

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

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:通过对国内大量文献数据的调研和整理,采用数理统计方法,研究了中国大陆3种主要粮食作物(水稻、小麦和玉米)地力贡献率的统计特征及其与地理位置和土壤理化性质的定量关系。统计分析表明,水稻、小麦和玉米地力贡献率的空间变异总体呈正态分布,3种作物地力贡献率的均值和标准差依次为 $60.2\% \pm 12.5\%$ ($n=121$)、 $45.7\% \pm 15.7\%$ ($n=91$)、 $51.0\% \pm 19.7\%$ ($n=54$)。单因子相关分析表明,各类作物在不同种植区的地力贡献率与土壤基本特性及地理位置间存在显著的相关关系。基于相关分析结果,采用逐步回归分析方法,分别建立了北方和南方单季稻、冬小麦;双季早稻、双季晚稻、春小麦、春玉米和夏玉米地力贡献率的统计模型。残差分析结果表明,所建立的统计模型具有较好的解释性,可用于估算不同作物的地力贡献率,为制定区域尺度农田施肥策略和控制农业面源污染提供依据。

关键词:地力贡献率;土壤特性;地理位置;统计分析

中图分类号:S181 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1283-07

Statistical Analysis of the Percentage of Soil Fertility Contribution to Grain Crop Yield and Driving Factors 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: Based on the analysis of a mass of datasets extracted from published papers, we studied the statistical feature of the percentage of soil fertility contribution (PSFC) to grain crop yield and established the quantitative relationship of PSFC against soil properties and geographical locations in mainland China. Three crops of rice, wheat and maize were involved. The objective of this study is to help local farmers make an optimal decision on fertilization according to the quantified PSFC and thus mitigate agricultural pollution. The results indicated that the spatial variation of PSFC for rice, wheat and maize followed a normal distribution in general. The values of mean and standard deviation of PSFC were $60.2\% \pm 12.5\%$ ($n=121$), $45.7\% \pm 15.7\%$ ($n=91$), $51.0\% \pm 19.7\%$ ($n=54$) for rice, wheat and maize, respectively. Pearson correlation analysis suggested that PSFC for the three crops significantly correlated with local soil properties and geographical location in different regions. On the basis of the PEARSON correlation analysis, statistical models of PSFC against soil properties and geographical locations were developed by using stepwise regression for single rice and winter wheat in northern and southern China, early rice, late rice, spring wheat, maize planted in spring and in summer, respectively. An analysis of residuals showed that the models could explain the observed datasets quite well, suggesting the models could be employed to estimate the PSFC of crops on a regional scale.

Keywords: percentage of soil fertility contribution to crop yield; soil properties; geographical location; statistical analysis

收稿日期: 2008-01-04

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

随着农村经济的迅猛发展,化肥施用量逐年增加,部分地区因化肥施用不当引发一系列环境问题,包括水体富营养化^[1,2]、地下水污染^[3,4]和农田温室气体排放增加^[5-7]等,化肥施用不当的主要原因之一是缺乏对土壤肥力的客观估计。衡量土壤肥力对作物产量的贡献一般用地力贡献率(percentage of soil fertility contribution,以下简称 PSFC)表示,PSFC 为不施肥时的作物产量与适宜肥料施用下的产量之比,其高低取决于作物类型、气候和土壤特性,变幅为 20%~75%^[8-13]。自上世纪 80 年代起,国内学者在 PSFC 方面进行了不少的研究^[14-18],但大都是基于小区域作物的单一研究,虽然这类研究结果在特定的作物、土壤和气候条件下具有实践意义,但难以为制定区域尺度的施肥策略服务。可喜的是,这些研究积累了大量试验数据,这为从区域尺度上定量分析 PSFC 的变异规律及其影响因素提供了基础。本文试图通过对国内大量文献数据的调研和分析,初步阐明中国 3 种主要粮食作物(水稻、小麦和玉米) PSFC 的统计特征以及与环境因子的定量关系,以期制定区域尺度农田施肥策略和控制农业面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 中国大陆 3 种作物的主要种植区域

