

# 长期减量化施肥对水稻产量和土壤肥力的影响

徐云连, 马友华, 吴蔚君, 邢素林, 马凡凡, 甘曼琴

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 为探讨减量化施肥对水稻产量及土壤肥力的影响, 对巢湖流域连续 10 年减量化施肥和秸秆还田定位试验后的水稻产量、土壤有机质、有效氮磷钾、有效铜锌铁锰含量及土壤酶活性进行了测定和分析。结果表明: 长期减氮 30% 或减磷 50% 处理对水稻产量无明显降低作用, 减量+秸秆还田有增产作用, 但增产不显著; 减氮 30% 或减磷 50% 会降低土壤中有机质含量, 增加土壤中速效钾、碱解氮含量, 减磷 50% 土壤中的有效磷含量显著降低, 减量+秸秆还田会增加土壤中的有机质、速效钾、碱解氮、有效铜锌铁锰含量, 对有效磷的增加效果不显著; 较不施肥相比, 施肥能够明显提高土壤的酶活性, 减少氮磷肥会一定程度地降低土壤中的酶活性, 减量+秸秆还田对脲酶的增加效果不明显, 但会显著增加土壤中性磷酸酶和蔗糖酶活性; 土壤酶活性与水稻产量及土壤养分含量之间呈显著或极显著正相关关系。综合考虑减量化施肥对水稻产量和土壤肥力的影响, 可提出在巢湖流域实施减量化施肥+秸秆还田处理来代替高产施肥。

**关键词:** 水稻; 减量化施肥; 秸秆还田; 产量; 土壤养分

**中图分类号:** S158.3; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0254-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.037

## Effects of Long-term Reducing Fertilization on Yield and Soil Fertility of Rice

XU Yunlian, MA Youhua, WU Weijun, XING Sulin, MA Fanfan, GAN Manqin

(College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** To investigate the effect of reduced fertilization on rice yield and soil fertility, the rice yield, soil organic matter, available NPK and effective copper, zinc, iron and manganese content after 10 years of reduced fertilization and straw returning in the Chaohu Lake Basin were tested. Soil enzyme activity was measured and analyzed. The results showed that long-term nitrogen reduction of 30% or 50% phosphorus reduction had no significant effect on rice yield, but reduction + straw yield had an effect on yield increase, but the yield was not significant; reducing nitrogen by 30% or reducing phosphorus by 50% would reduce soil The content of organic matter increased the content of available potassium and alkali-hydrolyzed nitrogen in the soil. The content of available phosphorus in soil reduced significantly by 50% of phosphorus reduction, and the amount of available organic matter, available potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, and effective copper and zinc were increased by reducing the amount of straw + returned to soil. The iron and manganese content had no significant effect on the increase of available phosphorus. Compared with no fertilizer application, fertilization could significantly increase soil enzyme activity. Decreasing N and P fertilizers would reduce enzyme activity in the soil to a certain extent. The reduction + straw returning to urease The effect of the increase was not obvious, but it would significantly increase the activity of neutral phosphatase and sucrose in soil. There was a significant or highly significant positive correlation between soil enzyme activity and rice yield and soil nutrient content. Considering the effect of reduced fertilization on rice yield and soil fertility, we can put forward the implementation of reducing fertilization and straw returning in Chaohu Lake Basin instead of optimizing fertilization.

**Keywords:** rice; reduced fertilization; straw returning; yield; soil nutrient

减量化施肥是在长期过量施肥导致环境质量恶 物的减产、环境的恶化, 德国在 1980—1995 年开始减  
化、粮食安全受到威胁的情况下发展起来的。因为作 少化肥的施用, 氮磷钾肥年均施用量分别下降了 1.4%,

收稿日期: 2018-06-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“水稻主产区氮磷流失综合防控技术与产品研发”(2016YFD0800503)

第一作者: 徐云连(1992—), 女, 山东潍坊人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤生态环境与农业源污染控制研究。E-mail: 1175683459@qq.com

通信作者: 马友华(1962—), 男, 安徽霍邱人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: yhma@ahau.edu.cn

