

# 长期定位施肥对黄绵土区作物产量及养分回收率的影响

俄胜哲<sup>1,2</sup>, 杨志奇<sup>3</sup>, 罗照霞<sup>3</sup>, 袁金华<sup>1</sup>, 车宗贤<sup>1</sup>,  
王亚男<sup>2</sup>, 曾希柏<sup>2</sup>, 郭永杰<sup>1</sup>

(1. 甘肃省农业科学院 土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 天水市农业科学研究所, 甘肃 天水 741000)

**摘要:** 通过近30年(1981—2010年)的长期定位试验,系统研究长期施肥对黄绵土区作物产量及养分累积利用率的影响。结果表明:长期施用化肥和有机肥在显著增加小麦、油菜和胡麻3种作物产量的同时小麦产量年际间的稳定性也显著提高,化肥配施和有机肥与化肥配施的增产和稳产效果更佳;施用有机肥处理和不施用有机肥处理,氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)的增产效应都随试验年限延长而逐渐增加,且与试验年限间呈极显著正相关关系;施用氮肥(N)、氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)的平均增产效应分别为745、1413 kg·hm<sup>-2</sup>和1474 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥的平均增产效应为983 kg·hm<sup>-2</sup>;不同施肥处理中,氮磷(NP)配合施用及氮磷钾(NPK)配施处理氮和磷的累积回收率最高,分别为44.35%、44.55%和15.11%、15.35%;施用有机肥降低了氮和磷的累积回收率,有机肥与氮磷(MNP)及有机肥与氮磷钾(MNPK)配施处理氮和磷的累积回收率分别为30.41%、32.07%和9.95%、9.70%;氮磷钾(NPK)处理钾的累积回收率最高,为14.25%,同样施用有机肥显著降低了钾的累积回收率。

**关键词:** 长期施肥;黄土高原;黄绵土;作物产量;养分回收率

中图分类号: S147.2 文献标志码: A

## Effect of long-term fertilization on crop yields and nutrition accumulative recovery rates in Loessial soils region

E Sheng-zhe<sup>1,2</sup>, YANG Zhi-qi<sup>3</sup>, LUO Zhao-xia<sup>3</sup>, YUAN Jin-hua<sup>1</sup>, CHE Zong-xian<sup>1</sup>,  
WANG Ya-nan<sup>2</sup>, ZENG Xi-bai<sup>2</sup>, GUO Yong-jie<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Save water Agricultural, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China;

3. Tianshui Academy of Agricultural Sciences, Tianshui, Gansu 741000, China)

**Abstract:** Long-term fertilization experiment that established on Loessial soils lasted nearly for 30 years in Tianshui city of Gansu province was conducted to study the effects of long-term fertilization on crop yields and accumulative nutrient recovery rates. The results showed that long-term application of chemical fertilizers and manure significantly increased wheat, canola, flax grain yields and wheat yields stability between years, combined applying chemical fertilizers and organic manure applying combined with chemical fertilizer resulted in higher and stable yield performance. The yields increased by nitrogen (N), nitrogen and phosphorus (NP), nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) gradually increased with time, moreover, there were notable positive correlation between yields and times in NP, NPK, MNP and MNPK treatments. The mean wheat yields increased by N, NP and NPK were 745, 1413 kg·hm<sup>-2</sup> and 1474 kg·hm<sup>-2</sup>, manure application meanly increased wheat grain yield by 984 kg·hm<sup>-2</sup>. In all treatments the highest accumulative nitrogen and phosphorus recovery rates appeared in NP and NPK treatments, being 44.35%, 44.55% and 15.11%, 15.35%, respectively. Manure application significantly reduced accumulative nitrogen and phosphorus recovery rates.

收稿日期:2016-01-11

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划“中低产田障碍因子消减与地力提升共性关键技术研究”(2012BAD05B06);甘肃省农业科学院创新专项“甘肃省土壤肥料长期定位协同研究”(2015GAAS14);“十二五”公益性行业(农业)科研专项“粮食主产区土壤肥力演变与培肥技术研究与示范”(201103005)

作者简介:俄胜哲(1978—),男,甘肃庆阳人,博士,副研究员,主要从事植物营养与土壤生态等方面的研究。E-mail:eshengzhe@163.com。

通信作者:曾希柏(1965—),男,博士,研究员,主要从事中低产田改良、退化及污染土壤修复及重建等方面的研究。E-mail:zengxibai@caas.cn。

ery rates, MNP and MNPK treatments nitrogen and phosphorus accumulative recovery rates were 30.41%, 32.07% and 9.95% and 9.70%, respectively. The highest potassium accumulative recovery rate of 14.25% appeared in NPK treatment, manure application also significantly reduced potassium recovery rate.

**Keywords:** long-term fertilization; Loessial soils; crop yield; nutrient recovery rate

肥料在粮食生产中有着非常重要的作用,合理施肥不仅能为作物生长创造养分贮量丰富、贮供协调的土壤生态环境,而且还能改善土壤结构和理化性质,协调土壤水、肥、气、热等因素,提高土壤肥力,从而增加作物产量和改善农产品质量<sup>[1]</sup>。肥料对我国粮食产量贡献率达 30%~50%,肥料的广泛施用仍将是我国今后相当长时期内保障粮食安全和有效供给的基本途径和有效措施<sup>[2]</sup>。不合理施肥不仅导致肥料利用率低,也不利于作物高产稳产和土壤培肥。由于受气候、土壤、栽培措施等影响,施肥对土壤肥力和作物产量影响表现不一。有研究表明,长期施用化肥导致土壤结构破坏、土壤质量和生产力下降<sup>[3-4]</sup>,相反,也有研究认为,施用化肥可增加土壤中的生物量,维持或提高土壤有机质含量,进而增加作物产量<sup>[5-6]</sup>,但也有研究认为,施用化肥对土壤肥力无显著影响<sup>[7]</sup>。不同营养元素对作物的增产效应不同,营养元素配施的交互作用及施肥措施也会影响作物产量。因此,全面系统研究长期施肥对作物产量的影响对提高作物产量、维持和提高土壤肥力有重要意义,长期以来一直也是国内外政府和学者关注的重要科学问题之一。

