

长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征^{*}

李忠芳^{1,2} 徐明岗^{1**} 张会民¹ 张淑香¹ 张文菊¹

(¹ 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081; ² 贺州学院, 广西贺州 542800)

摘要 采用产量可持续性指数(SYI)法,研究了我国不同生态条件下20个长期试验点8个肥料处理的水稻、玉米和小麦产量的可持续性.结果表明:作物SYI值因施肥、作物种类和水分因子不同而呈显著差异.长期不施肥(CK)条件下,水稻、玉米和小麦的SYI值较低,分别为0.55、0.44和0.43;施肥尤其是NPK化肥配施有机肥可显著提高作物产量的可持续性,水稻、玉米和小麦的SYI值分别为0.66、0.58和0.57;单施N肥或NK肥的玉米和小麦的SYI值在0.36~0.47. SYI值大于0.55表明可持续性较好,小于0.45表明可持续性差.经纬度和气象因子对作物SYI也有不同程度的影响,3种作物不施肥时,水稻SYI变异较小,与各因子间没有显著相关性,玉米SYI变异最大且与各因子间存在显著的相关关系,小麦介于两者之间.因此,NPK配施有机肥有利于作物高产稳产,是维持系统可持续性的最优施肥模式.

关键词 长期施肥 小麦 玉米 水稻 产量可持续性指数

文章编号 1001-9332(2010)05-1264-06 **中图分类号** S158.3, S51 **文献标识码** A

Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions. LI Zhong-fang^{1,2}, XU Ming-gang¹, ZHANG Hui-min¹, ZHANG Shu-xiang¹, ZHANG Wen-jü¹ (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ²Hezhou University, Hezhou 542800, Guangxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(5): 1264-1269.

Abstract: By using sustainable yield index (SYI), this paper analyzed the sustainability of maize, rice, and wheat yields at 20 long-term fertilization experiment sites in China under different fertilization system and ecological conditions. The SYI value of test crops varied significantly with fertilization system, crop kind, effective accumulated temperature, and sunshine hour. Irrespective of fertilization, the SYI value of rice was generally higher than that of maize and wheat. Under long-term no fertilization, the SYI values of rice, wheat, and maize were lower, being 0.55, 0.44, and 0.43, respectively. Fertilization, especially a combined application of NPK and manure, promoted the sustainability of crop yields, with the SYI values of rice, wheat, and maize being 0.66, 0.58, and 0.57, respectively. Under the application of N and NK, the SYI values ranged in 0.36-0.47. SYI value >0.55 represented the better sustainability of crop yields, while SYI <0.45 represented a worse one. Longitude, altitude, and weather factors also affected the SYI values, especially that of maize. Under no fertilization, maize had the largest variation of SYI value, followed by wheat, and rice. Our results indicated that a combined application of chemical fertilizers with manure benefited high and stable yielding, being the optimal fertilization mode for maintaining the sustainability of grain yield.

Key words: long-term fertilization; wheat; maize; rice; sustainable yield index (SYI).

^{*} 国家基础性工作专项(2007FY220400)和国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD05B09、2006BAD25B07、2006BAD02A14)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: mgxu@caas.ac.cn

2009-07-27 收稿, 2010-03-03 接受.

我国农业受到资源衰竭和环境恶化等因素的挑战,建立一个农业可持续性的综合评价指标并提供可持续发展建议是十分必要的^[1]. 作物产量的可持续性为农业可持续性的重要组成部分^[2],通过研究长期施肥下作物产量的变化特征可为农业的可持续发展提供理论支持. 国外对长期施肥下作物系统生产力变化及可持续性进行了大量研究^[2-9],提出了评价不同养分管理系统可持续性的指标,认为产量可持续性指数(sustainable yield index, SYI)是衡量系统是否能持续生产的一个重要参数,SYI 值越大,系统的可持续性越好^[2,5-6,9]. 在不同施肥措施下,化肥配合施用有机肥效果高于单独施用化肥或化肥偏施^[2,5-6,9]. 不同的耕作方式和轮作方式也影响作物的 SYI 值^[3-4,7-8]. 李秀英等^[10]在褐潮土长期不同施肥条件下对 SYI 值进行了研究,结果表明化肥 NPK 均衡施用及 NPK 配施有机肥可使作物持续高产;而不均衡施肥导致农业生态系统养分不均衡,可持续性差. 李红陵等^[11]研究了紫色土作物产量的变化,认为在化肥处理中以 N 和 NK 处理的系统可持续性最差. 但在不同粮食作物间及区域间是否有相对确定的 SYI 值来判定其可持续程度,以及是否还受到气候等方面的影响尚未见报道. 本文在区域尺度上研究了不施肥(CK)、单施氮肥(N)、施氮钾肥(NK)、施氮磷肥(NP)、施磷钾肥(PK)、施氮磷钾肥(NPK)、施有机肥(M)和氮磷钾配施有机肥(NPKM)8 个处理的玉米、小麦、水稻产量可持续性的差异及特征值,并分析了不施肥作物 SYI 的空间差异及其受水热条件的影响,以期为促进农田作物系统的可持续发展提供依据.

