组合对产量的胁迫程度, 全区由综合气候条件亏缺引起的减产率为 $9.1\% \sim 47.9\%$, 冀东北地区减产率最小, 高值区主要包括北京及冀南平原地区, 减产率在 40% 以上, 呈带状分布 (如图4所示); 其中温度不适导致减产 $32.8\% \sim 45.7\%$, 全区平均 36.8% , 且北部高于南部; 水分亏缺减产 $38.6\% \sim 64.6\%$, 平均减产 52.7% , 呈西南 (高) —东北 (低) 型分布, 可见因水分不足造成的减产率最高, 若能保证水分充足, 该地区平均气候产量有望提高近1倍, 北京、天津及冀南平原增产潜力甚至更大, 说明京津冀地区冬小麦生产尚有很大的潜力可供发掘。

综上所述, 将气候生产潜力与上述理想化产量的比值定义为相对气候生产潜力, 就可直观衡量一个地区气候潜力及增产潜力的状况, 并能反映出气候资源组合优势状况, 如一地相对生产潜力越高, 表明该地各项气候资源相匹配, 比较有利于某作物生长。表6给出了冬小麦生长期平均气候适宜度、减产率及相对生产力。全区相对气候生产潜力大约在 $52.1\% \sim 90.3\%$, 其空间分布型 (图5) 与综合气候条件亏缺引起的减产率呈相反的地理分布。由图5大致可反映出, 冀东平

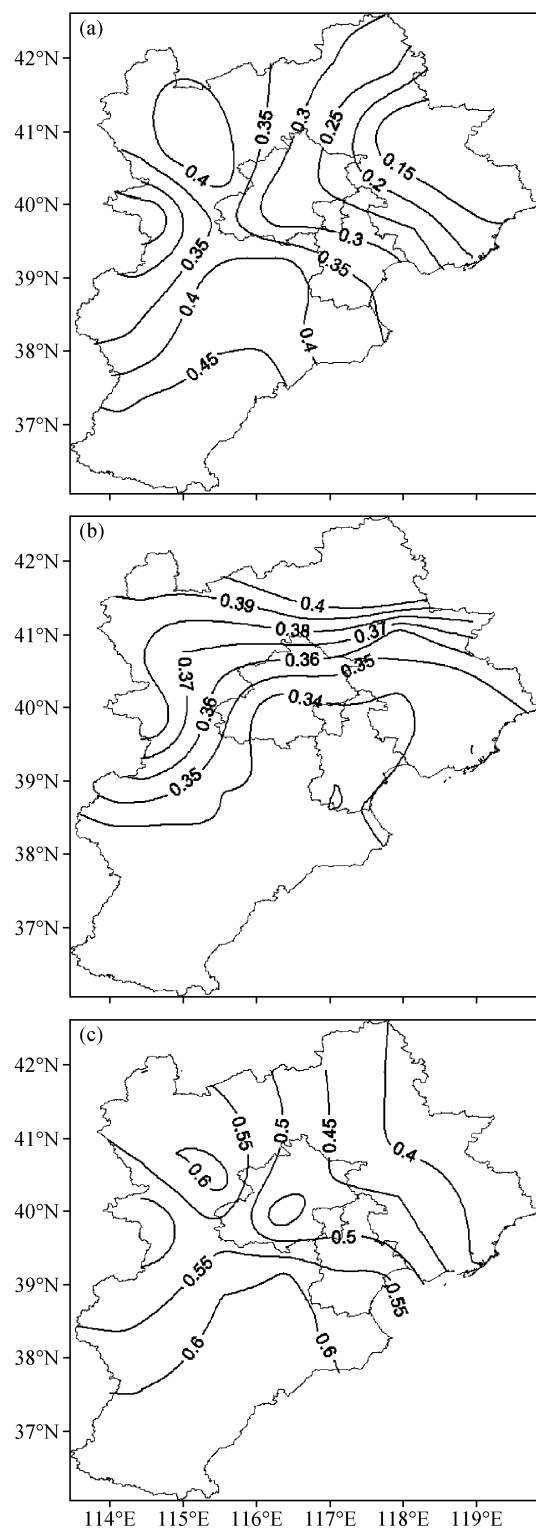


图4 (a) 综合气候亏缺、(b) 温度不适和 (c) 水分亏缺引起的减产率的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of reduction rate caused by (a) climate scarcity, (b) temperature, and (c) water

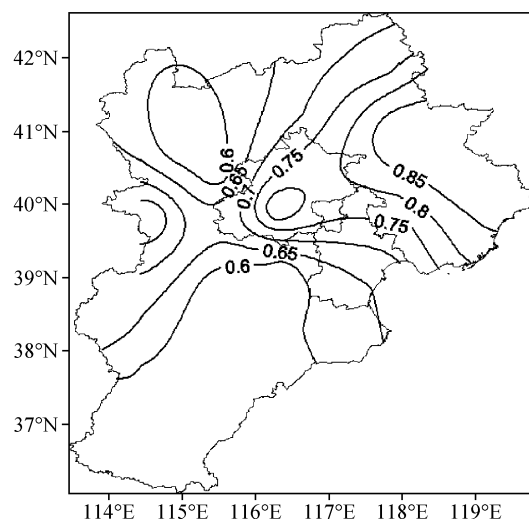


图5 相对气候生产潜力空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the relative climatic production potential