6.0%和5.5%,其他欧洲国家如英国、法国和比利时等也是如此<sup>[1]</sup>。近年来,我国在减量化施肥方面也开展了一系列的研究,并取得了相应的成果。万毅林<sup>[2]</sup>研究发现,在减少化肥施用的基础上配以秸秆还田能够降低土壤的容重,使得土壤的 pH 接近中性,且增加了土壤中的有机质以及氮磷钾的含量。而蔡炳祥等<sup>[3]</sup>的研究却表明,当只减少化肥施用量时,土壤中的有机质、全氮、有效磷的含量无明显变化;丛艳静等<sup>[4]</sup>研究表明,当秸秆还田量为 4 500 kg/hm<sup>2</sup> 时,减少氮肥 10%,磷肥 10%,钾肥 10%~20% 可以提高茼蒿的产量,增加土壤有机质及有效氮磷钾的含量。

近年来,秸秆还田的研究虽多,但主要集中在常规施肥条件下秸秆还田对产量及土壤肥力的影响,对土壤肥力和酶活性的综合分析报道较少,而且关于巢湖流域的报道更少。为了探究减量化施肥条件下秸秆还田对水稻产量及土壤肥力的影响,以及分析水稻产量、土壤肥力和土壤酶活性之间的相关关系,有必要对巢湖流域开展了 10 年的定位试验进行深入研究,为该地区实际生产提供合理的施肥依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

该定位试验于 2007 年建立,位于巢湖市居巢区中埠镇建华村王作刚户(31°38′45″N,117°47′35″E),距巢湖 2 km,海拔 17 m。气候类型属于北亚热带湿润性季风气候,年降水量 996.0 mm,年平均气温 16 °C,最热月为 7 月,月均温 28.7 °C,最冷月为 1 月,月均温 2.7 °C,全年无霜期 247 d,年日照时间 2 106 h。土壤类型是潜育型水稻土亚类青湖泥田土属中的上位弱潜青湖泥田土种。试验区耕作制度为稻麦轮作,土壤(0—20 cm)pH 6.99,有机质 34.07 g/kg,全氮 1.58 g/kg,全磷 0.78 g/kg,速效钾 136.31 mg/kg,有效磷 25.97 mg/kg,碱解氮 168.54 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置 6 个处理:(1)空白对照(CK),不施肥料;(2)常规施肥(CON),当地习惯施肥量;(3)高产施肥(OPT),当地最高产量的配方施肥;(4)减氮 30%(OPT-N),在高产施肥的基础上氮肥施用量减少 30%;(5)减磷 50%(OPT-P),在高产施肥的基础上磷肥施用量减少 50%;(6)秸秆还田(OPT-NP+ST),减量施肥基础上每亩覆盖 200 kg 小麦秸秆(每年的小麦季每亩覆盖 200 kg 水稻秸秆)。每个处理 3 次重复,小区面积 30 m<sup>2</sup>,随机排列。水稻品种选用皖稻 153,移栽时间为 2017 年 6 月 19 日,收获时间为 2017 年 10 月 20 日,秸秆还田方式为翻压还田。常规施肥氮肥分基肥和分蘖肥施入,施入比例为 6:4,其他处理的氮肥施用于基肥:分蘖肥:穗肥为 4:4:2,磷肥作一次性施入,钾肥

施用基肥:穗肥为 7:3。具体施肥量见表 1。小麦季常规施肥基肥施用 45% 的三元复肥(15:15:15) 450 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>;腊肥追施尿素 90 kg/hm<sup>2</sup>;拔节肥(拔节前)追施尿素 60 kg/hm<sup>2</sup>;小麦季其他施肥处理氮肥的施用采用 5.5:2:2.5 的施用方式;所有施肥处理磷肥作基肥一次性施入;钾肥采用基肥:返青肥为 7:3 的施用方式。

表 1 长期定位试验各处理化肥施用量

处理	单位:kg/hm <sup>2</sup>		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	0.0	0.0	0.0
CON	213.8	72.0	0.0
OPT	225.0	67.5	120.0
OPT-N	157.5	67.5	120.0
OPT-P	225.0	33.8	120.0
OPT-NP+S	157.5	33.8	120.0

### 1.3 样品采集与测试方法

2017 年 10 月 20 日收获水稻,并对水稻进行考种,考种后进行全割测定产量,收获后采集 0—20 cm 的表层土,采用“X”形 5 点采样,采集好的土样带回实验室,根据不同指标测定的目数要求做风干过筛处理,用于测定有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、有效铜锌铁锰和酶活性。土壤有机质采用油浴加热重铬酸钾氧化—容量法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼酸铵比色法测定;速效钾采用醋酸铵浸提火焰光度法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效铜锌铁锰采用原子吸收火焰光度法<sup>[5]</sup>测定;脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法<sup>[6]</sup>测定。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 软件处理计算数据并作图,用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期减量化施肥对水稻产量及性状的影响

