

中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征

汤勇华¹, 黄耀^{1,2}

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2.中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:利用农业统计数据 and 土壤属性数据, 将业已建立的地力贡献率统计模型与 GIS 技术耦合, 研究了中国大陆 3 种主要粮食作物(水稻、小麦和玉米)的地力贡献率和基础产量的空间分布特征。结果表明, 地力贡献率和基础产量空间分布差异较大。其中, 玉米的生长受钾素的影响较大, 高值区分布在华北平原和东北春玉米区, 基础产量和地力贡献率分别为 $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 51%; 低值区分布在华中华南一带, 为 $1.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 33%。其余作物的高产区分布在东部沿海以及长江黄淮流域, 特别是华东华中和四川盆地, 低产区主要分布在华北以北以及西南丘陵地带。统计分析表明, 地力贡献率和基础产量对水稻生产的贡献最大, 且空间变异小。冬小麦地力贡献率和基础产量的变异系数均大于其他各作物。该研究能较好地模拟我国 3 种作物的基础产量, 可为区域尺度农田指导施肥和控制农业生态环境胁迫提供依据。

关键词:地力贡献率; 基础产量; 统计模型; GIS; 空间分布

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)05-1070-09

Spatial Distribution Characteristics of the Percentage of Soil Fertility Contribution and Its Associated Basic Crop Yield in Mainland China

TANG Yong-hua¹, HUANG Yao^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Agricultural soil basic fertility includes percentage of soil fertility contribution (PSFC) and its associated basic crop yield. In the present study, the statistical models on the PSFC to crop yield was adopted to examine the spatial distribution characteristics of the PSFC and the basic yield of rice, wheat and maize in mainland China by using database consisting of production and area of crops from 1996 to 2000, combined with GIS technique. The PSFC and the basic yield of crops showed a large difference in the spatial distribution. Specifically, the growth of maize was greatly affected by the potassium. The basic yield and PSFC were $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 51% in the North China Plain and Northeast area, which were greater than those ($1.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 33%) in the South Central Region. For rice and wheat crops, the high yield areas of other crops were distributed in the eastern coastal areas, the Huang-Huai basin and Yangtze River valley, especially in the Central, East China and Sichuan basin under the suitable conditions of soil and hydrothermal for crop growth. In contrast, the low production regions were primarily located in the northern part of north China and the southwest hills under unfavorable environment conditions. Statistical analyses showed that the PSFC and basic yield contributed most to the growth of rice with little spatial variation. The variation coefficient of the the PSFC and basic yield was larger for winter wheat than for other crops. The results of this study suggest that the basic yield of three crops can be well simulated by using the statistical models. Therefore, these models can be employed to establish the croplands fertilizer application strategy on regional scale.

Keywords: percentage of soil fertility contribution to crop yield; basic yield; statistical model; GIS; spatial distribution

收稿日期: 2008-08-12

基金项目: 科技部 863 计划 (2006AA10Z224-1); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX2-YW-432-4)

作者简介: 汤勇华 (1982—), 女, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向为环境过程与系统模型。E-mail: tt1983_1983@163.com

通讯作者: 黄耀 E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

大力提高粮食产量是解决我国粮食安全问题的关键,而粮食的增产离不开施肥。化肥作为粮食的“粮食”,在追求产量的前提下被过度地使用,同时,人们忽视化肥的配合施用、土壤养分的供应、有机肥资源的利用以及大气和水体养分资源的重要性,造成了低资源利用率和高环境风险^[1-7]。我国目前化肥施用量已经接近或超过现有土壤环境的最大容量和作物最高产量的化肥需求量^[8],为防止土壤生态环境污染的发展,弄清楚农业自然资源与社会经济资源投入与产出的关系,对化肥资源进行区域间的合理配置,有着极其重要的现实意义。一些学者从土壤、大气和水体的角度分别进行研究,有针对性地提出对策,并在保证产量和保护环境的前提下提出最佳的农田管理制度^[9]。这些农田管理制度尚未得到区域上的推广,但是为我们提供了一个很好的理论基础。以此为目标,运用 GIS 技术和模型探讨生产潜力等深层次的精准农业研究^[10-12]开始普及并趋于成熟。总的来说,完善农业自然资源最大化利用,是缓解农业生态环境胁迫的关键。

大量的实验结果表明土壤肥力与作物产量密切相关。农田基础地力包括地力贡献率(PSFC)和基础产量,是衡量土壤基础肥力的综合指标^[13-15],根据基础地力水平可确定适宜的施肥量。然而目前尚未有对全国尺度土壤肥力进行的评价。本研究从土壤养分的角度出发,采用已建立的地力贡献率统计模型^[16],结合目标产量,定量计算中国不同区域上世纪 90 年代 3 种主要粮食作物农田地力贡献率和基础产量,全面研究中国农田土壤肥力的空间分布特征,为进一步研究区域化肥合理施用及控制化肥施用的环境胁迫提供依据。

1 材料与方法

利用已建立的不同作物地力贡献率与环境因子的统计模型^[16],将模型参数以 GIS 空间数据库形式输入,模拟估计 3 种主要粮食作物在中国大陆不同区域的 PSFC 和基础产量(即地力产量)。

1.1 地力贡献率模型

表 1 为 3 种主要粮食作物的地力贡献率模型,该模型经验证具有较好的解释性。

1.2 基础产量的估算及验证

由表 1 求得地力贡献率,根据目标产量及地力贡献率估算农田基础产量:

$$Y_0 = \text{PSFC} \times Y_A (\pm SD) \quad (1)$$

式中: Y_0 为基础产量, Y_A 为目标产量,本研究采用

表 1 3 种作物地力贡献率统计模型^[16]