1 材料与方法

1.1 资料来源

本文主要收集和分析了 20 个我国典型农田长期肥料试验的数据及文献^[10,12-17],涉及到长期施 N、NP、NK、PK、NPK、M(有机肥)、NPKM(化肥配施有机肥)和 CK(不施肥)8 个处理的玉米、小麦、水稻 3 种作物的产量. 这些长期定位试验开始于 1980—1989 年,数据一般为 19~28 年(表 1). 这些试验点的经纬度与气象等相关数据来自《中国土壤肥力演变》^[18]和其他相关文献^[10,12-17].

长期定位试验所用化肥以尿素、普通过磷酸钙和氯化钾或硫酸钾为主. 一般每季作物施氮肥(N) 120~180 kg·hm⁻²,平均 150 kg·hm⁻²,磷肥

(P₂O₅) 60~150 kg·hm⁻²,平均 80 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O) 75~160 kg·hm⁻²,平均 116 kg·hm⁻². 有机肥北方以堆肥为主,用量 30~75 t·hm⁻²,大多每年只施 1 次;南方以猪厩肥为主,用量 15~22.5 t·hm⁻²,或施稻草 4.5~6 t·hm⁻²,大多每年施 2 次;也有每年施 1 次新鲜绿肥(用量 20~25 t·hm⁻²). 磷钾化肥和有机肥作为底肥施用,氮肥按当地习惯分 2~3 次施用. 种植制度长江以南为双季稻/冬季休闲;长江流域为一季中稻,冬季种小麦或其他;华北地区为冬小麦和夏玉米一年两熟;东北和西北地区主要为春(冬)小麦、春玉米等,一年一熟. 土壤类型包括黑土(吉林公主岭)、灰漠土(新疆乌鲁木齐)、壤土(陕西杨凌)、均壤质潮土(北京昌平)、黄泛轻壤质潮土(河南郑州)、紫色土(重庆北碚)、红壤(湖南祁阳)、水稻土(浙江杭州)和赤红壤(广东广州)等,覆盖了我国主要土壤类型和农作制度^[18].

1.2 研究方法

利用 DPS V 6.85 和 Excel 2003 软件对数据进行统计分析. 作物产量的可持续性程度用产量可持续性指数(SYI)表示:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma_{n-1}) / Y_{\max}$$

式中: \bar{Y} 为平均产量; σ_{n-1} 为标准差; Y_{\max} 为最高产量. 分析 SYI、经纬度、气象因子两两间的相关性,通过相关系数(r)查表^[19]分析判定相关的显著水平;用逐步回归法(Stepwise 法)分析各气象因子对产量的影响程度,各处理间的差异显著性用 LSD 法检验.

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥条件下作物产量及其 SYI 差异

长期不同施肥条件下作物产量可持续指数(SYI)有显著差异,不同作物间 SYI 值也不同(表 2). 不同施肥处理间,SYI 平均值的大小顺序为: NPKM、NPK>NP、M、PK>CK、NK、N. 其中 3 种作物的 NPK 化肥和 NPK 化肥配施有机肥处理的 SYI 最高,均大于 0.55,产量也最高(平均值大于 5000 kg·hm⁻²). 从高产性和产量可持续性方面分析,NPK 与 NPKM 无显著差异,为最好的施肥模式;其次为 NP 处理,产量及 SYI 值均较高,与前两种施肥处理(NPK 和 NPKM)无显著差异,产量上除水稻外也无显著差异,是在 K 肥缺乏下建议采用的施肥模式;M 和 PK 处理虽然能获得与前 3 种施肥方式(NP、NPK 和 NPKM)相当的 SYI 值,但其产量却显著降低,为