从水稻产量和主要产量性状(表 2)可以看出,相对于 CK 处理,其他各施肥处理都有明显增产,增产效果 OPT-NP+S>OPT>OPT-N>OPT-P>CON,说明在减少化肥投入的情况下,秸秆还田能够增加水稻的产量;与 OPT 处理相比,OPT-P 处理和 OPT-N 处理产量有所下降,但下降不明显,这可能是氮肥和磷肥减少过多的原因。

对各个处理之间水稻产量性状分析(表 2),可以看出不同处理之间的有效穗数、穗粒数和结实率无明显差异;与 CK 相比,各个处理的株高有明显增加,但是处理之间的无显著差异;对千粒重进行分析可知,各处理相比于 CK 处理都有增加,OPT、OPT-N、OPT-N 处理增加显著。

表 2 长期减量化施肥对第 10 年水稻产量及性状分析

处理	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	有效穗/ (万穗·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	结实率/ %	株高/ cm
CK	3965.0b	270.0a	160.2a	20.5b	91.9a	100.0b
CON	5480.0a	289.5a	186.9a	21.5ab	93.0a	115.5a
OPT	6330.0a	307.5a	182.5a	22.4ab	95.2a	120.0a
OPT-N	6235.0a	291.0a	189.1a	24.1a	95.6a	122.9a
OPT-P	6165.0a	306.0a	185.0a	24.3a	96.5a	119.5a
OPT-NP+S	6755.0a	321.0a	196.8a	24.6a	96.9a	117.8a

注:同列数据后的不同字母表示各处理间差异达 5% 显著水平。下同。

## 2.2 长期减量化施肥对土壤有机质及有效氮磷钾含量的影响

由表 3 可知,长期秸秆还田处理土壤有机质较试验初期增加 3.8%,只施化肥处理土壤有机质含量均有下降,各处理有机质含量顺序为:OPT-NP+S>OPT-P>OPT-N>OPT>CON>CK,说明减少氮肥和磷肥的施用对土壤有机质含量影响不大,连续 9 年土壤有机质含量较试验初期降低 10%,不施肥、缺少钾肥或者长期施用氮磷钾化肥的处理土壤有机质含量较试验初期降低 25%;与试验初期相比,CK、OPT-P、OPT-NP+S 处理有效磷的含量分别降低了 67%,48%,37%,OPT-N、OPT、CON 处理有效磷含量分别增加了 35%,25%,12%,说明缺钾和减氮处理不会减弱土壤中的有效磷含量,减少磷的施用会降低土壤中的有效磷含量,即使秸秆还田其提高作用也不明显;速效钾和碱解氮含量均表现出增加的趋势,且秸秆还田处理高于纯施化肥处理,不施钾处理会降低土壤中的速效钾含量,减氮和减磷处理对其影响不大,减少氮的施用会降低土壤中的碱解氮含量,缺钾和减磷处理对碱解氮的含量影响也不大。

表 3 长期减量化施肥对第 10 年土壤有机质及有效氮磷钾含量的影响

处理	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	28.4a	8.6d	137.0b	156.7b
CON	29.1a	29.2b	140.0b	188.5ab
OPT	30.2a	32.6ab	190.0a	209.2ab
OPT-N	31.2a	35.2a	180.0a	179.4ab
OPT-P	32.4a	13.5cd	183.0a	199.0ab
OPT-NP+S	35.7a	16.2c	200.0a	223.4a

## 2.3 长期减量化施肥对土壤中有效铜锌铁锰含量的影响

长期减量化施肥对土壤中有效铜锌铁锰含量的影响见表 4。与施用化肥处理相比,不施肥处理土壤中有效铜锌铁锰的含量较低,钾肥施用对其含量影响不明显。6 种处理的有效铜含量顺序为:OPT-NP+S>CON>OPT>OPT-P>OPT-N>CK,由此可知,长期不施肥处理有效铜含量最低,长期减少磷肥和氮肥的处理土壤中的有效铜含量也明显低于其他

处理,而在减少氮肥和磷肥的基础上秸秆还田处理土壤中的有效铜含量最高。因此,可以推断出秸秆还田处理能够增加土壤中有效铜的含量;有效锌含量顺序为:OPT-NP+S>OPT-P>OPT-N>CON>OPT>CK,长期减量化施肥处理有效锌的含量高于不减量化施肥处理,且在减量化施肥的基础上秸秆还田能够增加有效锌的含量;有效铁含量顺序为:OPT-NP+S>OPT>OPT-N>CON>OPT-P>CK,长期不施肥,农民习惯施肥以及减量化施肥较高产施肥处理有效铁含量降低,长期减磷对有效铁含量的影响比减氮处理明显;有效锰的含量顺序为:OPT-NP+S>CON>OPT-P>OPT>OPT-N>CK。