Table 1 Statistical model of percentage of soil fertility contribution of three crops

作物与种植区域	方程
北方单季稻	$\text{PSFC} = 118.9 - 1.74x_2 - 0.47x_5x_6 + 3.13 \times 10^{-3}x_5x_6x_7$
南方单季稻	$\text{PSFC} = 52.4 + 0.22x_4 + 0.48x_6$
早稻	$\text{PSFC} = -157.6 + 1.92x_1 - 6.67x_5 + 0.69x_6$
晚稻	$\text{PSFC} = -5.97 + 2.08x_2 + 7.77 \times 10^{-3}x_6x_7$
北方冬小麦	$\text{PSFC} = 12.8 + 1.23x_3 + 0.14x_7$
南方冬小麦	$\text{PSFC} = -95.7 + 3.37x_2 + 1.34x_3 + 2.21x_5x_6 + 25.21 \times 10^{-3}x_6x_7 - 29.39 \times 10^{-3}x_5x_6x_7$
春小麦	$\text{PSFC} = 10.6 + 0.83x_6 + 0.18x_7$
春玉米	$\text{PSFC} = -38.5 + 2.05x_1 - 4.20x_2 + 1.23x_4$
夏玉米	$\text{PSFC} = -399.6 + 3.62x_1 + 0.15x_7 + 3.08 \times 10^{-3}x_6x_7$

注:PSFC 为地力贡献率(%),表示不施肥时的作物产量与适宜肥料施用下的产量之比。 x_1 和 x_2 分别表示经度和纬度($^{\circ}$), x_3 为土壤有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), x_4 为粘粒含量(%), x_5 为土壤全氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), x_6 和 x_7 分别表示土壤速效磷和速效钾含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1996—2000 年统计资料中各县不同作物的平均单产作为 Y_A ,假定该时段内作物中相对稳定,没有区域范围的品种更替。 SD 为目标产量年际变化的标准差,以 $Y_A (\pm SD)$ 作为目标产量年际变化的上下限,由此计算基础产量平均值及其上下限对应的全国基础产量平均值(该平均值范围表达为基础产量阈值)。基础产量验证的数据主要来源于中国期刊网和维普科技期刊网,相关文献 204 篇,运用文献中各参数估算基础产量,并将估算结果与文献实测结果比较,确定估算结果的有效性。

1.3 数据来源与空间化方法

土壤资料包括土壤有机质、粘粒含量、全氮、速效磷和速效钾等,来自南京土壤所;全国的经度和纬度数据资料由全国 10 km 栅格尺度的行政区划矢量图中提取得到;1996—2000 年主要农作物产量及播种面积来自中国农科院的统计资料,以县级行政单元为统计单位;1:100 万的县域行政区划空间数据库是以 1995 年国家行政区划现状为基础编制。

为实现地力贡献率统计模型的区域化应用,利用 GIS 技术将中国行政区划图划分成 10 km×10 km 的栅格。将各个参数连接到行政区划图,按照面积权重法获得目标产量的栅格化数据资料,土壤数是点数据,采用空间插值的算法,把分布不均的点拓展到全国区域内^[17]。使得每个栅格有一组用于计算的参数,将不同作物地力贡献率统计模型(表 1)应用于每个栅格单元获得地力贡献率,根据各栅格的目标产量和

方程(1)求得基础产量。

2 结果与分析

2.1 不同作物地力贡献率的空间分布与统计特征

单季稻 PSFC 呈现越往北越低趋势,黑龙江省最低,全省平均为 37%,湖南、云南等地单季稻 PSFC 最高 70%以上(图 1-a),这与作物生育期土壤水热条件的不同有关,水稻为喜温作物,适宜的温光条件和淹水-烤田水分管理促进土壤养分的释放和作物的吸收^[18-19]。全国单季稻有两个较明显的 PSFC 高值区:长江中下游地区和四川盆地。

双季稻种植的安全栽培条件为 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 5 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右,低于此条件,水稻易遭受低温冻害^[20],因此只分布在长江流域以南。总的来说,该区域内,双季稻的 PSFC 略低于单季稻,就空间分布规律而言,双季稻 PSFC 较高的区域主要在东部沿海地区,其中江浙一带在 60%以上;PSFC 较低的区域分布在西南地区。同时由于早晚稻种植的时期不同导致各生育期受热条件不同,这一差异直接影响了土壤养分的释放,从而造成早稻与晚稻的 PSFC 在空间分布上有所差异(图 1-b,c)。

小麦 PSFC 在 3 种作物中最低,从全国范围来看,春小麦 PSFC 基本上集中在 30%~50%之间(图 1-

d)。冬小麦种植面积较大,北方小麦的 PSFC 高于南方,这与小麦的品种及生长特性有关^[21-23],长江以南地区由于土壤气候条件限制,PSFC 较低;华东地区土壤有机质丰富气候条件适宜,而甘肃西北部及新疆麦区光照时间长,昼夜温差大,且土壤肥沃,有利于光合作用及干物质积累^[23],PSFC 均较高。

玉米的 PSFC 分布规律为从东往西、从南往北均呈上升趋势,夏玉米 PSFC 最低,平均为 33%,高值区出现在东北三省(图 1-e)。西南和西北地区属于山地和灌溉区,玉米种植面积较少,数据难于收集,本文没有进行分析。