表 1 长期肥料试验点基本概况
Tab.1 Status of long-term fertilizer experiments

地点 Site	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	土壤类型 Soil type	轮作制度 Cropping system	年熟制 Crop per year	年 代 Year
黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	126. 6	45. 7	黑土 Black soil	小麦-大 豆-玉 米 Wheat-Soy- bean-Maize	1	1981—2006
新疆乌鲁木齐 Urumqi, Xinjiang	87. 8	43. 8	灰漠土 Grey desert soil	玉米-小麦 Maize-Wheat	1	1990—2005
吉林公主岭 Gongzhuling, Jilin	124. 8	43. 5	黑土 Black soil	玉米 Maize	1	1990—2005
北京昌平 Changping, Beijing	116. 2	40. 2	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦-玉米 Wheat-Maize	2	1991—2005
甘肃张掖 Zhangye, Gansu	100. 5	38. 9	灌漠土 Irrigated desert soil	小麦-小麦-玉米 Wheat-Wheat- Maize	1	1982—2001
山西寿阳 Shouyang, Shanxi	113. 1	38. 0	褐土 Cinnamon soil	玉米 Maize	1	1992—2004
甘肃平凉 Pingliang, Gansu	107. 5	35. 3	黑垆土 Black soil	玉米-小麦 Maize-Wheat	1	1981—2007
河南郑州 Zhengzhou, Henan	113. 7	34. 8	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦-玉米 Wheat-Maize	2	1991—2005
陕西杨凌 Yangling, Shaanxi	108. 0	34. 3	褐土 Cinnamon soil	小麦-玉米 Wheat-Maize	2	1992—2005
江苏徐州 Xuzhou, Jiangsu	117. 1	34. 2	潮土 Fluvo-aquic soil	小麦-玉米 Wheat-Maize	2	1981—1998
四川遂宁 Suining, Sichuan	104. 1	30. 7	紫色土 Purplish soil	水稻-小麦 Rice-Wheat	2	1982—2006
浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	120. 4	30. 4	水稻土 Paddy soil	大麦-水 稻-水 稻 Barley-Rice- Rice	3	1991—2000
湖北武昌 Wuchang, Hubei	114. 2	30. 4	水稻土 Paddy soil	水稻-小麦 Rice-Wheat	2	1982—2004
四川重庆 Chongqing, Sichuan	106. 4	30. 4	紫色土 Purplish soil	水稻-小麦 Rice-Wheat	2	1982—2005
江西进贤旱地 Jinxian, Jiangxi (Dry land)	116. 3	28. 3	红壤 Red soil	玉米 Maize	2	1986—2007
江西进贤水田 Jinxian, Jiangxi (Paddy field)	116. 3	28. 3	水稻土 Paddy soil	早稻-晚稻 Early rice-Late rice	2	1981—2007
江西南昌 Nanchang, Jiangxi	116. 3	28. 3	水稻土 Paddy soil	早稻-晚稻 Early rice-Late rice	2	1984—2006
湖南望城 Wangcheng, Hunan	112. 0	28. 0	水稻土 Paddy soil	早稻-晚稻 Early rice-Late rice	2	1981—2007
湖南祁阳 Qiyang, Hunan	111. 9	26. 8	红壤 Red soil	小麦-玉米 Wheat-Maize	2	1991—2007
福建白沙 Baisha, Fujian	119. 3	26. 0	红壤 Red soil	早稻-晚稻 Early rice-Late rice	2	1983—2006

不可取的施肥模式. 不施肥及单施 N 或 NK 处理的 SYI 值最低,3 种作物中小麦和玉米尤其较低(均小于 0.45),而且对应产量也很低,尤其是小麦产量不到其 NPK 处理的一半,也是不可取的施肥模式.

同一施肥处理下,水稻 SYI 值较小麦和玉米高 0.1~0.2,而各施肥处理间差异较小. 单位产量中,小麦最低,不同施肥处理在 1332~4487 kg·hm⁻²;水稻和玉米产量在不同施肥处理上表现不同,NPK 和 NPKM 处理玉米高于水稻,而其他施肥处理中水稻均大于玉米(表 2,图 2).

