

长期施肥对冬油菜产量及养分吸收利用的影响

罗照霞¹, 杨志奇¹, 俄胜哲²

(1. 天水市农业科学研究所, 甘肃 天水 741000;
2. 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)

摘 要: 以 1981 年设置在甘肃天水黄绵土上的长期定位试验为基础, 研究长期施肥对冬油菜产量及氮、磷、钾吸收利用的影响。结果表明: 化肥合理配施能使冬油菜稳产、高产, 化肥配施有机肥冬油菜产量显著提高, 尤其以氮磷钾配施有机肥增产效果最好, 平均产量达 $1\,897.49\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较对照 (不施任何肥料) 增产 258.02%; 氮磷钾与有机肥配施氮、磷、钾地上部携出量均最多, 分别为 192.1 、 21.4 、 $192.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较对照分别提高了 259.65%、362.20%、276.56%; 相同施肥条件下, 施有机肥处理氮、磷、钾表观利用率较不施有机肥有不同程度的下降, 分别下降了 34.87%、22.16%、351.48%。

关键词: 长期施肥; 有机无机肥配施; 冬油菜; 产量; 养分吸收; 肥料利用率
中图分类号: S565.4 **文献标志码:** A

Effects of long-term fertilization on yield and nutrient uptake utilization of winter rapeseed

LUO Zhao-xia¹, YANG Zhi-qi¹, E Sheng-zhe²

(1. Institute of Agricultural Sciences, Tianshui, Gansu 741000, China;
2. Institute of Soil Fertilizer and Water Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A long-term (1981—2014) field experiment was conducted on Loessal soil at Tianshui city, Gansu province to investigate the effects of long-term fertilization on yield and nutrient uptake utilization of winter rapeseed. The results showed that the yield was increased significantly under the combination of chemical fertilizers and manure, with the average yield being $1\,897.49\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ as increased by 258.02% compared with CK. The total nutrient uptake of N, P and K was 192.09 、 21.40 、 $192.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, under the MNPK treatment and were increased by 259.65%, 362.20%, 76.56%, respectively compared with CK. Under the same chemical fertilizer, apparent recovery efficiency of N, P, and K were decreased by 34.87%, 22.16%, and 351.48% under the application of manure treatment.

Keywords: long-term fertilization; combined application of organic and inorganic fertilizers; winter rapeseed; yield; nutrient uptake; fertilizer use efficiency

冬油菜是甘肃省重要油料作物之一, 主要分布在干旱半干旱地区。近年来随着种植业结构的调整, 冬油菜种植面积不断扩大, 已成为半干旱山区农民解决食用油的主要途径。冬油菜单产水平的不断提高与品种的改良密不可分^[1-2], 生产管理中肥料也起着至关重要的作用^[3-5]。大量研究表明, 合理的氮、磷、钾肥配施可以促进作物的生长及养分吸收利用, 对作物的增产效果显著^[6-10], 氮、磷、钾肥与有机肥配合施用的土壤培肥及增产效果更佳^[11-13]。不同学者开展了大量的田间试验研究工作, 从农学角度应用肥料表观利用率、肥料偏生产力、肥料农学利用率、肥料生理利用率等重要参数分析和评价了在不同作物上的肥料利用效率^[14-19], 这些肥料利用率定量评价指标对于准确分析不同作物对肥料的响应程度和指导施肥具有重要意义。但是在实际农业生产中, 养管理存在氮、磷肥投入量偏高, 而钾肥施用不足, 有机肥施用减少甚至不施用等问题, 不仅造成养分资源浪费、化肥利用率降低,

收稿日期: 2015-11-20
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); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项“创新基地土壤肥料长期定位试验科研协作网建设”(2013GAAS12)
作者简介: 罗照霞(1977—), 女, 甘肃兰州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物营养与土壤肥力研究。E-mail: 13919669125@163.com。
通信作者: 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。

增产效益和产量的稳定性下降,甚至对生态环境带来潜在危害^[20-21]。肥料不合理施用是肥料利用率低的最主要原因,如何提高作物的肥料利用率已成为农业生产急需解决的问题。为此,本研究以 1981 年开始实施的黄土高原黄绵土长期肥料定位试验为基础,研究长期有机无机肥配施对冬油菜产量及养分吸收利用的影响,以期为同类地区冬油菜生产和科学的养分管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

冬油菜为天水市农业科学研究所中梁试验站自育品种:2000 年为 813-1-2-1,2003 年为 986-1,

2011 年和 2014 年为天油 8 号。供试有机肥为精鸡粪(全氮、全磷和全钾的平均含量分别为 0.3%、0.12%和 1.11%),氮肥为尿素(N 46.4%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。