各作物的 PSFC 空间变异总体呈正态分布(图 2)。按中位数两侧 80%频率统计,南方单季稻变化幅度最小,为 57%~67%,春玉米的变化范围最大,为 31%~71%。水稻、小麦和玉米的 PSFC 大部分集中在 35%~70%,18%~62%和 15%~71%。

表 2 为各作物在不同种植区的 PSFC 平均值和变异系数。南方单季稻 PSFC 平均值最大且其变异系数最小,说明土壤对该作物生长的贡献大,空间分异小。冬小麦 PSFC 的空间变异程度大于其他各作物的变异系数,南方冬小麦尤为突出。夏玉米的 PSFC 平均值仅为 32.91%,其空间变异达到 37.6%。其余各作物 PSFC 平均值在 38%~55%之间,变异范围在 14%~30%。

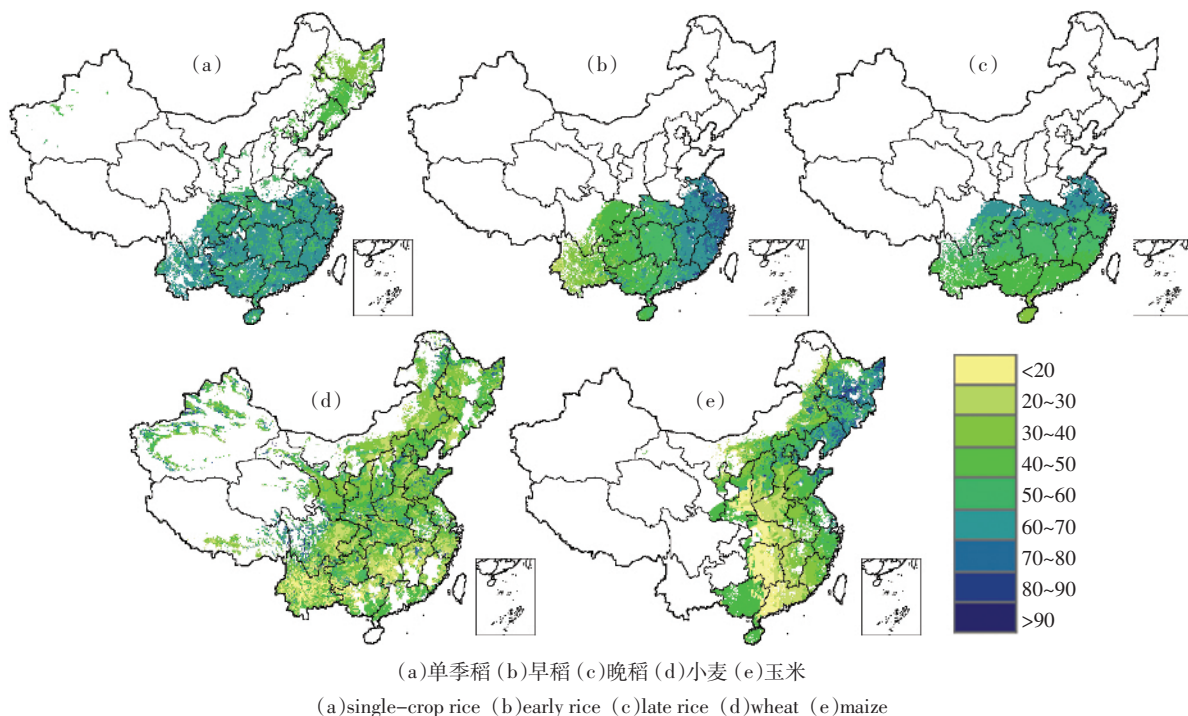


图 1 各作物地力贡献率空间分布(%)