水稻、小麦和玉米是我国的主要粮食作物,播种面积约占粮食作物总播种面积的 75%,产量约占 86%^[19]。水稻是我国种植面积最大的粮食作物,单季稻种植区主要分布在东北、华北、西南地区及华中和华东部分地区,双季稻种植主要在华南地区及华中和华东部分地区。小麦是仅次于水稻的主要粮食作物,分为冬小麦和春小麦。冬小麦约占小麦种植面积的 84%,主要分布在华北、华中、华东和西南地区;春小麦主要分布在东北和西北地区。玉米种植区主要分布在东北、华北、华中、西南和西北部分地区,其中春玉米和夏玉米约占 75%以上^[20]。

1.2 数据来源

通过对中国期刊网及维普科技期刊网检索,共获得 1990 至 2000 年涉及中国大陆农业主产区 3 种作物的基础产量、最高产量、地力贡献率、地理位置及土壤理化性状等信息的相关文献 160 余篇,这些文献覆盖了 260 余个空间样点(图 1)。对于未报道土壤理化性状的文献,采用《中国土种志》中最接近试验点的土壤数据。

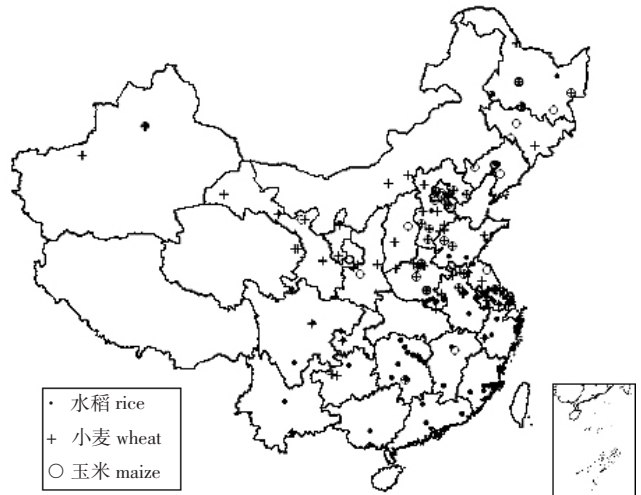


图 1 试验样点的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of the experimental sites

1.3 分析方法

地力贡献率取决于土壤、气候、作物类型和品种。中国幅员辽阔,同一作物类型的品种以千计,客观上难以按品种进行研究。考虑到种植制度和作物品种的区域特征,将种植面积较大的单季稻和冬小麦以秦岭-淮河为界分为北方和南方种植区;玉米按春玉米、夏玉米分类。

用于统计分析的土壤参数包括粘粒含量(Clay,%),有机质(SOM, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、全氮(TN, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、速效磷(Pa, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和速效钾(Ka, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量,以及氮磷钾的交互作用。氮磷钾的交互作用采用两两乘积(TN $\times$ Pa、TN $\times$ Ka、Pa $\times$ Ka)和三者乘积(TN $\times$ Pa $\times$ Ka)的形式。由于大部分文献未报道试验区的气候条件,根据气候分异规律,本研究假定某地气候条件由该地的经度(LONG, $^{\circ}$)和纬度(Lat, $^{\circ}$)确定。数据整理和统计分析分别用 Excel 和 SPSS13.0 统计软件完成。采用多元逐步回归分析方法建立分区作物的 PSFC 统计模型,并对其进行残差分析。

2 结果与分析

2.1 不同作物地力贡献率的统计特征

图 2 为水稻、小麦和玉米 PSFC 的频率分布。可以看出,这 3 种作物 PSFC 的空间变异总体呈正态分布,具有明确的统计特征和较好的空间代表性。水稻、小麦和玉米 PSFC 的均值和标准差依次为 $60.2\% \pm 12.5\%$ ($n=121$)、 $45.7\% \pm 15.7\%$ ($n=91$)、 $51.0\% \pm 19.7\%$ ($n=54$)。方差分析表明,不同作物的 PSFC 差异显著