1.2 试验区概况

试验开始于 1981 年,试验地位于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),该区属半干旱山区,海拔 1 650 m,降雨量 500~600 mm,年平均气温为 11.5℃,无霜期 185 d。试验地土壤属中壤黄绵土,养分含量、地貌特征在黄土高原黄绵土区有一定代表性。试验初期土壤 0~20 cm 基础理化性状见表 1。

表 1 1981 年 0~20 cm 土层土壤基础理化性状
Table 1 Soil physical and chemical properties at 0~20 cm layer in 1981

全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)
0.82	0.66	16.60	73	8.6	190	9.14	8.54	11.87

1.3 试验设计

在长期定位施肥的基础上选取 2000、2003、2011、2014 年种植冬油菜的试验数据进行分析,冬油菜生育期内降水量分别为 311.3、375.7、356.0、372.1 mm,除 2014 年 4 月中旬冬油菜花期的一场强降雪外,其它年份天气基本无异常。

试验设 8 个处理:不施任何肥料(CK);单施氮肥(N);施氮磷肥(NP);施氮磷钾肥(NPK);有机肥(M);有机肥+氮肥(MN);有机肥+氮磷肥(MNP);有机肥+氮磷钾肥(MNPK)。裂区设计,每个处理重复 3 次,小区面积 33.32 m²。2000、2003、2011 年和 2014 年冬油菜种植年限施肥量一致,施 N150、P₂O₅ 75 kg·hm⁻²,K₂O 75 kg·hm⁻²,有机肥 30 000 kg·hm⁻²。所有肥料均作基肥,于冬油菜播种前结合整地一次性施入。冬油菜一般于 8 月下旬播种,次年 6 月中旬收获,播量 42 万株·hm⁻²,人工撒播,4~5 叶期间苗、定苗。其它田间管理措施同当地大田。

1.4 测定项目与计算方法

产量按冬油菜成熟后各小区单打单收实产计算;籽粒和秸秆氮、磷、钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,氮采用凯氏法测定,磷采用钒钼黄比色法测定,钾采用火焰光度计法测定。有关肥料利用率及相关计算公式分别为^[14-15]:

养分累积量(kg·hm⁻²) = 籽粒产量 × 籽粒养分含量 + 秸秆产量 × 秸秆养分含量

肥料偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施肥区籽粒产量/肥料施用量

肥料农学效率(kg·kg⁻¹) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量)/肥料施用量

肥料表观利用率(%) = (施肥区地上部总吸收量 - 不施肥区地上部总吸收量)/肥料施用量 × 100

肥料生理利用率(kg·kg⁻¹) = (施肥区籽粒产量 - 不施肥区籽粒产量)/(施肥区地上部总吸收量 - 不施肥区地上部总吸收量)

采用 DPS3.11 专业版统计分析软件分析数据,并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 长期不同肥料配施对冬油菜产量的影响

不同施肥处理冬油菜产量变化显著(表 2),不施肥料处理冬油菜产量随着试验年限的延长逐渐减少,单施氮肥和有机肥处理产量有递减趋势,肥料配施处理产量保持稳定或一定程度的提高,这与降雨量和气温的影响有关,降雨量偏高或偏低都会影响肥料的肥效。2014 年产量较往年减产幅度达一半左右,是因为 2014 年 4 月中旬一场强降雪导致冬油菜较高和脆弱的植株经不起重压造成茎秆折断,大部分油菜花朵脱落和雪后低温冷冻使花期缩短,严重影响了冬油菜产量。

四年冬油菜平均产量以 MNPK 处理最高(表

2),达到 1 897 kg·hm⁻²,较对照增产 258.02%,较 M、MN 和 MNP 分别提高 86.53%、29.49%和7.30%。MNP 处理产量次之,为 1 768 kg·hm⁻²,较 CK 增产 233.56%,较 NP 处理增产 6.70%。NPK 处理产量为 1 720 kg·hm⁻²,较 CK、N、NP 处理分别增产 224.53%、49.18%、3.80%。NP 处理和 MN 处理产量分别为 1 657 kg·hm⁻²和 1 465 kg·hm⁻²,较对照分别增产 212.59%和 176.44%;肥料单施处理产量明显下降,N 处理和 M 处理产量分别为 1 153 kg·hm⁻²和 1 017 kg·hm⁻²,较对照增产 117.57%和 91.85%。