依据以上分析,不同处理 SYI 值相差 0.1 时达到显著差异,用 SYI 值评价合理的产量可持续性时可分为 3 个范围:大于 0.55 的产量可持续性较好的施肥模式;0.45~0.55 的产量可持续性为一般,

但对应的施肥模式还可以改善和提高;而小于 0.45 的产量可持续性差,表明其施肥模式不可取.

表 2 不同施肥处理下水稻、玉米和小麦的 SYI 差异
Tab.2 Difference of SYI for rice, maize, and wheat among different fertilizer treatments

处 理 Treatment	水 稻 Rice	玉 米 Maize	小 麦 Wheat	平 均 Average
NPKM	0.66a	0.58a	0.57a	0.60a
NPK	0.65ab	0.58a	0.56a	0.60a
NP	0.61abc	0.51abc	0.57a	0.56ab
M	0.62abc	0.56ab	0.46abc	0.54abc
PK	0.59abc	0.47abc	0.48ab	0.51bc
CK	0.55c	0.44bc	0.43bc	0.48cd
NK	0.56bc	0.43c	0.36bc	0.47cd
N	0.56bc	0.44bc	0.34c	0.43d

不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同施肥处理下水稻、玉米和小麦的产量差异
Tab.3 Difference of grain yields of rice, maize and wheat among different fertilizer treatments (kg · hm⁻²)

处理 Treatment	水稻 Rice	玉米 Maize	小麦 Wheat	平均 Average
NPKM	5916a	6092a	4487ab	5489a
NPK	5370ab	5912a	5612a	5612a
NP	4860bc	4857ab	3740bc	4453b
M	4946bc	4532abc	2540bcd	3912bc
NK	4757bc	3912bc	1980cd	3716bc
N	4546c	3876bc	2051cd	3319cd
PK	4218c	3838bc	1876cd	3212cd
CK	3350d	3043c	1332d	2544d

2.2 长期不施肥条件下作物 SYI 的空间变异特征

研究 SYI 是否受经纬度和各地气象因素的影响,需选择不施肥处理 SYI 进行相关分析和逐步回归分析. 本研究对选定的因子进行了初步分析、筛选和分类^[19],其结果见表 4. 不同作物中,水稻与各因子间的相关关系均没有达到显著水平;而小麦和玉米与较多的气象因子存在显著相关性,其中小麦 SYI 与经度达到显著的相关关系,而玉米的 SYI 与经度、纬度、积温及日照时数均达到显著的相关性,表明这些因子对玉米不施肥处理产量的 SYI 有较大影响. 长期不施肥条件下,水稻产量年际间变异程度及下降趋势显著小于玉米和小麦(玉米和小麦产量

呈极显著的逐年下降趋势,而水稻产量较稳定,图 1),表明水稻产量稳定性高于玉米和小麦. 由于因子间及因子与 SYI 间的关系复杂,初步分析认为不同经纬度与玉米 SYI 值呈显著或极显著的正相关性,其原因可能是受到系统水热条件的影响(玉米 SYI 与年有效积温和降雨量呈负相关,而与日照时数呈显著正相关).

2.3 SYI 与气象因子的逐步回归分析

由于水稻和小麦 SYI 与水热因子均没有达到显著相关性,所以只对玉米进行逐步回归分析. 得到的回归方程为: $Y = 0.2426 + 0.0271X_1 - 0.0002X_2 + 0.0002X_3 + 0.0002X_4$ ($P = 0.0104, R^2 = 0.5876$). 其中, Y 为玉米的 SYI 值, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别为年平均气温、有效积温、年日照时数和年降雨量. 表明这 4 个水热因子对玉米不施肥处理的 SYI 有显著影响,可以解释玉米不施肥处理 SYI 58.8% 的变异. 通径分析(表 5)表明,对玉米 SYI 直接影响最大的因子为 X_2 (积温),其次分别为 X_1 (年平均温度)、 X_3 (年日照时数)和 X_4 (年降雨量); X_1 、 X_3 和 X_4 3 个因子都间接通过 X_2 (积温)对玉米 SYI 产生较大影响,而且除了 X_3 (日照)以外,都为负效应,表明较大的积温、高温和降雨量将导致玉米不施肥处理 SYI 的下降.