原及丘陵区相对气候生产潜力最高，基本在 80% 以上，表明这个地区光、温、水资源组合最佳，很适合冬小麦生长，而燕山山地及冀南平原不足 60%。结合以上结果可知，主要是由于自然水分不能满足需求，造成组合失衡，产生这种地区差异状况。

6 结论

本文从气候状态向量的观点出发，将任一地区或局地气候资源状况视为某种气候状态向量。借助于旋转主分量分析方法，计算各站气候资源状态向量，在此基础上，提出一种新的农业气候生产潜力模型。将光照（光合）、热量、水分等气候环境条件综合为气候资源状态向量并分别与某种作物的标准生长模型建立差异比较关系，进一步定义作物的生态适宜度。由此得到相对光合生产潜力、相对光热生产潜力和相对气候生产潜力，从而改进了原有的经典计算模型的局限性。试验表明，这种改进后的相对生产潜力，具有普遍性和可比较性，适合于对某一种作物在不同地区估算产量的比较。以华北地区为例，初步分析了研究区的实际光温水条件与冬小麦适宜气候条件的差异及其引起的气候生产潜力差别状况，结果表明二者有很好的对应关系，即气象条件的差异越

表 6 冬小麦生长期内平均气候适宜度、减产率及相对生产力

Table 6 Averaged climatic adaptation, reduction rate, and relative production potential during the growing period for winter wheat

站名	平均气候适宜度			减产率			相对气候生产力
	日照时数	平均温度	降水量	p_t	p_r	p_c	
蔚县	92.3%	68.8%	71.8%	38.5%	44.5%	20.3%	79.7%
邢台	79.7%	86.6%	60.9%	33.1%	62.6%	47.9%	52.1%
饶阳	86.6%	84.7%	65.8%	34.1%	61.7%	44.6%	55.4%
天津	82.7%	83.7%	71.8%	33.6%	55.6%	35.6%	64.4%
丰宁	90.4%	66.8%	66.8%	39.0%	47.9%	29.6%	70.4%
围场	90.4%	58.9%	72.8%	45.7%	40.1%	28.4%	71.6%
青龙	89.5%	77.8%	89.5%	34.8%	38.8%	9.7%	90.3%
乐亭	84.7%	82.7%	96.2%	35.1%	39.6%	18.5%	81.5%
塘沽	86.6%	83.7%	71.8%	33.8%	57.2%	34.4%	65.6%
承德	89.5%	75.8%	94.9%	35.2%	38.6%	9.1%	90.9%
张家口	88.5%	76.8%	62.9%	36.9%	59.8%	42.8%	57.2%
怀来	94.1%	79.7%	53.9%	35.6%	61.8%	42.7%	57.3%
遵化	85.6%	83.7%	87.6%	34.1%	44.8%	18.8%	81.2%
唐山	84.7%	83.7%	94.5%	33.9%	46.0%	24.7%	75.3%
霸县	84.7%	84.7%	61.9%	34.0%	61.3%	43.4%	56.6%
保定	79.7%	84.7%	62.9%	33.5%	60.3%	44.8%	55.2%
沧州	85.6%	84.7%	77.8%	34.0%	59.5%	37.7%	62.3%
石家庄	79.7%	85.6%	76.8%	33.2%	57.2%	37.1%	62.9%
南宫	81.7%	85.6%	71.8%	34.3%	62.8%	46.9%	53.1%
北京	78.7%	83.7%	70.8%	33.0%	42.1%	24.6%	85.4%
邯郸	82.7%	85.6%	65.8%	32.8%	64.6%	44.8%	55.2%

大, 气候生产潜力越小, 反之亦然; 然后从综合气象条件及资源利用率的角度借助减产率和相对气候生产潜力探讨出影响气候生产潜力的主要气象因子, 得知降水量是影响京津冀地区气候生产潜力的最主要胁迫因子, 若能保证充足的水分供给, 该地区气候产量有望提高 1 倍多。最后利用因子分析方法提取有代表意义的公因子, 发现各公因子在不同生长期与气候生产潜力有很好的相关性, 例如在中前期 (出苗至拔节期), 代表光温条件的公因子与气候生产潜力的相关最好, 而在后期 (孕穗至成熟期), 与水分因子的相关最大, 鉴于以上结果及因子分析的特性, 构建了公因子与气候生产潜力的多元回归模型, 即可利用公因子直接估算出气候生产潜力, 该模型具有良好的回归效果, 拟合误差很小, 从而避免了逐级订正法计算气候生产潜力的复杂性, 同时也为作物产量预报提供了一条新思路。