Figure 1 Spatial distribution of PSFC (%) for different crops

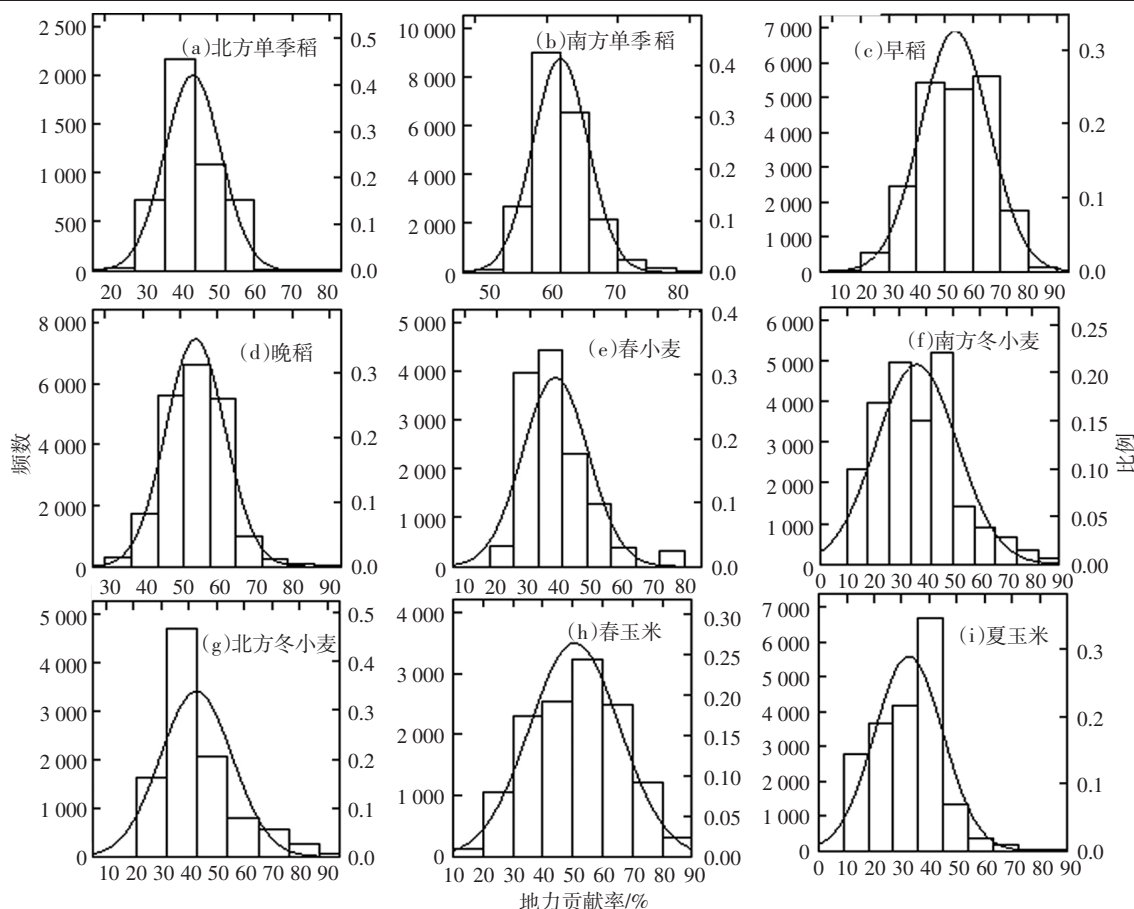


图 2 各作物不同地力贡献率的频率分布

Figure 2 Frequency distribution of PSFC for different crops

表 2 各作物的地力贡献率

Table 2 PSFC of different crops

作物与种植区域	样本数(栅格单元)	PSFC 平均值/%	变异系数/%
北方单季稻	4 754	43.43	17.5
南方单季稻	21 335	61.93	6.2
平均	26 089	58.42	7.8
早稻	21 181	53.63	22.8
晚稻	21 181	54.15	14.6
北方冬小麦	10 048	43.06	30.1
南方冬小麦	23 545	36.65	41.5
平均	33 583	38.58	37.7
春小麦	13 098	38.55	26.6
春玉米	13 251	51.06	29.6
夏玉米	19 237	32.91	37.6

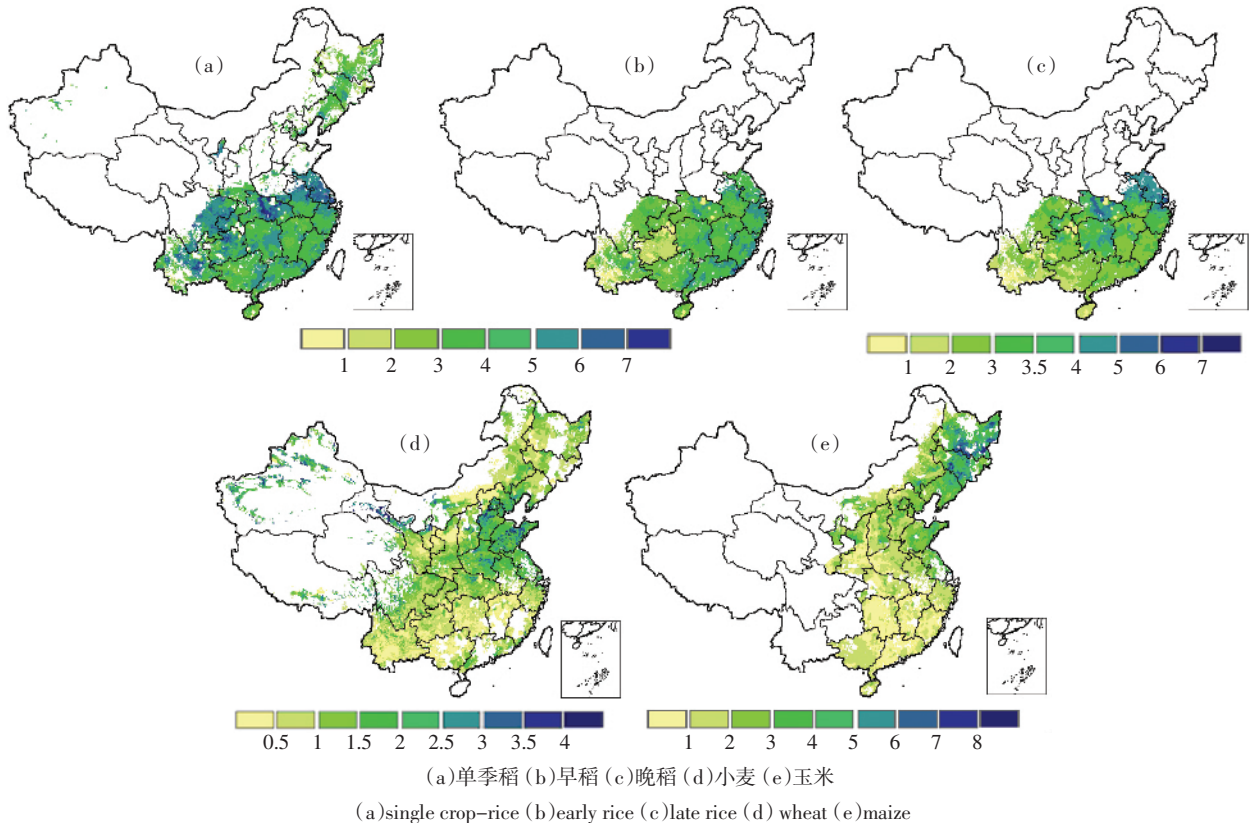
2.2 不同作物基础产量的空间分布与统计特征

从图 3-a 中可以看出,受当地的气候条件的影响,东北地区单季稻基础产量最低(图 3-a),平均 $3.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;南方单季稻产量出现越往东南越低的现象,东南地区适合水稻生长,其 PSFC 较高,但由于当地的复种指数高,水稻种植类型以双季稻为主,单季稻种