肥料利用率是反映肥料施用合理与否的重要指标,肥料利用不仅存在当季利用,还存在后季利用问题<sup>[8]</sup>,同时受气候因素、土壤条件和作物品种等的影响,短期试验中肥料的利用率与长期试验的结果有差异<sup>[9]</sup>。养分回收率(累积利用率)为多年施肥处理与相应不施肥处理作物养分吸收量之差占养分施用量的百分数,充分考虑到了养分的后继利用,而且可以弥补和弱化气候等因素的影响,可较为准确地反应作物产量与养分吸收量间的数量关系及肥料效率和土壤养分表观平衡状况<sup>[10]</sup>。从探明肥料去向,减少肥料的损失,防止环境污染的角度来考虑,养分回收率这一评价参数具有更广泛、更重要的现实意义。黄绵土广泛的分布于甘肃东部和中部、陕西北部、山西西部、宁夏南部、河南西部和内蒙古等地,常和黑垆土、灰钙土等交错存在,是黄土高原分布面积最大的土壤类型,在农业生产上占有重要地位<sup>[11]</sup>。该区域内水土流失严重,生态环境退化,抗御自然灾害能力差,土壤肥力低下和降雨稀少是限制农业发展的主要因素<sup>[12]</sup>。长期以来,肥料的大量施用虽提高了

作物产量,然而不合理施肥,不仅使肥料利用率降低,而且会对生态环境带来潜在危害。长期定位试验具有时间的长期性和定位性等特点,信息量丰富,准确可靠,可为农业发展提供决策依据。本研究以 1981 年开始实施的黄绵土长期肥料定位试验为基础,系统研究化肥和有机肥单施或配合施用对作物产量和养分回收率的影响,以期为黄土高原黄绵土区施肥模式评价、减少因不合理施肥造成的养分资源浪费和高效科学的施肥模式的建立提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验起始于 1981 年,试验地位于甘肃天水市秦州区天水市农业科学研究所中梁试验站试验示范基地(34°05'N,104°5'E),海拔 1 650 m。温带大陆性气候,1981—2010 年平均气温 11.5℃,最高气温 35℃,最低气温 -19℃,≥0℃积温 4 134℃,≥10℃的年有效积温 3 513℃。年平均日照时数为 2 099 h,年平均太阳辐射 5 468 MJ·m<sup>-2</sup>,年平均生理辐射 2 679 MJ·m<sup>-2</sup>,其中年积温 ≥5℃生理辐射为 1 862 MJ·m<sup>-2</sup>,≥10℃生理辐射为 1 602 MJ·m<sup>-2</sup>。无霜期 185 d,1981—2010 年平均降雨量 500 mm(321~831 mm),60%的降雨量分布于 7—9 月。年平均蒸发量 1 493 mm。试验土壤类型为黄绵土,沙粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和粘粒(<0.002)含量所占比例分别为 7.65%、68.50%和 23.85%。试验播前(1981 年)耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状见表 1。

### 1.2 试验设计

采用裂区试验设计,主处理为施用有机肥(M)和不施用有机肥(M<sub>0</sub>)处理,副处理为不施化肥(CK)、单施氮肥(N)、氮磷肥配合施用(NP)和氮磷钾肥配合施用(NPK)4 个处理。随机区组排列,小区长 8.33 m,宽 4.00 m,小区面积 33.32 m<sup>2</sup>,重复 3 次。1981—1992 年每年施 N 90 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg·hm<sup>-2</sup>和 K<sub>2</sub>O 45 kg·hm<sup>-2</sup>,在此期间,农业生产实践化肥的用量明显高于试验的用量,1993 年后增加了化肥的用量。1993—2010 年化肥施用量为,年施 N 150 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>。氮肥采用尿素或硝酸铵,磷肥采用普通过磷酸钙或

磷酸二铵,钾肥采用硫酸钾,有机肥为农家土粪。1981年施有机肥  $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,小麦发生了倒伏,1983年后减少了有机肥施用量。1983、1984年和1985年施有机肥  $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,但增产效果不明显,则进一步调整了有机肥施用,1985—2010年每年施有机肥  $30$

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。1981—2010年间测定土粪的养分含量 10次,其有机碳、全氮、全磷和全钾的平均含量分别为  $20.10$ 、 $3.01$ 、 $1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和  $11.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为  $274.43$ 、 $189.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和  $190.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 1981年试验播种前 0~20 cm 土壤基本理化性状

Table 1 Soil physico-chemical properties of 0~20 cm before sowing in 1981

全氮 Total N /( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷 Total P /( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾 Total K /( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮 Available N /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available P /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available K /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质 Organic matter /( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH	CEC /( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
0.82	0.66	16.60	73.00	5.00	105.60	15.40	8.54	11.08

### 1.3 栽培管理

1981—2010年小麦、油菜和胡麻均采用人工开沟播种,行距 15 cm,种植密度与当地生产实践相同。氮肥、磷肥、钾肥及有机肥做基肥播前一次施入,然后翻耕。试验区一年一熟。试验主要轮作模式以小麦为主,与油料作物油菜和胡麻不规则轮作,与试验区的轮作模式基本相近。29年中1987、2000年和2003年三年供试作物为油菜,1991年为胡麻,其余年份均为小麦。田间杂草人工拔除。作物成熟期人工分小区收获,残茬高度  $< 10 \text{ cm}$ ,籽粒和秸秆及茎叶全部移出,其他栽培管理措施与当地农业生产实践相同。