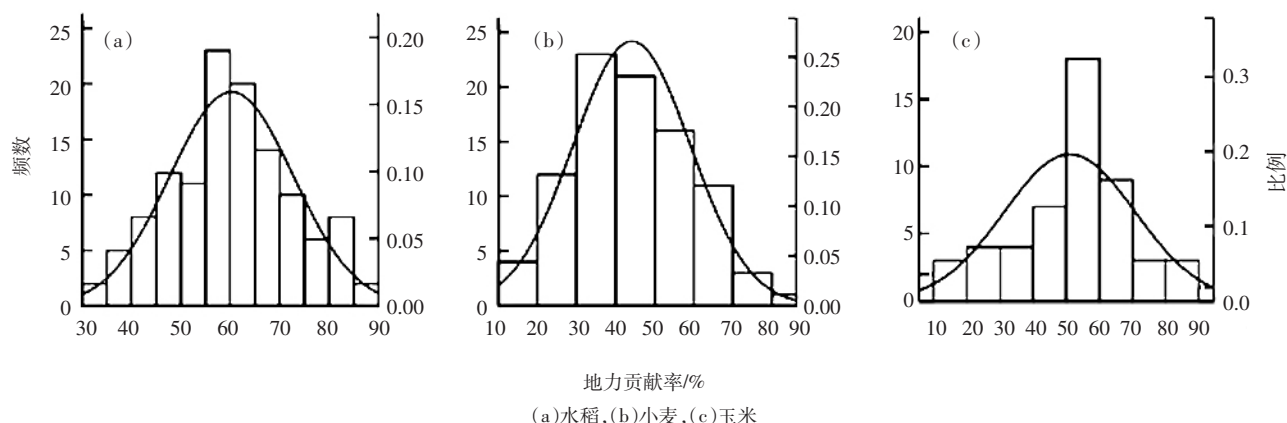


图 2 3 种作物不同地力贡献率的频率分布

Figure 2 Frequency distribution of PSFC of three crops,(a)rice,(b)wheat and(c)maize

($P<0.001$)。水稻作物的 PSFC 明显高于小麦和玉米,可能的原因是水稻为喜温作物,适宜的温光条件促进土壤养分的释放和作物的吸收,淹水也提高土壤的供磷能力^[21]。

2.2 不同作物地力贡献率的影响因素

表 1 为不同作物地力贡献率与地理位置及土壤因子的相关分析结果。可以看出,北方单季稻的 PSFC 与土壤理化特性的相关关系不显著,但随纬度增加而降低;南方单季稻、早稻和晚稻的 PSFC 与土壤速效磷含量或氮磷钾的交互作用(TN×Pa、Pa×Ka、TN×Pa×Ka)呈显著或极显著正相关,这意味着这些区域水稻的地力贡献率主要取决于磷素的供应。春小麦和北方冬小麦与水稻不同,地力贡献率主要取决于土壤钾素的供应、氮钾或磷钾的交互作用;南方冬小麦的 PSFC 与土壤速效磷呈弱正相关。春玉米的 PSFC 与土壤参数间的相关性不明显,但随经度的增加而提高。夏玉

米的 PSFC 与土壤磷、钾含量或氮磷钾的交互作用呈显著正相关。除春小麦外,其他作物的 PSFC 与土壤全氮含量的相关关系不显著。北方冬小麦和夏玉米的 PSFC 随土壤有机质含量增加而提高。

2.3 不同作物地力贡献率的统计模型

为进一步定量描述土壤性质和地理位置对地力贡献率的综合影响,以地力贡献率(PSFC,%)和表 1 所列因子(x_i)分别为因变量和自变量,采用多元逐步回归分析建立如下统计模型:

$$\text{PSFC} = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad (1)$$

式中: C_i 为回归系数。表 2 为各统计模型选入的影响因子、回归系数及显著性检验,其中标准回归系数表示各自变量对地力贡献率的相对重要性。

从表 2 可以看出,综合影响我国单季稻 PSFC 的综合因素为地理位置、土壤氮磷钾和粘粒含量。北方单季稻 PSFC 随纬度升高而降低,其主要原因是气温

表 1 不同作物地力贡献率与地理位置及土壤因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of PSFC against soil properties and geographical location