植面积较小且种植在丘陵山地^[24-26],造成其基础产量相对较低(图 3-b,c);双季稻的基础产量总体低于单季稻。长江流域水稻产区有充足的水热条件,不论是单季稻还是双季稻,基础产量大多在 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。

从全国范围来看,大部分小麦种植区的基础产量低于 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 3-d)。北方小麦的生长受土壤有机质的影响较大,产量随土壤有机质含量的提高而提高,甘肃省土壤有机质含量在小麦种植区内较低^[27],全省基础产量则平均为 $1.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦高产区分布在东部沿海以及长江黄淮流域,特别是山东、河南、江苏等省,这些地区在小麦生长季内有适宜的温度和降水条件。同时,西北的少量小麦种植区也有较高产量;低产区主要在西南丘陵地带,理由是当地的土壤条件较差,小麦生长的温度较高。小麦基础产量分布总趋势为中部大于其他地方。

全国玉米基础产量整体偏低,其分布趋势为北部地区高于南部。玉米高产区在华北平原和东北春玉米区,平均基础产量为 $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,低产区在中南一带(图 3-e),平均 $1.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这是由于玉米地力与地理

图3 各作物基础产量的空间分布($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)Figure 3 Spatial distribution of basic yield ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) for different crops

位置有极显著的相关关系,在相对温度较高的地区玉米地力较低,有研究表明,随着 CO_2 和其他温室气体浓度不断的增加,气温变暖,我国华北玉米区将来也可能有较大幅度减产^[28];同时,玉米的生长对土壤速效钾依赖较大,南方地区是我国缺钾土壤的集中区域^[29],且近年来没有得到足够的钾素补充,速效钾的不足成为玉米产量的主要限制因子。由此可见,当前平衡土壤肥力和控制气候恶化对玉米生产有着极其重要的意义。

图4为不同作物区域尺度基础产量平均值频率分布。基础产量受地力贡献率和目标产量共同影响,尽管地力贡献率正态分布趋势显著,由于目标产量变异较大,造成南方冬小麦和玉米基础产量的正态性不显著。其余作物基础产量空间变异总体呈正态分布。各地春小麦基础产量变化幅度最小,为 $0.39\sim 1.84\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;春玉米的变化范围最大,为 $1.20\sim 5.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;水稻、小麦和玉米的基础产量大部分集中在 $1.78\sim 5.14\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $0.31\sim 2.76\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.51\sim 5.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占总样本数的80%。各作物基础产量平均值在 $1.41\sim 4.21\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,其变异系数与 PSFC 的变化趋势一致。南方单季

稻变异系数最小,冬小麦的空间变异程度大于其他各作物的变异系数。各作物基础产量变异范围为 6.1%~41.4%(表3)。

各作物基础产量上下限阈值差异较大,春玉米为 $4.18\sim 2.65\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,上限与下限相差 $1.54\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;北方冬小麦差异最小,为 $0.33\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其余各作物基础产量上下限差异在 $0.35\sim 0.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间(表3)。

2.3 不同作物基础产量估算结果验证

一般情况下,通过大田实验可获得基础产量和目标产量。但是,由于实验数据所涵盖的范围不足以代表整个农作区,运用实验的方法获得国家尺度农作区各点的产量显然是不现实的。因此,本研究通过模型的方法运用目标产量统计数据,估算国家尺度农田 PSFC 和基础产量。

图5为1990—2007年不同作物类型不同试验点基础产量实测值(X)和本研究预测值(Y)的比较,拟合结果相关性较好($R^2=0.75, n=387$),说明统计数据可信度较高,同时模型对基础产量有较高的模拟能力。但是由于本研究没有考虑作物品种的年际更替,因此趋势线出现一定截距。