表 4 水稻、小麦和玉米不施肥处理 SYI 与经纬度及气象因子间的相关系数
Tab.4 Correlation coefficients between the SYI for rice, wheat and maize under different fertilizer treatments and the longitude and altitude and meteorological factors

作物 Crop	经度 Longitude (°)	纬度 Latitude (°)	平均气温 Mean annual temperature (°C)	有效积温 Effective accumulated temperature (°C)	日照时数 Sunshine hours (h)	降雨量 Precipitation (mm)
水稻 Rice	-0.210	0.233	-0.130	0.089	-0.382	-0.109
小麦 Wheat	0.429	-0.040	0.284	0.334	-0.233	0.105
玉米 Maize	0.500*	0.599**	-0.157	-0.576**	0.468*	-0.275

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

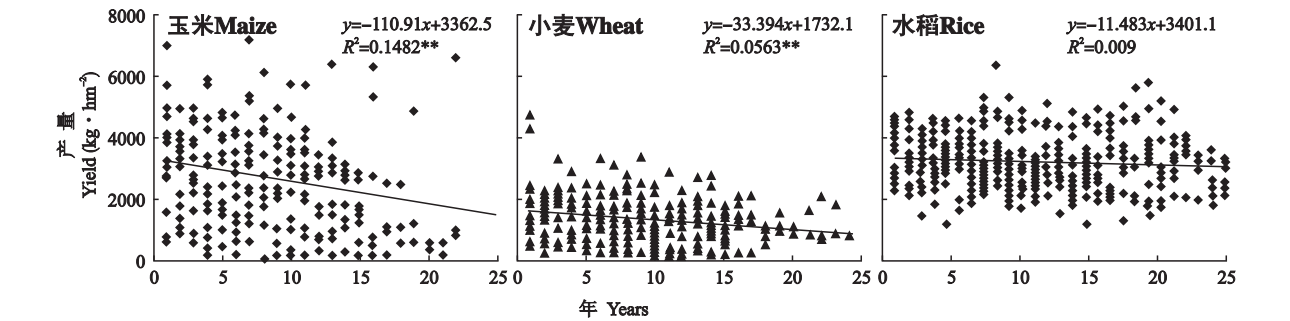


图 1 不施肥处理水稻、玉米和小麦产量的变化趋势
Fig.1 Trends of grain yields of rice, maize, and wheat under no fertilizer treatments at all sites.

表 5 玉米不施肥处理的 SYI 与气象因子间的相关关系
Tab.5 Correlations between the SYI for maize under no fertilizer treatments and meteorological factors

因子 Factor	直接 Directory	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	0. 6489		-0. 7773	-0. 2516	0. 2228
X_2	-1. 0503	0. 4802		-0. 2824	0. 2761
X_3	0. 4053	-0. 4029	0. 7320		-0. 2660
X_4	0. 3841	0. 3764	-0. 7551	-0. 2806	

3 讨 论

3.1 长期施肥条件下 3 种作物 SYI 值的差异

本研究表明,施肥可不同程度地提高作物 SYI 值,并以 NPKM 处理最高,而化肥偏施及不施肥处理较低,产量的可持续性差.这与其他研究结果一致,如 Manna 等^[5]认为,作物 SYI 值受施肥处理的影响,表现为:NPKM>NPK>NP>N>CK.这可能是由于施用有机肥、有机肥配施化肥及化肥 NPK 均衡施用均可增加土壤颗粒有机碳、氮及矿质结合有机碳、氮的含量^[20],并且土壤轻组 and 重组有机质含量均随施肥年限呈增加趋势^[21],从而提高了产量的可持续性.孙天聪等^[22]研究认为,长期施用化肥和有机肥能有效影响水解氨态氮和水解未知氮与团聚体的结合作用,而氨基糖态氮在土壤氮循环转化过程中具有较强的稳定性.