表 4 长期减量化施肥对第 10 年土壤有效铜锌铁锰含量的影响

处理	有效铜	有效锌	有效铁	有效锰
CK	0.5a	0.3a	18.2a	1.7bc
CON	2.6bc	0.5a	35.8abc	5.4c
OPT	2.5bc	0.4a	41.9c	3.1ab
OPT-N	1.7b	3.3b	36.9bc	2.0a
OPT-P	2.2bc	4.3b	30.9ab	4.8bc
OPT-NP+S	3.0c	4.8b	52.9ab	6.2c

## 2.4 长期减量化施肥对土壤酶活性的影响

由表 5 可知,不同施肥处理对土壤酶活性的影响不同,较空白处理相比,施用化肥能够明显提高土壤酶活性。

脲酶存在于大多数细菌、真菌和高等植物里。它是一种酰胺酶,它仅能水解尿素,水解的最终产物是 NH<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和水,其活性表征土壤的氮素状况。长期施用氮磷、氮磷钾肥料能够明显的增加土壤中脲酶的活性,钾肥对土壤脲酶活性影响不大,长期减少氮肥或磷肥的处理会降低土壤脲酶活性,且减氮处理脲酶活性降低更显著,在减少氮磷肥的基础上秸秆还田较减少氮肥处理土壤脲酶活性增加,较减磷处理土壤脲酶活性增加不显著。

磷酸酶可分为酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶,其活性与土壤磷的有效性息息相关<sup>[7]</sup>。本研究中的土壤呈中性,故测定了中性磷酸酶。由图 1 可知,不同施肥处理下土壤中性磷酸酶活性表现为 OPT-NP+S>OPT>OPT-N>CON>OPT-P>

CK, 秸秆还田能够显著增加土壤磷酸酶活性, 不施钾肥或减少氮肥或磷肥都会影响土壤的磷酸酶活性, 减少磷肥施用影响效果最显著。

蔗糖酶与土壤中的有机质、氮素、磷素等密切相关。研究结果表明, 不施钾肥或减少氮肥和磷肥的处理会降低土壤中的蔗糖酶活性, 在减氮减磷的基础上增加秸秆还田会显著增加土壤中的蔗糖酶活性, 在各施化肥处理中, 表现为  $OPT > CON > OPT-N > OPT-P$ , 说明磷肥在提高蔗糖酶活性方面有重要作用。

表 5 长期减量化施肥对第 10 年土壤酶活性的影响

处理	脲酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ )	磷酸酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ )	蔗糖酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ )
CK	0.3d	0.4c	0.3e
CON	1.6a	0.7b	0.8c
OPT	1.5a	0.9ab	0.9b
OPT-N	0.9c	0.8b	0.6d
OPT-P	1.2b	0.7b	0.6d
OPT-NP+S	1.2b	1.2a	1.1a

## 2.5 土壤酶与水稻产量及土壤养分的相关分析

由表 6 可知, 脲酶、磷酸酶、蔗糖酶的活性均与产量、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、有效铜、有效锌、有效铁、有效锰呈正相关关系, 土壤脲酶活性与产量、碱解氮、有效铜、有效铁、有效锰含量呈显著相关或极显著相关, 土壤磷酸酶活性与产量、有机质、速效钾、碱解氮、有效铜、有效铁呈显著或极显著相关, 蔗糖酶活性与产量、速效钾、碱解氮、有效铜、有效铁有效锰呈显著或极显著相关。

表 6 土壤酶活性与水稻产量及土壤养分之间的相关系数

项目	脲酶	磷酸酶	蔗糖酶
产量	0.683*	0.838**	0.797**
有机质	0.105	0.685*	0.505
有效磷	0.589	0.386	0.414
速效钾	0.369	0.826**	0.689*
碱解氮	0.718*	0.867**	0.926**
有效铜	0.905**	0.801**	0.934**
有效锌	0.070	0.531	0.346
有效铁	0.670*	0.987**	0.976**
有效锰	0.644*	0.524	0.683*

注:  $r_{0.05} = 0.6220$ ,  $r_{0.01} = 0.7433$ ; \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ );

\*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

## 3 讨论

丁文金等<sup>[7]</sup>发现, 有效穗数、千粒重、结实率对水稻产量起着决定作用; 澎英湘等<sup>[8]</sup>的研究结果也表明, 有效穗数的提高是水稻产量提高的主要影响因素, 这与本研究的结果一致。本研究发现, 长期减少磷肥 50% 或者在减少氮 (30%) 磷 (50%) 的基础上秸秆还田不仅没有造成减产反而水稻产量还有所增加, 长期减少氮肥 30% 对水稻产量的影响不大, 这与前

人<sup>[9-10]</sup>的研究一致。

秸秆还田能够提高土壤中有机质的含量<sup>[11-13]</sup>。本研究发现, 长期施用化肥降低了土壤中有机质的含量, 长期减量化施氮磷肥加秸秆还田有机质含量提高了 3.8%, 有机质含量较试验初期提高不大, 可能是因为减少了氮肥和磷肥施用的缘故。高菊生等<sup>[14]</sup>和黄晶等<sup>[15]</sup>研究发现, 长期施肥能够提高土壤中速效钾、有效磷、碱解氮的含量。本试验研究发现, 长期不同施肥处理后, 提高了土壤中碱解氮和速效钾的含量, 减氮 30% 或减磷 50% 虽然较其他施肥处理的土壤养分含量低, 但较试验初期是增加的, 本试验减磷处理降低了土壤中的有效磷含量, 可能是因为减磷量较多的原因, 即使增加了秸秆还田, 其土壤有效磷含量提高也不显著。

本研究发现, 长期不施肥处理, 土壤中的有效铜锌铁锰含量显著较低, 长期无机肥配施秸秆还田, 土壤中的有效铜锌铁锰含量显著较高, 这与魏明宝等<sup>[16]</sup>的报道一致。前人<sup>[17]</sup>研究表明, 长期施用氮肥能够明显增加土壤中有效铜的含量, 长期单施无机肥会降低耕层土壤中的有效锌含量<sup>[18]</sup>, 长期施用磷肥, 使得磷与锌的拮抗作用增强, 会显著降低土壤中的有效锌含量<sup>[17]</sup>, 单独施用磷肥会增加土壤中的有效铁含量<sup>[19]</sup>, 长期施用无机肥, 使得碱性土壤中的有效锰含量升高, 酸性土壤中的有效锰含量降低<sup>[19]</sup>, 酸性土壤中施用磷肥会降低土壤中的有效锰含量<sup>[20]</sup>。本研究发现, 减氮 30% 肥的处理较不减少氮肥的处理其有效铜含量降低。长期施用氮磷肥或者氮磷钾肥土壤有效锌含量明显低于减少氮磷肥施用的处理。长期减少 50% 的磷肥耕层土壤中的有效锌含量较减氮 30% 处理高, 有效铁含量低于不减少磷肥处理, 本试验的土壤为中性土壤, 长期减少氮肥的施用土壤中有有效锰的含量相对较低。

长期减量化施肥作为一种防控农业面源污染的有效手段, 不仅可以减少化肥的投入, 配施秸秆还可以作为秸秆废弃物利用的重要途径。本试验结果表明, 高产施肥条件下减量化施肥配施秸秆还田对脲酶的影响不显著, 这与李芳等<sup>[21]</sup>在郑州试验站得到的结果一致; 而任万军等<sup>[22]</sup>的研究结果表明, 土壤的脲酶活性秸秆还田处理高于未秸秆还田处理, 原因可能是本试验减少了氮磷肥的施用, 导致秸秆中的氮磷元素被作物吸收利用, 对脲酶的分泌起到了抑制作用。对磷酸酶和蔗糖酶活性的分析可知, 减少磷肥的施用土壤中这两种酶的活性较其他施肥处理较低, 这与 Zhao 等<sup>[23]</sup>和李芳等<sup>[21]</sup>的研究结果一致, 减量化施肥配施秸秆还田土壤中这 2 种酶的活性显著高于其他处理, 说明秸秆还田能够提高土壤中的磷酸酶和蔗糖酶的活性。

土壤酶活性与土壤养分含量呈显著或极显著正相关关系,这与前人<sup>[24-25]</sup>的研究结果一致,故土壤酶活性与土壤养分之间存在密切的关系,而作物产量的高低与土壤养分之间密不可分,故土壤酶活性可以作为评价作物产量与土壤肥力的指标。