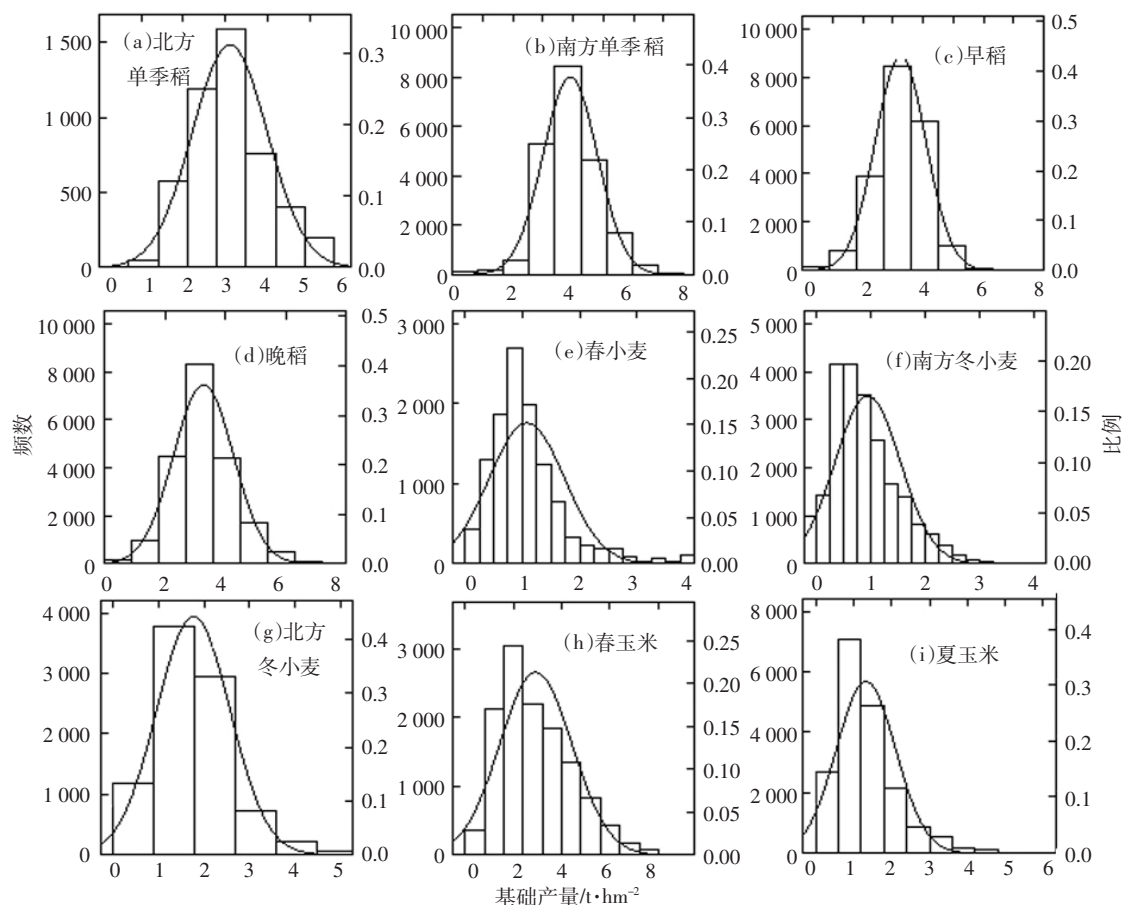


图 4 各作物不同基础产量的频率分布

Figure 4 Frequency distribution of basic yield of different crops

表 3 各作物的基础产量

Table 3 The basic yield of each crops

作物与种植区域	样本数(栅格单元)	基础产量/t·hm ⁻²	变异系数/%
北方单季稻	4 754	3.71~3.04	17.4
南方单季稻	21 335	4.68~4.23	6.1
平均	26 089	4.49~3.99	7.8
早稻	21 181	3.67~3.28	22.9
晚稻	21 181	3.28~2.92	14.6
北方冬小麦	10 048	1.96~1.63	30.0
南方冬小麦	23 545	1.60~1.22	41.4
平均	33 583	1.80~1.45	37.3
春小麦	13 098	1.37~0.99	27.7
春玉米	13 251	4.18~2.65	29.7
夏玉米	19 237	1.97~1.50	37.7

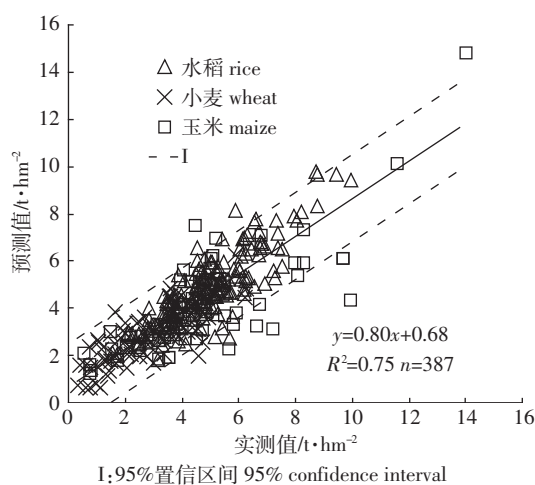


图 5 中国主要农作物基础产量模拟值与实测值比较

Figure 5 Comparison of simulated basic yield against observed basic yield of main crop in China

3 讨论

作物品种是影响基础产量的重要因素,但是中国幅员辽阔,同一作物类型的品种数以千计,客观上难以按品种进行研究。因此,本研究对 3 种作物进行了

区域上的划分,未来需要收集更多资料,对作物不同品种或品种类型的基础产量进行更细致研究。

PSFC 具有持续性和稳定性的特点^[19],研究表明,

PSFC 的变幅在 15%~70%之间,且在不同作物生长中的重要性各不相同,参考本研究结果,可为土壤肥力的培育管理和指导施肥提供依据。比较不同 PSFC 区域的施肥情况发现,黑龙江是我国纬度最高的地区,当地土壤条件较好,全省小麦田 PSFC 平均为 41%,根据中国农科院统计资料,将氮肥施用量按比例分配,发现该地区 2000 年小麦田氮肥实际施用量为 $61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小麦平均单产 $1.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,按本研究结果采用养分平衡方法估算出当氮肥施用量为 $188 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦单产可达到历年最高值 $3.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,实际的氮肥施用量远远不能满足作物生长的需求,造成当地小麦难以达到高产,在这些区域可适当增加化肥的投入;沿海地区化肥施用量充足,未被利用的化肥在土壤中长期积累,2000 年江苏地区 3 种作物 PSFC 在 41%~70%之间,按本文方法估算得到其目标产量下氮肥总盈余 $3.85 \times 10^8 \text{ kg}$,占总施氮量的 30.0%,实际施用氮肥量远远高于实际需氮肥量;同时有研究表明,江苏约有 71.8% 的农田存在氮肥过剩现象^[29],这些地区应当限制氮肥的供应,以免造成经济损失和环境污染。