### 1.4 样品采集与处理

在作物成熟期,每小区选取 20 株能代表小区作物生长状况的植株,连根拔起,根系即刻剪断直接还田,籽粒和秸秆分离用于生物性状考察。籽粒自然阳光下风干,茎叶于  $105^\circ\text{C}$  杀青 30 min,然后在  $65^\circ\text{C}$  烘干至恒重。籽粒和秸秆样品称重后,粉碎过筛 ( $0.5 \text{ mm}$ ),用于籽粒和秸秆中氮、磷和钾等元素含量的分析测定。分小区单打单收,籽粒及茎叶自然阳光下晒干后,称重计产。

### 1.5 测定项目及方法

1.5.1 植物样品的氮磷钾含量 准确称取植物样品(过  $0.5 \text{ mm}$ )  $0.5000 \text{ g}$  放入 100 ml 开氏瓶底部,加浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $8.0 \text{ ml}$ ,摇匀,静置过夜。在消煮炉上先低温加热,待  $\text{H}_2\text{SO}_4$  发白烟后再逐渐升高温度,当溶液呈均匀的棕黑色时,稍冷后加 10 滴  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。再加热至微沸,消煮约 7~10 min,稍冷后重复加  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,消煮,重复数次。每次添加的  $\text{H}_2\text{O}_2$  应逐渐减少,消煮至溶液呈无色或清亮后,再加热 10 min,除去剩余的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。冷却后,将消煮液无损地转移入 100 ml 容量瓶中,定容。澄清后吸取清液测定氮、磷、钾。同时进行空白试验,以校正系统误差。氮采用凯氏定氮

法测定,磷采用钼锑抗比色法,钾采用火焰光度法测定<sup>[13]</sup>。

1.5.2 土壤及有机肥基本理化性状 土壤质地的测定采用吸管法;土壤 pH 值采用蒸馏水浸提(土水比 1:2.5),pH 计测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,乘以校正系数 1.1。全氮采用开氏法;全磷和全钾采用  $\text{NaHCO}_3$  熔融,钼锑抗比色法和火焰光度法测定。Olsen-P 采用浓度  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 8.5 的  $\text{NaHCO}_3$  浸提,钼锑抗比色法;碱解氮用碱解扩散法;速效钾采用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的醋酸铵浸提,火焰光度法测定<sup>[13]</sup>。

### 1.6 数据计算与统计分析

氮磷钾配施可能产生交互作用,试验设计中缺少单施磷肥和单施钾肥的处理,不能准确地计算氮、磷和钾的产量效应,只能以相应的对照为基础,计算不同施肥处理的增产效应。不施用有机肥处理中以 CK(不施任何肥料)为对照,施有机肥处理中以 M(仅施有机肥)为对照。不施有机肥处理中,不同化肥单施或配施处理的增产效应为:  $\text{N} = \text{N} - \text{CK}$ ,  $\text{NP} = \text{NP} - \text{CK}$ ,  $\text{NPK} = \text{NPK} - \text{CK}$ ;施用有机肥处理,不同化肥单施或配合施用处理的增产效应为:  $\text{N} = \text{MN} - \text{M}$ ,  $\text{NP} = \text{MNP} - \text{M}$ ,  $\text{NPK} = \text{MNP} - \text{M}$ ;有机肥的增产效应为  $\text{M} = \text{M} - \text{CK}$ <sup>[14]</sup>。

养分回收率 (%) = [一定时间内施肥处理作物地上部累积养分携出量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) - 一定时间内相应对照处理作物地上部累积养分携出量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) / 一定时间内累积养分投入量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )]  $\times 100\%$

作物地上部养分携出量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = [作物秸秆产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )  $\times$  养分浓度 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) + 作物籽粒产量  $\times$  养分浓度 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )] /  $1000$ <sup>[8]</sup>

数据统计分析采用 SAS8.0 进行裂区试验方差分析,主处理为施用有机肥 (M) 和不施用有机肥 ( $\text{M}_0$ ) 处理,副处理分别为不施化肥 (CK)、单施氮肥

(N)、氮磷肥配合施用(NP)和氮磷钾肥配合施用(NPK)。用  $P \leq 0.05$  的 LSR 值( $LSR_{0.05}$ )为标准进行处理间差异显著性检验,图表绘制运用 Excel 2007。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期定位施肥下作物的产量及稳定性

施用有机肥和化肥(N、NP和NPK)对小麦、油菜和胡麻三种作物籽粒平均产量都有显著或极显著的影响,而且有机肥与化肥的交互作用也达到显著或极显著水平(表2)。单施氮肥(N)处理( $n = 25$ )小麦籽粒平均产量较对照增产 26.43%,氮磷配合处

理(NP)较对照增产 50.11%,氮磷钾配合施用处理(NPK)较对照增产 52.25%。施用有机肥处理小麦籽粒平均产量较不施用有机肥处理增产 18.74%(图1)。油菜和胡麻籽粒产量单施氮肥、氮磷配合和氮磷钾配合处理分别较对照增产 19.31%、37.79%、10.75%和 8.71%、23.39%、22.84%。施用有机肥处理油菜和胡麻籽粒产量分别较不施用有机肥处理增产 32.81%和 7.01%(图1)。化肥单施(N)和配施(NP、NPK)处理小麦籽粒产量增产幅度明显大于油菜和胡麻,而油菜对有机肥比较敏感,其籽粒的增产幅度明显大于小麦和胡麻。

表 2 不同施肥处理对作物产量及小麦产量变异系数影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the effect of fertilization on crop yields and wheat yield variable coefficient

变异来源 Variable source	自由度 df	F 值 F value			
		小麦产量 Wheat yield	油菜产量 Canola yield	胡麻产量 Flax yield	小麦产量变异系数 Wheat yield variable coefficient
有机肥 Manure	1	244.39**	22.50**	5.79*	66.79**
化肥 Chemical fertilizer	3	284.36**	6.28*	12.70**	128.11**
有机肥 × 化肥 Manure × Chemical fertilizer	3	21.02**	4.08*	3.66*	21.85**
误差 Error	12				
总变异 Total	23				

注:  $F_{0.05}(1, 12) = 4.79$ ,  $F_{0.01}(1, 12) = 9.33$ ,  $F_{0.05}(3, 12) = 3.49$ ,  $F_{0.01}(3, 12) = 5.95$ 。\*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。

Note:  $F$  test critical value are  $F_{0.05}(1, 12) = 4.79$ ,  $F_{0.01}(1, 12) = 9.33$ ,  $F_{0.05}(3, 12) = 3.49$  and  $F_{0.01}(3, 12) = 5.95$ . \*, \*\*, \*\*\* indicate significant at  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$  levels, respectively.