作物与种植区域	相关因子										样本数(<i>n</i>)	
	LONG	Lat	Clay	SOM	TN	Pa	Ka	TN×Pa	TN×Ka	Pa×Ka		TN×Pa×Ka
北方单季稻	0.044	−0.609**	0.295	−0.219	−0.112	0.074	−0.003	0.003	0.007	0.210	0.146	19
南方单季稻	−0.033	0.085	0.272	0.009	−0.048	0.626***	0.051	0.622***	−0.028	0.574***	0.508***	40
早稻	0.547**	−0.395*	−0.234	−0.176	−0.345	0.559**	0.201	0.422*	−0.098	0.497**	0.424*	32
晚稻	−0.009	−0.035	−0.124	0.168	0.159	0.626***	0.397*	0.727***	0.329	0.721***	0.733***	30
北方冬小麦	−0.306	0.178	0.060	0.555**	0.370	0.374*	0.612***	0.432*	0.617***	0.501**	0.506**	28
南方冬小麦	−0.001	0.129	0.049	0.261	0.190	0.363*	−0.024	0.236	0.105	0.197	0.141	37
春小麦	−0.040	0.167	0.265	0.376*	0.389*	0.663***	0.705***	0.499**	0.479*	0.696***	0.488*	26
春玉米	0.433*	0.115	0.252	0.054	0.011	0.371	−0.385	0.318	−0.166	0.228	0.181	23
夏玉米	0.243	0.170	0.095	0.467**	0.319	0.505**	0.487**	0.474**	0.476**	0.518**	0.495**	31

注: *、**、*** 分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 概率水平下显著。

Note: *, **, *** indicate significant at 0.05, 0.01 and 0.001.

随纬度升高而降低,较低的温度不利于土壤养分的释放。纬度、氮磷钾及氮磷交互作用的变化可解释北方单季稻 PSFC 空间变异的 60.5% ($R^2=0.605$), 且土壤理化特性对 PSFC 的贡献高于前者,三者的标准回归系数分别为-0.552、1.869 和-1.667(表 2)。南方单季稻 PSFC 变化的 45.4%可由土壤速效磷和粘粒的变化得以解释,前者的贡献(0.617)高于后者(0.249)。土壤氮、磷和地理位置可解释我国早稻 PSFC 变化的 57.6%。综合影响晚稻 PSFC 的因素包括磷钾的交互作用和地理纬度, 这些因素可解释 PSFC 变化的 61.5%。

影响我国冬小麦 PSFC 的综合因素为地理位置、土壤有机质和氮磷钾含量(表 2)。北方冬小麦 PSFC 变化的 47.0%可由速效钾和有机质含量来解释,前者

的相对贡献高于后者。南方冬小麦 PSFC 随纬度升高而上升,纬度、土壤有机质及氮磷钾交互作用的变化可以解释其 PSFC 变化的 44.2%。速效磷和速效钾是春小麦 PSFC 的主要限制因子,两者可解释其空间变异的 63.8%(表 2)。

春玉米和夏玉米的 PSFC 由东部向西部地区增加,地理位置和土壤粘粒含量可解释春玉米 PSFC 空间变异的 54.8%(表 2)。与春玉米不同,夏玉米的 PSFC 空间变异还取决于土壤速效磷和速效钾含量,经度和磷钾含量的变化可解释夏玉米 PSFC 空间变异的 47.6%(表 2)。

2.4 地力贡献率统计模型的残差估计

模型的残差(观测值-模拟值)估计按 PSFC 均值将作物分为两组:水稻($PSFC=60.2\%\pm 12.5\%$)为一组;