同时,本研究有少量区域 PSFC 估算结果出现异常(>80%或<10%)和基础产量偏低的现象(图 1、图 3),这与实际情况有一定出入^[30-31]。其原因可能在两方面:首先,PSFC 的变化受诸多因素的影响,而很多因素通常在大尺度空间范围内是欠缺的,为使模型在空间上适用,本研究所用的统计模型是对真实系统进行的适当简化,因此,模型的精度受到一定的影响,其估算结果存在一定的不确定性。其次,尽管模型估算的 PSFC 是以空间单元为单位的,但所用的目标产量一方面是以县为单位的,即假设一个县的作物产量是相同的,而实际上每个县内不同田块的作物产量是差异很大的,因此,按照现有的目标产量计算,必然会造成基础产量较大的不确定性。未来还须在目标产量计算方面寻求更合理的方法。

在利用统计模型进行区域化模拟时,参数的类型和精度受到限制。如土壤参数,在空间上呈点状分布,要获得参数的区域状况,需要对这些点状分布的观测数据进行空间插值,但是通过空间插值模型算法得到的估计值与该单元的实际值存在一定的误差。将目标区域划分成 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的栅格,将每一个栅格都假定为各参数均匀分布的,这与实际情况是有一定差异。每个栅格仅有一组模型输入参数且栅格尺寸较大,造成土壤属性数据的分辨率较低,农

业生产相关信息粗略,这些假设前提也给估算结果带来一定误差。

4 结论

利用地力贡献率统计模型可以很好地描述中国大陆 3 种主要粮食作物地力贡献率和基础产量空间分布特征和区域差异,为我国充分利用自然资源,控制化肥环境胁迫提供决策依据。模拟结果表明,玉米受钾素分布的影响,高值区分布在华北平原和东北一带,低值区分布在中南一带,其余各作物 PSFC 和基础产量的高值区都分布在东部沿海以及长江黄淮流域,特别是华东、华中和四川盆地,这些区域土壤肥力较好,所需外源肥料少,若在这些区域大量地施用化肥,必然会造成肥料利用率低,环境污染严重;而对于华北以北以及西南丘陵地带的低值区应逐步提高化肥的施用量,以达到提高作物产量和培肥土壤的目的。统计分析结果表明,各作物 PSFC 和基础产量空间变异程度不同,其中冬小麦变异系数最大,南方单季稻变异最小。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科技出版社, 1992.
ZHU Zhao-liang. Soil nitrogen of China[M]. Nanjing: Jiangsu Technology Press, 1992.
- [2] 曹仁林, 贾晓葵. 我国集约化农业中氮污染问题及防治对策[J]. 土壤肥料, 2001(3): 3-6.
CAO Ren-lin, JIA Xiao-kui. The problems and control countermeasures of nitrogen pollution in agriculture of China[J]. *Soil Fertility*, 2001(3): 3-6.
- [3] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J]. 土壤通报, 2006(4): 782-785.
SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Research advances in nitrogen fertilization and its environmental effects[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006(4): 782-785.
- [4] Mosier A R, C Kroeze. A new approach to estimate emissions of nitrous oxide from agriculture and its implications for the global N_2O budget[J]. *IGBP Newsletter*, 1998, 34: 8-13.
- [5] 黄 耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
HUANG Yao. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722-732.
- [6] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 33-40.
MA Wen-qi, ZHANG Fu-suo, ZHANG Wei-feng. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3): 33-40.