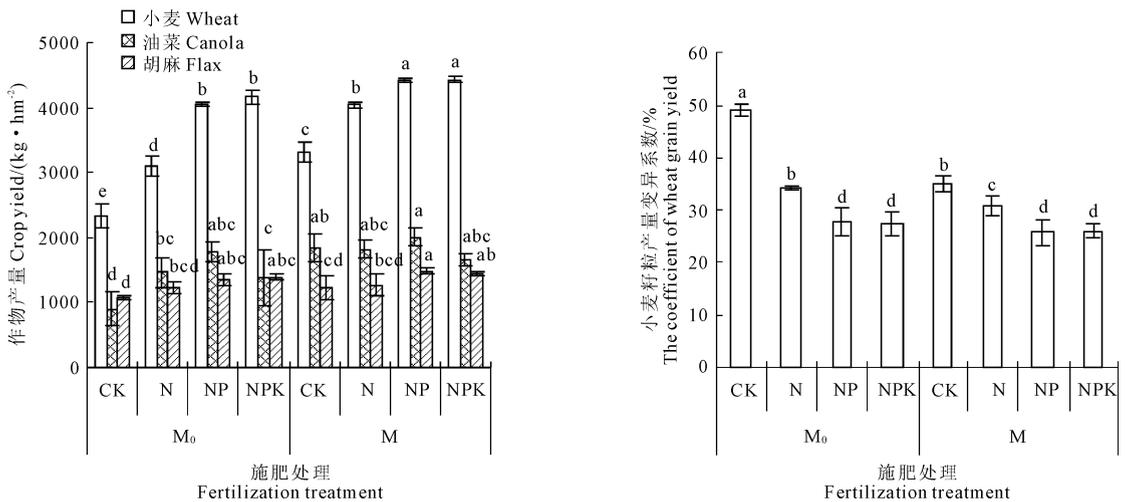


图 1 不同施肥处理对作物产量及小麦产量变异系数的影响

Fig.1 The effect of fertilization on crop yields and wheat yield variable coefficient under different fertilization treatment

注:图中同一作物不同字母表示处理间差异达到  $P \leq 0.05$  显著水平。 $M_0$ —不施有机肥,  $M$ —施有机肥,下同。

Note: Different letter in same crop are significantly different at  $P \leq 0.05$  level.  $M_0$ —no manure treatment,  $M$ —manure treatment. The same below.

由于种植油菜和胡麻的年份较少,29年中仅有3年种植油菜,1年种植胡麻,因此仅分析不同年份间小麦籽粒产量( $n = 25$ )的变异系数。由表2可以

看出,有机肥和化肥对小麦籽粒产量的变异系数都有极显著影响,而且有机肥和化肥的交互作用也达到极显著水平。单施氮肥(N)、氮磷及氮磷钾配合

施用(NP,NPK)和施用有机肥在增加小麦籽粒产量的同时明显增加了年际间小麦籽粒产量的稳定性。单施氮肥(N)、氮磷配合施用(NP)和氮磷钾配合施用处理(NPK)小麦产量年际间变异系数分别较对照降低了 22.42%、36.12%和 36.30%。施用有机肥处理年际间小麦籽粒产量的变异系数较未施用有机肥处理降低了 14.96%。

## 2.2 长期定位施肥下作物产量的演变

虽同一处理不同年际间小麦籽粒产量有较大的波动,但总体来看,除 MNP 和 MNPK 处理外,其余处理小麦籽粒产量都随着试验年限延续先逐渐降低,然后趋于稳定,其变化过程可用  $y = y_0 + a/x$  模型

较好模拟,拟合度均达到显著或极显著水平( $P < 0.05$ 或  $P < 0.01$ ) (表 3)。对照(CK)、单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)、氮磷钾配施(NPK)、单施有机肥(M)、有机肥与氮肥配合施用(MN)处理 2010 年小麦籽粒产量分别为 1982 年相应产量的 37.07%、65.47%、82.27%、86.15%、51.11%和 87.38%。对照和单施有机肥处理小麦籽粒产量的降幅明显大于单施氮肥和有机肥与氮肥配合施用处理。氮磷和氮磷钾配合施用可明显降低小麦籽粒产量递减的趋势。有机肥与氮磷(MNP)及氮磷钾(MNPK)配合施用处理小麦籽粒产量随试验年限的延续无明显规律性变化(表 3)。

表 3 小麦产量变化趋势

Table 3 Wheat grain yield changing trend with time under different fertilization treatments

处理 Treatments	起始产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Initial yield	产量演变/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield change trend	R <sup>2</sup>	P
不施有机肥 No manure	CK 5365	$y = 1689 + 4448/x$	0.58***	≤0.001
	N 5465	$y = 2579 + 3589/x$	0.50***	≤0.001
	NP 5510	$y = 3678 + 2610/x$	0.25**	≤0.01
	NPK 5610	$y = 3795 + 2524/x$	0.23*	≤0.05
施有机肥 Manure	M 4805	$y = 2828 + 33678/x$	0.40***	≤0.001
	MN 4730	$y = 3670 + 2546/x$	0.19*	≤0.05
	MNP 4685	$y = 4196 + 1519/x$	0.08	>0.05
	MNPK 4950	$y = 4142 + 2004/x$	0.14	>0.05

注:\*, \*\*和\*\*\*分别表示小麦产量变化趋势与模型的拟合水平达  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$ 和  $P \leq 0.001$ 显著水平。 $x$ 为试验持续年限。

Note: \*, \*\*, \*\*\* indicate the significant level of yield change trend fit the model at  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  and  $P \leq 0.001$ , respectively. The  $x$  as the experiment continuous time.