3 种作物中,水稻 SYI 值高于小麦和玉米,这是由于水稻产量较稳定,年际变化小于玉米和小麦(图 3).李红陵等^[11]也认为水稻的 SYI 值比小麦高,变异系数比小麦小,可持续性比小麦强,表明水稻生产的淹水条件能提高土壤养分的持续供应.本研究中水稻与环境因子(包括经纬度和水热环境)的相关性小于小麦和玉米,表明水稻受肥力与环境水热条件的影响较小.汤勇华等^[23]也认为水稻具有较好的稳产性,受气候影响较小,其原因可能是淹水条件下的水热条件优于旱作排水.本研究对水稻不施肥处理 SYI 值与各环境因子间的回归分析也没有达到显著水平,这与王开峰等^[17]研究结果不同,他认为日照时数和积温是影响水稻产量的主要气候要素,而降水对产量的影响很小,这可能是由于本研究回归分析的对象是不施肥处理,肥效的发挥依赖于基础地力.

玉米不施肥 SYI 值与经纬度、水热因素的相关关系均达到极显著水平,与经纬度呈正相关,所以玉米不施肥 SYI 值的空间特征表现为随经纬度的增加而增加.其原因是由于受气候因素的影响,玉米不施

肥的 SYI 值与积温呈极显著的负相关关系($P<0.001$),与年降雨量呈负相关,而与年平均气温、年日照时数呈正相关,其中与日照时数达显著水平($P<0.01$),表明高温多雨条件下将导致玉米不施肥 SYI 值下降,年日照时数增加则可提高玉米 SYI 值.从全国分析,北方积温相对较低,降雨量小,日照时间较长,所以产量的可持续性高;而南方高温多雨不利于养分的保存,土壤养分相对较少,很难维持连续的高产,导致 SYI 值较低. Majumder 等^[6]和 Manna 等^[5]认为,作物 SYI 值与土壤有机质间有极显著的相关性.黄勇华等^[23]认为玉米基础地力的变化可由磷及土壤有机质的变化来解释,而在本研究中南方种植玉米不施肥处理的 SYI 值低可能与南方有机质和磷等养分含量较低^[18]有关.

对 3 种作物不施肥条件下产量趋势(图 1)的分析表明,水稻产量较稳定,而玉米和小麦产量呈逐年下降趋势,可见施肥对提高小麦和玉米产量的可持续性尤为重要.

3.2 作物 SYI 值与气象因子的关系

作物 SYI 值与气象因子的逐步回归分析(表 5)表明,较大的积温、高温和降雨量将导致玉米不施肥处理 SYI 值下降.因此,积温是 4 个因子中对玉米不施肥处理 SYI 值影响最大的因子,而且呈负效应,并通过与高温和降雨量的作用表现出来,表明高温多雨不利于玉米 SYI 的提高.综合分析,玉米产量的可持续性受环境因素的影响在 3 种作物中最敏感,而在不同施肥处理上差异也最明显(水稻刚好相反),在化肥偏施或不施肥处理中玉米单位面积产量均小于水稻,但是在平衡施用化肥和化肥配施有机肥处理中单位面积产量稍高于水稻(表 3).詹其厚等^[24]对淮北地区的研究也认为,长期施肥条件下养分供应不平衡对玉米的影响大于小麦.这可能是由于玉米为具有高光效的 C_4 植物,其增产潜力大于作为 C_3 植物的水稻和小麦,所以玉米持续高产的发挥依赖于合理的施肥及有利的环境条件.

参考文献

[1] Liu WN, Wu WL, Wang XB, *et al.* A sustainability assessment of a high-yield agroecosystem in Huantai County, China. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2007, **14**: 565–573

[2] Chaudhury J, Mandal UK, Sharma KL, *et al.* Assessing soil quality under long-term rice-based cropping system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, **36**: 1141–1161