- [7] 王澈清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422.
WANG Ji-qing, MA Wen-qi, JIANG Rong-feng, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. *Resources Science*, 2008, 30(3): 415-422.
- [8] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1158-1165.
LI Dong-po, WU Zhi-jie. Impact of chemical fertilizers application on soil ecological environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1158-1165.
- [9] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 656-660.
HUANG Guo-qin, WANG Xing-xiang, QIAN Hai-yan, et al. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 656-660.
- [10] 封志明, 杨艳昭, 张 晶, 等. 从栅格到县域: 中国粮食生产的资源潜力区域差异分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 747-755.
FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao, ZHANG Jing, et al. A GIS based study on the grain productivity and potential yield increase at multi-levels in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 747-755.
- [11] 李 艳, 史 舟, 吴次芳, 等. 基于模糊聚类分析的田间精确管理分区研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 114-122.
LI Yan, SHI Zhou, WU Ci-fang, et al. Definition of management zones based on fuzzy clustering analysis in coastal saline land[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 114-122.
- [12] Jiyun Jin, Cheng Jiang. Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P. R. China[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002(36): 165-172.
- [13] 汤建东, 叶细养, 饶国良, 等. 土壤肥力长期定位试验研究初报[J]. 土壤与环境, 1999, 8(2): 113-116.
TANG Jian-dong, YE Xi-yang, RAO Guo-liang, et al. A preliminary report on long-term stationary experiment on soil fertility[J]. *Soil and Environmental Science*, 1999, 8(2): 113-116.
- [14] 夏圣益. 土壤基础地力、施肥水平与农作物产量的关系[J]. 上海农业科技, 1998(1): 6-8.
XIA Sheng-yi. Study on the relationship among the soil basic fertility, fertilization level and crop yield [J]. *Shanghai Agricultural Science*, 1998(1): 6-8.
- [15] 张爱君, 张明普, 张洪源. 土壤基础肥力对夏玉米养分吸收和产量的影响[J]. 玉米科学, 1999, 7(2): 71-74.
ZHANG Ai-jun, ZHANG Ming-pu, ZHANG Hong-yuan. Effect of soil basic fertility on nutrient absorption and production of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 1999, 7(2): 71-74.
- [16] 汤勇华, 黄 耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率及其影响因素的统计分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1283-1289.
TANG Yong-hua, HUANG Yao. Statistical analysis of the percentage of soil fertility contribution to grain crop yield and driving factors in mainland China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1283-1289.
- [17] 张 稳. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
ZHANG Wen. Estimation of methane emissions from rice fields of China based on integration of model and GIS technology[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2004.
- [18] 胡少宜. 漳州市水稻土的地力贡献率初探[J]. 土壤, 1992, 24(1): 46-47.
HU Shao-yi. The preliminary study of the percentage of paddy soil fertility contribution in Zhangzhou City[J]. *Soils*, 1992, 24(1): 46-47.
- [19] 郭熙盛, 张辛未, 叶舒娅. 稻田地力贡献与合理施肥[J]. 安徽农业科学, 1994(1): 41-44.
GUO Xi-sheng, ZHANG Xin-wei, YE Shu-ya. Study on the contribution of paddy soil fertility and optimum fertilization[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 1994(1): 41-44.
- [20] 徐 琪, 杨林章. 中国稻田生态系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 29-31.
XU Qi, YANG Lin-zhang. Paddy land eco-system of China [M]. Beijing: China Agriculture Publication, 1998: 29-31.
- [21] 吴 姝, 张树源, 沈允钢. 昼夜温差对小麦生长特性的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 333-337.
WU Shu, ZHANG Shu-yuan, SHEN Yun-gang. Influence of temperature difference between day and night on the growth characteristics in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(3): 333-337.
- [22] 梁银丽, 康绍忠, 张成娥. 不同水分条件下小麦生长特性及氮磷营养的调节作用[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(4): 58-64.
LIANG Yin-li, KANG Shao-zhong, ZHANG Cheng-e. Growth characteristics of winter wheat and adjustment of nitrogen and phosphorus on it under different water conditions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(4): 58-64.
- [23] 何中虎, 林作楫, 王龙俊, 等. 中国小麦品质区划的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 359-364.
HE Zhong-hu, LIN Zuo-ji, WANG Long-jun, et al. Classification on Chinese wheat regions based on quality[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(4): 359-364.
- [24] 季彪俊. 影响水稻产量因子的研究[J]. 西南农业大学学报, 2005, 27(5): 579-583.
JI Biao-jun. Study on the affecting factors on rice yield[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2005, 27(5): 579-583.
- [25] 季彪俊, 杨世湖. 早晚稻产量影响因子分析[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(2): 131-136.
JI Biao-jun, YANG Shi-hu. Analysis of the influencing factor of rice grain yield[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, 27(2): 131-136.
- [26] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况[J]. 土壤学报, 1989(3): 280-286.
LU Ru-kun. General status of nutrients(N, P, K) in soil of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989(3): 280-286.
- [27] 吴乐知, 蔡祖聪. 中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 965-972.
WU Le-zhi, CAI Zu-cong. The relationship between the spatial scale and the variation of soil organic matter in China[J]. *Advance in Earth Science*, 2006, 21(9): 965-972.

- [28] 金之庆, 葛道阔, 郑喜莲, 等. 评价全球气候变化对我国玉米生产的可能影响[J]. 作物学报, 1996, 22(5): 513-524.
- JIN Zhi-qing, GE Dao-kuo, ZHENG Xi-lian, et al. Assessing the potential impacts of global climate change on maize production in China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(5): 513-524.
- [29] 朱大威, 黄 耀, 金之庆, 等. 基于模型和 GIS 的江苏省氮肥施用适宜性分析——以 2000 年为例[J]. 中国农业科学, 2008, 41(5): 1373-1382.
- ZHU Da-wei, HUANG Yao, JIN Zhi-qing, et al. Nitrogen management evaluated by models combined with GIS—A case study of Jiangsu croplands in 2000[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1373-1382.
- [30] 王蓉芳, 黄德明, 崔 勇. 我国不同地区土壤肥力监测报告(1988-1997)一、东北区土壤肥力变化趋势及原因分析[J]. 土壤肥料, 2000(6): 8-13.
- WANG Rong-fang, HUANG De-ming, CUI Yong. The report of soil fertility monitoring in different areas of China(1988-1997) I. The trend of soil fertility change and the reasons analysis in northeastern China[J]. *Soil Fertility*, 2000(6): 8-13.
- [31] 王蓉芳, 黄德明, 崔 勇. 我国不同地区土壤肥力监测报告(1988-1997)二、南方二熟制稻田区土壤肥力变化趋势及原因分析[J]. 土壤肥料, 2002(2): 3-8.
- WANG Rong-fang, HUANG De-ming, CUI Yong. The report of soil fertility monitoring in different areas of China(1988-1997) II. The trend of soil fertility change and the reasons analysis in double rice cropping system of southern China[J]. *Soil Fertility*, 2002(2): 3-8.

致谢:感谢南京土壤所提供土壤数据库, 中国农业科学院提供分县作物单产等数据。