为了消除降雨量、温度、品种等因素对小麦籽粒产量的影响,采用不同施肥处理的增产效应(不同施肥处理增产效应 = 不同施肥处理的产量 - 对照产量)来研究不同施肥处理对小麦籽粒产量的影响与演变过程。从图 2 可看出,随着试验年限的延长,无论是在施用有机肥处理,还是不施用有机肥处理,长期单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)处理的增产效应都呈现逐渐增加趋势,而且氮磷配施(NP)及氮磷钾配施处理(NPK)的增产效应与试验年限间呈极显著或显著正相关关系。氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)处理的增产效应随试验年限的增幅明显大于单施氮肥(N)处理。在施用有机肥和不施用有机肥两主处理中单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)的平均增产效应分别为 745、1 413 kg·hm<sup>-2</sup>和 1 474 kg·hm<sup>-2</sup>。试验起始年(1981 年)由于有机肥施用量过大(60 t·hm<sup>-2</sup>),导致施用有机肥处理倒伏而减产,其他年份施用有机肥处理增产效应比较稳定,平均较未施用有机肥处理增产 983 kg·hm<sup>-2</sup>(图 3)。

## 2.3 长期定位施肥下氮磷钾的携出量及回收率

不施用有机肥处理中,1981—2010 年 29 年单施氮肥(N),氮磷配合施用(NP)和氮磷钾(NPK)配合施用处理的氮素累积投入量为 3 690.00 kg·hm<sup>-2</sup>,仅施有机肥处理(M)的氮素累积投入量为 2 565.00 kg·hm<sup>-2</sup>,而有机肥与化肥(MN、MNP 和 MNPK)配合施用处理的氮素累积投入量为 6 255.00 kg·hm<sup>-2</sup>,是单施化肥处理(N、NP 和 NPK)的 1.70 倍(图 4)。施用有机肥和化肥(N、NP 和 NPK)对氮磷钾的携出量有显著影响,而且有机肥与化肥的交互作用亦达到显著水平(表 3)。所有施肥处理较对照(CK)显著提高了氮素累积携出量,其中 MNPK 和 MNP 的氮素携出量最高,其次为 NPK 和 NP 处理。以 CK 处理为对照,计算氮的累积回收率, N、NP、NPK、M、MN、MNP 和 MNPK 处理的氮素累积回收率分别为 20.86%、44.35%、44.55%、26.75%、26.05%、30.41%和 32.07%,由此可见,与单施氮肥相比,化肥配施显著提高了氮素的累积回收率,施用有机肥降低了 NP 和 NPK 处理氮素累积的回收率。

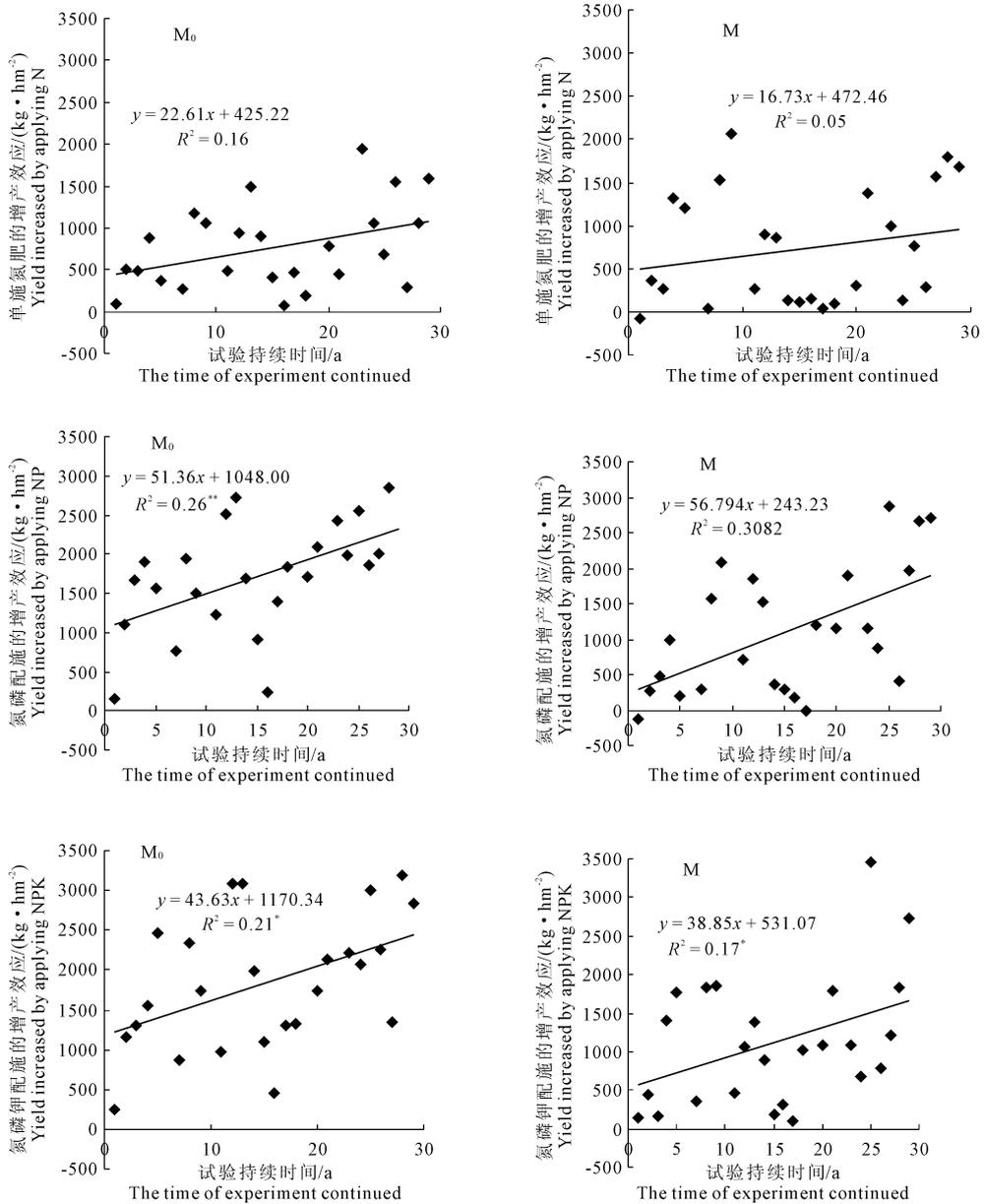


图 2 化肥的增产效应变化趋势

Fig. 2 The change of increased grain yield by different chemical fertilizer treatments