参考文献 (References)

- 董树亭. 2007. 作物栽培学概论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 198-236. Dong Shuting. 2007. Introduction to Crop Cultivation [M] (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 198-236.
- 侯光良, 刘充芬. 1985. 我国气候生产潜力及其分区 [J]. 自然资源, 19 (3): 52-59. Hou Guangliang, Liu Chongfen. 1985. Production potential and its area in China [J]. Natural Resource (in Chinese), 19 (3): 52-59.
- 黄秉维. 1985. 中国农业生产潜力—光合潜力 [C] //地理集刊 (17). 北京: 科学出版社, 500-522. Huang Bingwei. 1985. China's agricultural production potential—The potential photosynthetic [C] //Geography Bulletin (17) (in Chinese). Beijing: Science Press, 500-522.
- 黄玫, 季劲钧. 2008. 青藏高原 1981~2000 年植被净初级生产力对气候变化的响应 [J]. 气候与环境研究, 13 (5): 608-614. Huang Mei, Ji Jinjun. 2008. The response of vegetation net primary productivity to climate change during 1981-2000 in the Ti-

- betan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (5): 608-614.
- James W H. 2000. Scaling-up crop models for climate prediction applications [M] // Sivakumar MVK, eds. Climate Prediction and Agriculture. Washington DC, USA: International START Secretariat, 77-117.
- 冷石林. 1997. 开发北方旱农地区自然降水生产潜力的主要限制因素及途径 [J]. 中国农业气象, 18 (1): 13-17. Leng Shilin. 1997. Dryland farming in the northern region, the natural development of the productive potential of precipitation in the major constraints [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 18 (1): 13-17.
- 梁妙玲, 谢正辉. 2006. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 11 (5): 582-591. Liang Miaoling, Xie Zhenghui. 2006. Simulation of climate effects on vegetation distribution and net primary production in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 582-591.
- Lieth. 1985. 生物圈的第一性生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 299-296. Lieth. 1985. The Primary Productivity of the Biosphere [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 299-296.
- 刘建栋, 周秀骥, 于强. 2001. FAO 生产潜力模型中基本参数的修正 [J]. 自然资源学报, 16 (3): 240-247. Liu Jiandong, Zhou Xiuji, Yu Qiang. 2001. Modification of the basic parameters in FAO productivity model [J]. Natural Resource (in Chinese), 16 (3): 240-247.
- 吕建华, 季劲钧. 2002. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 [J]. 大气科学, 26 (2): 255-262. Lü Jianhua, Ji Jinjun. 2002. A simulation study of atmosphere-vegetation interaction over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 26 (2): 255-262.
- 莫兴国, 郭瑞萍, 林忠辉. 2006. 无定河区域 1981~2001 年植被生产力和水量平衡对气候变化的响应 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 477-483. Mo Xingguo, Guo Ruiping, Lin Zhonghui. 2006. Responses of gross primary productivity and water balance components in Wuding River region, the eastern part of the Loess Plateau from 1981 to 2001 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 477-483.
- Odum E P. 1981. 生态学基础 [M]. 北京: 人民教育出版社, 42-61. Odum E P. 1981. Fundamentals of Ecology [M] (in Chinese). Beijing: People's Education Press, 42-61.
- 魏瑞江, 张文宗. 2007. 河北省冬小麦生育期气象条件定量评价模型 [J]. 中国农业气象, 28 (4): 367-370. Wei Ruijiang, Zhang Wenzong. 2007. A quantitative evaluation model of meteorological factors during growing period of winter wheat in Hebei Province [J]. Chinese Journal of Agro-meteorology (in Chinese), 28 (4): 367-370.
- 于沪宁. 1982. 光热资源和农作物的光热生产潜力 [J]. 气象学报, 40 (3): 321-327. Yu Huning. 1982. Light and heat resources and crop production potential of light and heat [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 40 (3): 321-327.
- 智海, 王盘兴, 俞永强, 等. 2009. 印度洋海温异常对南亚区域净初级生产力影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 33 (5): 936-949. Zhi Hai, Wang Panxing, Yu Yongqiang, et al. 2009. Simulation of influence of Indian Ocean sea surface temperature anomaly on the net primary production in South Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 936-949.
- 周允华, 项月琴. 1996. 光合有效量子通量密度的气候学计算 [J]. 气象学报, 54 (4): 447-454. Zhou Yunhua, Xiang Yueqin. 1996. Climatological estimation of quantum flux densities [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 447-454.
- 竺可桢. 1964. 论我国气候的几个特点及其粮食作物生产的关系 [J]. 地理学报, 10 (1): 1-13. Zhu Kezhen. 1964. Research on several features of the climate and relations between most crop production [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 10 (1): 1-13.