表 2 不同作物地力贡献率统计模型及显著性检验

Table 2 Statistical models of PSFC for different crops and significant test

作物与种植区域	常数与影响因子	回归系数 ^{b)}	标准回归系数	P	样本数	显著性
北方单季稻	$C_0^{a)}$	118.9(± 21.5)	0.000	<0.001	19	$R^2=0.605, P=0.003$
	TN $\times$ Pa $\times$ Ka	3.13(± 1.12) $\times 10^{-3}$	1.869	0.013		
	TN $\times$ Pa	-0.47(± 0.19)	-1.667	0.026		
	Lat	-1.74(± 0.54)	-0.552	0.006		
南方单季稻	C_0	52.4(± 1.7)	0.000	<0.001	40	$R^2=0.454, P<0.001$
	Pa	0.48(± 0.09)	0.617	<0.001		
	Clay	0.22(± 0.11)	0.249	0.047		
早稻	C_0	-157.6(± 65.5)	0.000	0.023	32	$R^2=0.576, P<0.001$
	Pa	0.69(± 0.21)	0.424	0.003		
	TN	-6.67(± 2.81)	-0.294	0.025		
	LONG	1.92(± 0.57)	0.429	0.002		
晚稻	C_0	-5.97(± 22.35)	0.000	0.791	30	$R^2=0.615, P<0.001$
	Lat	2.08(± 0.80)	0.342	0.015		
	Pa $\times$ Ka	7.77(± 1.18) $\times 10^{-3}$	0.870	<0.001		
北方冬小麦	C_0	12.8(± 6.6)	0.000	0.066	28	$R^2=0.470, P<0.001$
	Ka	0.14(± 0.05)	0.452	0.010		
	SOM	1.23(± 0.58)	0.349	0.043		
南方冬小麦	C_0	-95.7(± 39.1)	0.000	0.020	37	$R^2=0.442, P=0.002$
	Pa $\times$ Ka	25.21(± 8.80) $\times 10^{-3}$	1.196	0.007		
	TN $\times$ Pa $\times$ Ka	-29.39(± 8.46) $\times 10^{-3}$	-2.032	0.002		
	TN $\times$ Pa	2.21(± 0.68)	1.080	0.003		
	Lat	3.66(± 1.12)	0.544	0.005		
春小麦	SOM	1.3(± 0.40)	0.640	0.002	26	$R^2=0.638, P<0.001$
	C_0	10.6(± 7.6)	0.000	0.176		
	Ka	0.18(± 0.05)	0.504	0.002		
	Pa	0.83(± 0.28)	0.425	0.007		
春玉米	C_0	-38.5(± 30.6)	0.000	0.224	23	$R^2=0.548, P=0.001$
	Lat	-4.20(± 1.09)	-1.338	0.001		
	LONG	2.05(± 0.46)	1.277	<0.001		
	Clay	1.23(± 0.46)	0.587	0.014		
夏玉米	C_0	-399.6(± 146.7)	0.000	0.011	31	$R^2=0.476, P<0.001$
	Pa $\times$ Ka	3.08(± 1.56) $\times 10^{-3}$	0.355	0.058		
	Ka	0.15(± 0.07)	0.388	0.045		
	LONG	3.62(± 1.24)	0.425	0.007		