注：\*、\*\*和\*\*\*分别表示增产效应变化趋势与模型的拟合水平达  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  和  $P \leq 0.001$  显著水平,  $x$  为试验持续年限。

Note: \*, \*\*, \*\*\* indicate the significant level of yield change trend increased by fertilization fit the model at  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  and  $P \leq 0.001$  level, respectively. The  $x$  is the experiment continuous time.

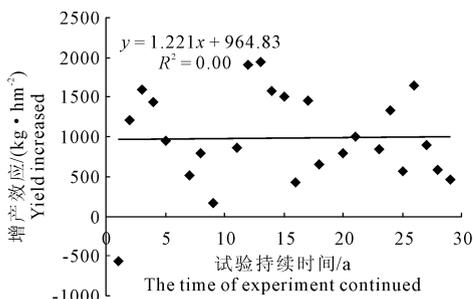


图 3 有机肥的增产效应变化趋势

Fig. 3 The change of increased grain yield by manure

氮磷(NP)和氮磷钾(NPK)配施的磷素累积投入量为  $802.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 仅施有机肥处理(M)的磷素投入量为  $1081.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而有机肥与氮磷(MNP)和与氮磷钾(MNPK)配合施用处理的磷素投入量为  $1883.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (图 4)。所有施肥处理的磷素携出量都较无肥对照(CK)显著增加。有机肥与氮磷(MNP)及有机肥与氮磷钾配合施用处理的磷累积携出量最大, 显著高于其他处理。考虑氮对磷素回收率的影响, 以单施氮肥处理(N)为对照, 计算磷累积回收率。NP、NPK、M、MN、MNP 和 MNPK 处理的磷

素回收率分别为 15.11%、15.35%、6.69%、9.38%、9.95% 和 9.70%。氮磷(NP)和氮磷钾(NPK)配合施用处理的平均磷素回收率为 15.23%。施用有机肥显著降低了磷素回收率,施用有机肥处理(M、MN、MNP 和 MNPK)平均磷素回收率为8.93%。

1 531.21 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥输入土壤的钾素为 9 490.50 kg·hm<sup>-2</sup>,有机肥与氮磷钾肥配合施用处理钾的投入量达 11 021.71 kg·hm<sup>-2</sup>(图 4)。同样,施肥显著提高了钾素的携出量,其中有机肥与氮磷(MNP)及氮磷钾(MNPK)配合施用处理的钾素携出量显著高于其它处理(图 4)。考虑氮磷对钾素回收率的影响,以氮磷配施处理(NP)为对照,计算钾素累积回收率。氮磷钾配施处理(NPK)钾素回收率最高(14.25%),其次为有机肥与氮磷钾配施处理(MNPK)。M、MN、MNP 和 MNPK 处理的钾素回收率分别为 -2.36%、1.20%、3.93% 和 5.44%。不同施肥处理氮、磷和钾的平均累积回收率分别为 32.25%、11.03% 和 4.49%,氮、磷和钾的累积回收率大小排序为氮>磷>钾。

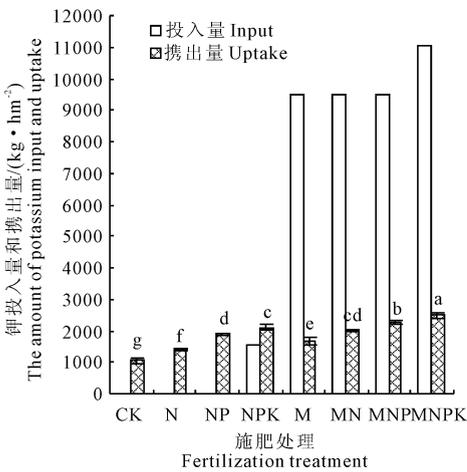
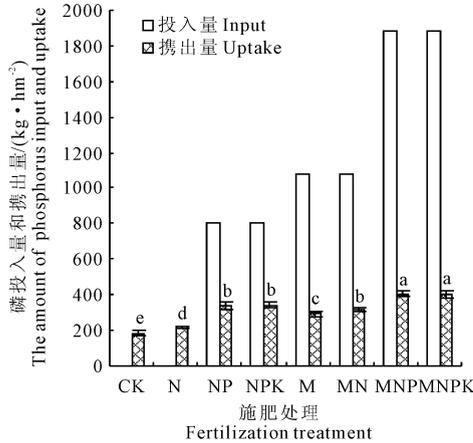
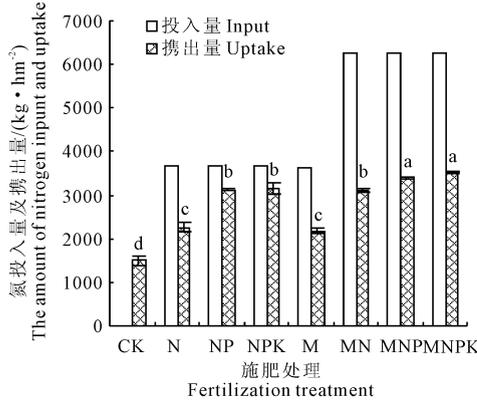


图 4 氮磷钾投入量与携出量

Fig.4 The total input and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium from 1981 to 2010

注:不同字母表示处理间差异达到  $P \leq 0.05$  显著水平。

Note: Different letter are significantly different at  $P \leq 0.05$  level.