## 4 结论

与高产施肥相比,在高产施肥的基础上减氮 30%或者减磷 50%处理水稻产量下降不明显,减氮 30%、减磷 50%+秸秆还田有增产效果,但差异不显著。

与试验初期相比,减量施肥加秸秆还田处理土壤中的有机质、速效钾、碱解氮含量均有不同程度的增加,而有效磷含量呈减少的趋势;

在高产施肥的基础上减少氮磷肥的施用会降低土壤中有效铜、有效铁的含量,增加土壤中有效锌的含量,对于有效锰,减磷处理使其增加,减氮处理使其减少,而在减量的基础上秸秆还田又会增加土壤中有效铜锌铁锰的含量;

较不施肥相比,施用化肥能够明显提高土壤中脲酶、中性磷酸酶、蔗糖酶的活性,磷肥和氮肥的减少会一定程度的降低土壤中这 3 种酶的活性,减氮减磷基础上增加秸秆还田对脲酶的增加效果不明显,但是会显著增加土壤中中性磷酸酶和蔗糖酶的活性;土壤酶活性与水稻产量及土壤养分含量之间呈显著或极显著正相关关系,因此,可提出在巢湖流域,减量加秸秆还田可以代替高产施肥。

### 参考文献:

[1] 张维理,林葆,李家康. 西欧发达国家提高化肥利用率的途径[J]. 土壤肥料,1998(5):3-9.

[2] 万毅林. 稻—菜轮作条件下秸秆还田与化肥减量配施对作物产量及土壤性质的影响[D]. 重庆:西南大学,2015.

[3] 蔡炳祥,刘晓霞,李建国,等. 连续实施化肥减量对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 浙江农业科学,2016,57(4):471-474.

[4] 丛艳静,朱玲玲,陈秀莲,等. 秸秆腐熟剂处理稻草还田对茼蒿减量化施肥的效果初探[J]. 福建农业学报,2014,29(3):243-246.

[5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[6] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[7] 丁文金,马友华,胡宏祥,等. 秸秆还田与减量施肥对双季稻产量及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境与发展,2013,30(4):72-77.

[8] 彭英湘,王凯荣,谢小立,等. 水肥条件与稻草还田对土壤供氮及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2007,21(4):40-43.

[9] 汪丽婷,马友华,储茵,等. 巢湖流域不同施肥措施下稻

田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报,2011,25(5):40-43.

- [10] 王桂苓,马友华,孙兴旺,等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2):6-10.
- [11] 王东娟,罗志国,王佳骥,等. 玉米秸秆还田对土壤有机质提升影响因素及对策分析[J]. 农业与技术,2017,37(16):46.
- [12] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [13] 王海景,康晓东. 秸秆还田对土壤有机质含量的影响[J]. 山西农业科学,2009,37(10):42-45,63.
- [14] 高菊生,黄晶,董春华,等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):314-324.
- [15] 黄晶,高菊生,张杨珠,等. 长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]. 应用生态学报,2013,24(7):1889-1894.
- [16] 魏明宝,魏丽芳,胡波,等. 长期施肥对土壤微量元素的影响进展研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(22):11951-11953.
- [17] Saito K, Yamazaki H, Ohnishi Y, et al. Production of trehalose synthase from a basidiomycete, *Grifola frondosa*, in *Escherichia coli*[J]. Applied Microbiology Biotechnology,1998,50(2):193-198.
- [18] Ozanne P G. The effect of nitrogen on zinc deficiency in subterranean clover[J]. Australian Journal of Biological Sciences,1955,8(1):47-55.
- [19] 寇长林,王永歧,连东军,等. 施肥结构对砂质潮土中微量营养元素空间变化的影响[J]. 土壤通报,2001,32(1):35-37.
- [20] Shuman L M. Effect of phosphorus of level on extractable micronutrients and their distribution among soil fraction [J]. Soil Science Society America Journal, 1988,52(1):136-141.
- [21] 李芳,信秀丽,张丛志,等. 长期不同施肥处理对华北潮土酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2015,24(6):984-991.
- [22] 任万军,黄云,吴锦秀,等. 免耕与秸秆高留茬还田对抛秧稻田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2913-2918.
- [23] Zhao B, Chen J, Zhang J, et al. How different long-term fertilization strategies influence crop yield and soil properties in a maize field in the North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2013,176(1):99-109.
- [24] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J]. 生态环境,2008,17(5):2059-2063.
- [25] Burns R G. Soil enzymes[M]. Chelsea, USA: Lewis Publishers,1994:93-97.