注:^{a)}方程(1)的常数项;^{b)}括号内数值为标准误。

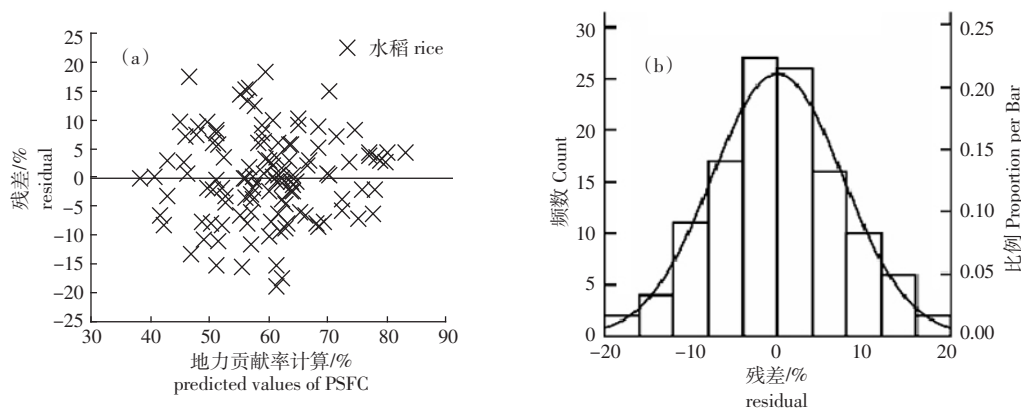


图 3 水稻地力贡献率模型残差分布

Figure 3 Distribution of residual error estimated by the PSFC model for rice

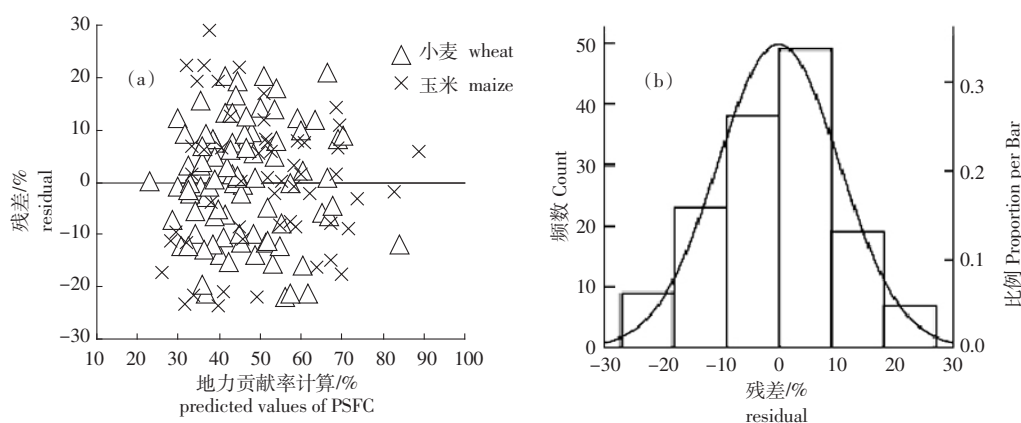


图 4 小麦、玉米地力贡献率模型残差分布

Figure 4 Distribution of residual error estimated by the PSFC model for wheat and maize

另一组为小麦 ($\text{PSFC}=45.7\%\pm 15.7\%$) 和玉米 ($\text{PSFC}=51.0\%\pm 19.7\%$)。

图 3 为水稻 PSFC 模型的残差估计及其频率分布, 残差总体 ($n=121$) 呈正态分布, 分布在 $\pm 15\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 5\%$ 的频率分别占 93%、84% 和 48% (图 3b)。小麦和玉米 PSFC 模型的残差总体 ($n=145$) 亦呈正态分布, 分布在 $\pm 15\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 5\%$ 的频率分别占 79%、60% 和 28% (图 4b)。

3 讨论

(1) 数据的代表性与模型估计的不确定性。由于无法获得更广泛的文献数据, 本研究难以更细致地刻画我国 3 种粮食作物在不同种植区的地力贡献率。但总体而言, 这 3 种作物的数据源具有较好的代表性 (图 2)。与此相一致, 相应的 PSFC 模型具有显著的统计意义 (表 2)。

(2) 自变量的选择。本研究选取 20 世纪 90 年代的作物品种, 对 3 种作物进行了区域上的划分。不同

作物品种对土壤气候条件的要求不同^[22,23], 考虑到不同区域的品种选择总是最大限度地适应当地的气候条件, 因此选择地理位置作为自变量能极大地减少气候条件和区域品种对 PSFC 估计的不确定性。土壤肥力的主要特征是 SOM、N、P、K 含量, 而考虑 NPK 两两间或三要素间的协同作用 (表 1、表 2) 也是必要的, 如: N、K 的交互作用促进植物体内磷素的积累^[24]。需要指出的是, PSFC 受若干因素的综合影响, 单因子相关分析中对其无显著影响的因素并不意味着该因素不重要。在很多情况下, 某因素的重要性往往被其他因数所掩盖, 而逐步回归分析则从统计学上考虑了若干主要因素的综合影响。如: 单相关分析表明土壤 SOM 对南方冬小麦地力贡献率影响不具统计显著性 ($|P|>0.1$, 表 1), 而逐步回归分析结果则具有极显著的统计意义 ($P=0.002$, 表 2)。

(3) 环境因子对地力贡献率的影响及其实践意义。除品种特性外, 作物 PSFC 的变化主要由环境因子决定。土壤速效磷含量显著影响南方单季稻、早稻

和晚稻的 PSFC(表 1、表 2),在这些区域增施磷肥有助于提高水稻产量。与水稻不同,冬小麦、春小麦和夏玉米的 PSFC 随土壤速效钾含量增加而增加(表 1、表 2),提高土壤供钾能力和增施钾肥对提高小麦和玉米产量具有促进作用。