### 3 讨论

#### 3.1 氮磷钾肥及有机肥对作物产量的影响

黄土高原土壤贫瘠,实践证明通过增加肥料投入来培肥土壤,是提高该区粮食单产、实现农业可持续发展的关键措施<sup>[14-15]</sup>。王旭等<sup>[16]</sup>通过系统分析全国测土配方施肥数据得出我国主要生态区化肥的小麦增产率在 34.70%~77.30%之间,西北地区为 77.30%,明显高于本研究单施氮肥小麦增产 26.43%。氮磷钾配合施用增产 52.25%的研究结果。刘芬等<sup>[17]</sup>在渭北旱塬上研究得出,单施氮肥小麦的增产率在 28.20%~44.20%之间,氮磷钾配施的增产率在 40.60%~90.60%之间,本研究结果基本在此范围内。陈磊等<sup>[18]</sup>在黄土高原中南部的陕西省长武县旱塬上的研究得出,长期单施氮肥小麦可增产 503 kg·hm<sup>-2</sup>,氮磷肥配施(NP)增产 2 262 kg·hm<sup>-2</sup>,施用有机肥增产 1 956 kg·hm<sup>-2</sup>,而本研究单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)及有机肥(M)的小麦平均增产效应分别为 745、1 413 kg·hm<sup>-2</sup> 和 983 kg·hm<sup>-2</sup>,与上述报道有明显差异。这些数值上的差异可能与气候条件、品种、施肥量及有机肥质量的差异有关。产量稳定性是判断作物生产系统持续性的主要标志,其主要取决于作物产量构成,品种抗干旱、洪涝、病虫害的特质及自然生态环境因子。施用有机肥及氮磷钾肥配合施小麦籽粒产量年际间变异系数可较对照降低 14.96%~36.30%,说明不施肥,小麦的抗逆性较差,产量容易造成大幅波动,施用有机肥和平衡施肥不但增加了粮食产量,而且降低了环境、生物与人为因素等对产量的影响,提升了抗自然灾害及不利因素对作物产量影响的能力。

氮磷钾配合施用(NPK)处理钾的累积投入量为

表 4 施肥对氮磷钾携出量影响的方差分析

Table 4 Variance analysis of the effect of fertilization on uptake of nitrogen, phosphorus and potassium

变异来源 Variable source	自由度 df	F 值 F value		
		氮携出量 Nitrogen uptake	磷携出量 Phosphorus uptake	钾携出量 Potassium uptake
有机肥 Manure	1	428.15***	115.01***	178.03***
化肥 Chemical fertilizer	3	1492.49***	164.91***	181.53***
有机肥 × 化肥 Manure × chemical fertilizer	3	17.38**	3.51*	4.74*
误差 Error	12			
总变异 Total	23			

注 Note:  $F_{0.05}(1, 12) = 4.79$ ,  $F_{0.01}(1, 12) = 9.33$ ,  $F_{0.05}(3, 12) = 3.49$ ,  $F_{0.01}(3, 12) = 5.95$  F test critical value are  $F_{0.05}(1, 12) = 4.79$ ,  $F_{0.01}(1, 12) = 9.33$ ,  $F_{0.05}(3, 12) = 3.49$  and  $F_{0.01}(3, 12) = 5.95$ . \*, \*\*, \*\*\* 分别表示在 0.05, 0.01 和 0.001 水平上显著, \*, \*\*, \*\*\* indicate significant at  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  and  $P \leq 0.001$  level, respectively.

### 3.2 长期施肥下作物产量的演变

除 MNP 和 MNPK 处理外,其余处理小麦籽粒产量都随试验年限延续先逐渐降低,然后趋于稳定,其变化过程可用  $y = y_0 + a/x$  模型较好的模拟。有机肥与氮磷(MNP)和氮磷钾(MNPK)配合施用小麦产量随试验年限延长略有降低趋势。长期不施肥(CK)、仅施用氮肥(N)和氮肥与有机肥配施(MN)处理,土壤中植物生长发育所需的磷钾等营养元素未能得到及时补充与更新,可能是导致小麦产量逐渐降低的主要原因。氮磷钾(NPK)配合施用及有机肥与氮磷(MNP)和氮磷钾(MNPK)配合施用也未能完全消除小麦产量降低的趋势。在同一长期试验中,引起作物产量逐渐降低的可能原因有营养失衡、病虫害、气候、连作障碍、品种和栽培管理措施等,但病虫害不可能导致作物产量持续降低,况且在试验过程中新的高产品种不断推出,替换老品种<sup>[19]</sup>。作物产量降低往往与土壤有机碳含量有关,而有研究表明,有机肥与化肥配合施用处理作物产量也逐渐降低,作物产量与土壤全碳含量没有必然的联系<sup>[19-20]</sup>。本研究的结果也显示,不同施肥处理土壤有机碳含量较试验起始时并未降低。因此引起氮磷(NP)、氮磷钾(NPK)配合施用及有机肥与氮磷(MNP)和氮磷钾(MNPK)配合施用处理产量有降低可能与气候因素或土壤微量元素有关。Fan 等<sup>[21]</sup>在与本研究相似的地区开展长期试验研究结果与本研究一致,同时指出作物产量降低与作物生育期内降雨量减少有关。

### 3.3 氮磷钾肥的累积回收率

氮是植物生长发育需求量最大的营养元素,也是作物高产土壤肥力关键限制因子。李虹儒等<sup>[22]</sup>研究表明,化肥配合施用(NPK)下,瘠土、潮土、褐土、灰漠土、黄棕壤、黑土、中性紫色土、红壤和石灰