[3] Turner NC, Asseng S. Productivity, sustainability, and

- rainfall-use efficiency in Australian rainfed Mediterranean agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2005, **56**: 1123–1136
- [4] Sharma KL, Mandal UK, Srinivas K, *et al.* Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil & Tillage Research*, 2005, **83**: 246–259
- [5] Manna MC, Swarup A, Wanjar PH, *et al.* Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. *Field Crops Research*, 2005, **93**: 264–280
- [6] Majumder B, Mandal B. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat-jute agroecosystem under different fertilizer treatments. *Plant and Soil*, 2007, **297**: 53–67
- [7] Ghosh PK, Dayal D, Mandal KG, *et al.* Optimization of fertilizer schedules in fallow and groundnut-based cropping systems and an assessment of system sustainability. *Field Crops Research*, 2003, **80**: 83–98
- [8] Chauhan SK, Chauhan PS, Minhas PS. Effect of cyclic use and blending of alkali and good quality waters on soil properties, yield and quality of potato, sunflower and Sesbania. *Irrigable Science*, 2007, **26**: 81–89
- [9] Bhattacharyya R, Kundu S, Prakash V, *et al.* Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean-wheat system of the Indian Himalayas. *European Journal of Agronomy*, 2008, **28**: 33–46
- [10] Li X-Y (李秀英), Li Y-T (李燕婷), Zhao B-Q (赵秉强), *et al.* The dynamics of crop yields under different fertilization systems in drab fluvo-aquic soil. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2006, **32**(5): 683–689 (in Chinese)
- [11] Li H-L (李红陵), Wang D-Y (王定勇), Shi X-J (石孝均). Effects of nutrient non-equilibration in purple soil on crop productivity. *Journal of South West Agricultural University* (Natural Science) (西南农业大学学报·自然科学版), 2005, **27**(4): 487–490 (in Chinese)
- [12] Zhou H-P (周怀平), Yang Z-P (杨治平), Li H-M (李红梅), *et al.* Influence of fertilization and rainfall distribution on yield and water use efficiency of maize in dry land. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, **22**(3): 27–31 (in Chinese)
- [13] Yang J (杨军), Chen X-P (陈新平), Zhang F-S (张福锁), *et al.* Management of phosphorus fertilizer in long-term rotation cropping in calcareous meadow soil in Beijing. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2003, **8**(3): 31–36 (in Chinese)
- [14] Jia S-L (贾树龙), Meng C-X (孟春香), Ren T-S (任图生), *et al.* Effect of tillage and residue management on crop yield and soil properties. *Journal of Hebei Agricultural Sciences* (河北农业科学), 2004, **8**(4): 37–42 (in Chinese)
- [15] Fang R-Y (方日尧), Tong Y-A (同延安), Geng Z-C (耿增超), *et al.* Effect of a long-term organic fertilization on wheat yield and soil fertility on Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(2): 47–49 (in Chinese)
- [16] Lin B (林葆), Lin J-X (林继雄), Li J-K (李家康). Changes of Crop Yield and Soil Fertility with Long-Term Fertilizer Application. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1996 (in Chinese)
- [17] Wang K-F (王开峰), Wang K-R (王凯荣), Peng N (彭娜), *et al.* Yield trends and reasons for their change in red-soil rice field with long-term organic matter circling. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(2): 743–747 (in Chinese)
- [18] Xu M-G (徐明岗), Liang G-Q (梁国庆), Zhang F-D (张夫道), *et al.* Variation of Soil Fertility in China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006 (in Chinese)
- [19] Bai H-Y (白厚义), Xiao J-Z (肖俊璋). Study on the Examination and Statistics Analyzing. Xi'an: World Book Press, 1998 (in Chinese)
- [20] Gong W (龚伟), Yan X-Y (颜晓元), Cai Z-C (蔡祖聪), *et al.* Effects of long-term fertilization on soil particulate organic carbon and nitrogen in a wheat-maize cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(11): 2375–2381 (in Chinese)
- [21] Yin Y-F (尹云锋), Cai Z-C (蔡祖聪), Qin S-W (钦绳武). Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilizer. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **18**(5): 875–878 (in Chinese)
- [22] Sun T-C (孙天聪), Li S-Q (李世清), Shao M-A (邵明安), *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution of organic nitrogen components in soil aggregates in sub-humid agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(10): 2233–2238 (in Chinese)
- [23] Tang Y-H (汤勇华), Huang Y (黄耀). Spatial distribution characteristics of the percentage of soil fertility contribution and its associated basic crop yield in Mainland China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2009, **28**(5): 1070–1078 (in Chinese)
- [24] Zhan Q-H (詹其厚), Chen J (陈杰). Continual nutrient supplying capacity and crop responses based on long-term fertilizer experiment in vertisol. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1996, **43**(1): 124–132 (in Chinese)

作者简介 李忠芳,男,1976年生,博士.主要从事植物营养及土壤肥力研究,发表论文4篇. E-mail: lizhongfang08@126.com

责任编辑 张凤丽