4 结论

中国大陆 3 种主要粮食作物地力贡献率存在明显差异,水稻最高($60.2\% \pm 12.5\%$),小麦最低($45.7\% \pm 15.7\%$),玉米的地力贡献率为 $51.0\% \pm 19.7\%$ 。决定水稻地力贡献率的主要因素为土壤供磷能力,决定小麦和玉米地力贡献率的主要因素为土壤供钾能力。各类作物在不同种植区的地力贡献率与土壤基本特性及地理位置间存在显著的相关关系,由这些因子决定的统计模型可解释地力贡献率空间变异的 44%~64%,这可为客观评价我国主要粮食产区的地力贡献率、制定区域尺度施肥策略和控制农业面源污染提供依据。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [2] 单艳红,杨林章,王建国.土壤磷素流失的途径、环境影响及对策[J].土壤,2004,36(6):602-608.
- [3] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006,43(3):405-413.
- [4] 张云,张胜,刘长礼,等.田间施肥引起浅层土壤中氮的蓄积试验分析[J].土壤,2006,38(1):86-98.
- [5] Christopher S F, R Lal. Nitrogen management affects carbon sequestration in north American cropland soils [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26:45-64.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 黄欠如,胡锋,李辉信,等.红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系[J].土壤学报,2006,43(6):926-933.
- [9] 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.
- [10] 朱洪勋,张翔,孙春河,等.长期施肥对小麦、玉米的增产效应及其对土壤养分的影响[J].土壤通报,1997,28(4):160-163.
- [11] 祝华明,王美琴,吴樟梅.施肥对红砂田有机质及土壤养分演变与作物产量的影响研究[J].土壤通报,1995,26(2):76-77.
- [12] 王定勇,石孝君,毛知耘.长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):120-126.
- [13] 朱洪勋,沈阿林,张翔,等.黄潮土养分供应特征及演变规律[J].土壤学报,1997,34(2):138-145.
- [14] 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.
- [15] 王洪波. 农用土地分等定级中突然有效系数求算研究—以河北省蠡县为例[D]. 河北:河北农业大学,2001.
- [16] 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.
- [17] 黄德明,徐建铭,徐秋明.北京郊区小麦测土施肥技术的研究—推荐施肥中目标产量的估测[J].华北农学报,1987,(3):61-65.
- [18] HUANG Y. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5):722-732.
- [19] HUANG Q R, HU F, LI H X, et al. Crop yield response to fertilization and relations with climate and soil fertility in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6):926-933.
- [20] TANG J D, YE X Y, RAO G L, et al. A preliminary report on long-term stationary experiment on soil fertility [J]. *Soil and Environmental Science*, 1999,8(2):113-116.
- [21] ZHU H X, ZHANG X, SUN C H, et al. Effect of long-term fertilization on production effect on wheat and maize and soil nutrient[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, 28(4):160-163.
- [22] ZHU H M, WANG M Q, WU Z M. Study on effect of fertilization on organic matter of red sand land, evolution of soil nutrient and crop yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995,26(2):76-77.
- [23] WANG D Y, SHI X J, MAO Z Y. Study on nutrient supplying capacity of purple soil under long-term rice-wheat rotation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2):120-126.
- [24] ZHU H X, SHEN A L, ZHANG X, et al. Nutrients supplying characteristics and evolution regularities of yellow fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(2):138-145.
- [25] WANF H B. Study on the calculating of the soin effective coefficient in the arable land gradation and classification—a case study in Li county Hebei province[D]. Hebei:Hebei Agriculture University, 2001.
- [26] HUANG D M, XU J M, XU Q M. Studies of test fertilizer recommendations for wheat crop in Beijing area(II)[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1987, 3:61-65.

- [18] 王宏凯,周广业,丁宁平,等. 不同肥力土壤的供磷能力和磷肥肥效研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(1):31-34.
WANG H K, ZHOU G Y, DING N P, et al. Study on the phosphorus supplying ability of different soil and the effect of phosphorus fertilizer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999,30(1):31-34.
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 2006. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm>
National Bureau of Statistics of China. 2006. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm>
- [20] 中国农业科学院《中国种植业区划》编写组. 中国种植业区划[M]. 北京:农业出版社, 1984. 127-129.
Chinese Academy of Agriculture Sciences. cropping system in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984.127-129.
- [21] 程永盛,廖耀平,陈钊明,等. 近 10 年广东省审定的水稻品种(组合)及产量、米质分析[J]. 中国稻米, 2005,3: 19-20.
CHENG Y S, LIAO Y P, CHEN Z M, et al. Analyze of the rice variety (combination), yield and quality in Guangdong of recent ten years[J]. *China Rice*, 2005,3: 19-20
- [22] 陈新平,周金池,王兴仁,等. 冬小麦、夏玉米不同品种(系)之间的氮营养效率的差异[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1):80-83.
CHEN X P, ZHOU J C, WANG X R, et al. Difference in nitrogen efficiency among different winter wheat and summer corn varieties[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1):80-83
- [23] 祖艳群,林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2000, 2:3-7.
ZU Y Q, LIN K H. The interaction between nitrogen and potassium and its effect on yield and quality of crops[J]. *Soil Fertility*, 2000, 2:3-7.

致谢:卢燕宇博士对数据整理和绘图给予了帮助,表示感谢。