性紫色土氮肥回收率平均值分别为 76.80%、73.40%、56.40%、44.90%、44.40%、33.80%、41.70%、33.60%和 26.20%。本研究显示不同施肥处理氮素的回收率在 20.86% ~ 44.55% 之间,其中氮磷(NP)配合施用和氮磷钾(NPK)配合施用处理氮素回收率最高,为 45% 左右,其低于瘠土、潮土和褐土氮素累积回收率,与灰漠土、黄棕壤和中性紫色土相近。石灰性土壤磷的利用率很低,作物年吸收利用磷肥量仅为投入量的 1/4 ~ 1/3,其余的残留于土壤中<sup>[23]</sup>。高静等<sup>[24]</sup>研究也指出,瘠土 NP 处理磷累积回收率 26.50%。本研究则显示氮磷(NP)和氮磷钾(NPK)配合施用处理的磷素累积回收率为 15% 左右,仅施有机肥(M)和有机肥与氮肥配合施用处理(MN)磷素回收率分别仅为 6.69% 和 9.38%,而且有机肥与氮磷配合施用(MN)和有机肥与氮磷钾配合施用处理(MNPK)磷素累积回收率分别为 9.95% 和 9.70%,明显低于上述报道。氮磷钾(NPK)处理作物钾素携出量大于投入量,以氮磷处理(NP)为对照,钾的累积回收率为 14.25%。农家土粪钾有效性不高,因此施用农家土粪显著降低了钾的累积回收率,施农家土粪的不同处理钾回收率在 -2.36% ~ 5.44% 之间。谭金芳等<sup>[25]</sup>研究报道,钾的当季回收率就达 30.40% ~ 43.30%。本研究磷和钾累积回收率低于相关报道的可能原因:一是对照(CK)多种养分处于严重耗竭状态,会影响作物产量和养分的吸收量,因此在计算磷的回收率时以单施氮肥(N)为对照,在计算钾回收率时以氮磷(NP)为对照,从而可能使得磷和钾的回收率较已有报道明显降低;二是施用有机肥(农家土粪)使氮磷钾的投入量大幅增加,而且农家土粪养分含量低,植物有效性低,也可能使得氮、磷和钾的累积回收率较低。

## 4 结 论

黄土高原黄绵土上施用化肥和有机肥对作物均有极显著的增产作用,化肥配施及有机肥与化肥配施的效果更佳。化肥配施及有机肥与化肥配施在增加作物产量的同时明显增加了小麦产量年际间的稳定性,降低了环境、生物与人为因素等对产量的影响,但施用有机肥及化肥与有机肥配合施用显著降低了氮磷钾养分的累积回收率。除 MNP 和 MNPK 处理外,其余处理小麦籽粒产量都随着试验年限推进先逐渐降低,然后趋于稳定,其变化过程可用  $y = y_0 + a/x$  模型较好模拟。氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)处理对小麦增产效应随试验年限延长而逐渐增加,且与试验年限呈极显著或显著正相关关系。施用氮肥(N)、氮磷配施(NP)及氮磷钾配施(NPK)的平均产量响应分别为  $745$ 、 $1\ 413\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $1\ 474\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。有机肥的平均产量效应为  $983\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同施肥处理氮的回收率在  $20.86\% \sim 44.55\%$  之间,磷的累积回收率在  $6.69\% \sim 15.35\%$  之间,钾累积回收率在  $-2.36\% \sim 14.25\%$  之间。

### 参 考 文 献:

- [1] 龚伟,颜晓元,王景燕.长期施肥对土壤肥力的影响[J].土壤,2011,43(3):336-342.
- [2] 赵志坚,胡小娟,彭翠婷,等.湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析[J].生态环境学报,2012,21(12):2007-2012.
- [3] Zhang H M, Bo - Ren W, Ming - Gang X U, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(2):199-207.
- [4] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, et al. Yield trends, and changes in soil organic - C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3):219-246.
- [5] Shen J, Li R, Zhang F, et al. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2):225-238.
- [6] Miglierina A M, Iglesias J O, Landriscini M R, et al. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties [J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(2):129-135.
- [7] Huang S, Zhang W, Yu X, et al. Effects of long - term fertilization

- on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2010, 138(1):44-50.
- [8] 宇万太,姜子绍,赵鑫,等.不同施肥制度对肥料利用率的影响[J].土壤通报,2009,41(1):122-126.
- [9] 杜君,秦鱼生.长期施肥下紫色土小麦肥料利用率及增产效应[J].西南大学学报(自然科学版),2011,33(5):88-94.
- [10] 段英华,徐明岗,王伯仁,等.红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1108-1113.
- [11] 黄自立.陕北地区黄绵土分类的研究[J].土壤学报,1987,24(3):266-271.
- [12] 摄晓燕,谢永生,王辉,等.主要农用黄绵土典型剖面养分分布特征及历史演变[J].水土保持学报,2010,24(4):69-72.
- [13] 鲁如坤.土壤化学分析[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [14] 樊廷录,周广业,王勇,等.甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):127-131,136.
- [15] 摄晓燕,谢永生,郝明德,等.黄土旱塬长期施肥对小麦产量及养分平衡的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):27-32.
- [16] 王旭,李贞宇,马文奇,等.中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J].中国农业科学,2010,43(12):2469-2476.
- [17] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):552-558.
- [18] 陈磊,郝明德,张少民,等.黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):230-235.
- [19] Dawe D, Dobermann A, Ladha J K, et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2):191-213.
- [20] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, 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[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2):264-280.
- [21] Fan T, Stewart B A, Yong W, et al. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 106(4):313-329.
- [22] 李虹儒,许景钢,徐明岗,等.我国典型农田长期施肥小麦氮肥回收率的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):336-343.
- [23] Kang B T, Yunusa M. Effect of tillage methods and phosphorus fertilization on maize in the humid tropics[J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69(2):291-294.
- [24] 高静,徐明岗,张文菊,等.长期施肥对我国6种旱地小麦磷肥回收率的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):584-592.
- [25] 谭金芳,洪坚平,赵会杰,等.不同施钾量对旱作冬小麦产量、品质和生理特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):456-462.