表 2 不同施肥处理下冬油菜产量
Table 2 Yield of winter rapeseed under different fertilization treatments

处理 Treatment	2000		2003		2011		2014		平均 Average	
	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Increase ment/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Increase ment/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Increase ment/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Increase ment/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Increase ment/%
CK	764e	—	710e	—	395g	—	251g	—	530g	—
N	1397d	82.85	1335d	88.03	985e	149.39	895e	256.57	1153e	117.57
NP	2049a	168.19	1527c	115.07	2021c	411.47	1030c	310.36	1657c	212.59
NPK	2091a	173.69	1530c	115.49	2161bc	447.06	1097b	337.05	1720bc	224.48
M	1671c	118.72	1170d	64.79	800f	102.58	426f	69.72	1017f	91.85
MN	1748bc	128.80	1668bc	134.93	1486d	276.01	959d	282.07	1465d	176.44
MNP	1924ab	151.83	1805b	154.15	2211ab	459.57	1132ab	351.00	1768b	233.56
MNPK	2039a	166.88	2000a	181.69	2371a	500.24	1180a	370.12	1897a	258.02

注:数值后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平,下同。
Note: Values followed by different letters are significantly different among the treatments at $P < 5\%$ level. The same below.

表 3 冬油菜地上部不同器官中氮吸收量
Table 3 The nitrogen uptake rate in grain and straw of winter rapeseed

处理 Treatment	氮含量 N content/(g·kg ⁻¹)		氮累积量 N accumulation/(kg·hm ⁻²)		地上部氮携出量 Total N uptake /(kg·hm ⁻²)
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	
CK	43.07	15.46	22.83g	26.39g	49.22g
N	46.20	16.50	53.28e	55.01e	108.28e
NP	45.32	16.53	75.09c	76.35c	151.44c
NPK	46.43	16.60	79.84b	78.77c	158.61c
M	43.47	15.97	44.21f	46.95f	91.16f
MN	46.07	17.23	67.50d	70.74d	138.24d
MNP	46.50	17.57	82.21b	85.71b	167.92b
MNPK	47.10	17.48	89.37a	90.59a	179.97a

注:表中数值为四年平均值,下同。
Note: Values are averages across the four experimental years. The same below.

与对照相比,N、NP、NPK 处理冬油菜地上部携出量分别增加 117.19%、205.15%和 218.87%,配施有机肥后冬油菜地上部携出量分别增加 177.70%、237.09%和 259.65%。施有机肥处理地上部携出量明显高于不施有机肥,相同施肥条件下分别提高 79.08%、27.86%、10.47%和 12.79%,说明有机肥

相同施肥条件下,施有机肥处理四年平均产量较不施有机肥处理分别提高了 27.06%、6.70%、10.29%,有机肥与化肥配施表现出的增产率大于二者分别单施。

2.2 长期不同肥料配施对冬油菜养分吸收的影响
2.2.1 长期不同肥料配施对冬油菜氮素吸收的影响 长期不同施肥处理下冬油菜籽粒氮含量明显高于秸秆,有机肥与氮、磷、钾肥配施效果更显著,施氮肥有利于促进冬油菜氮素向籽粒转移(表 3)。

对冬油菜地上部携出量有显著的增加促进作用,且随有机氮投入的增加,作物产量和吸收的养分向籽粒中转移的比例也相应增加。
2.2.2 长期不同肥料配施对冬油菜磷素吸收的影响 不同施肥处理冬油菜籽粒磷含量明显高于秸秆,但磷累积量的变化却没有明显的规律性,而且籽

粒和秸秆中的磷累积量变化相差不大,相同施肥水平下,施有机肥处理磷累积量较不施有机肥处理显著增加。

不同肥料比对冬油菜地上部磷携出量有显著影响(表 4)。NPK 和 NP 处理地上部磷携出量较 CK 和 N 处理分别提高 301.73%、95.58% 和 282.07%、86.01%,MNP 和 MNP 处理地上部磷携出量较 M

和 MN 处理分别提高 147.40%、68.77% 和 131.79%、58.13%。相同施肥水平下,施有机肥处理地上部磷携出量较不施有机肥处理分别提高 86.83%、33.33%、13.34% 和 15.05%。由以上结果可以看出,施用钾肥对冬油菜地上部磷携出量影响并不大,施用氮、磷肥的影响相对较强,尤其施用磷肥后磷素地上部携出量显著增加。

表 4 冬油菜地上部不同器官中磷吸收量
Table 4 The phosphorus uptake rate in grain and straw of winter rapeseed

处理 Treatment	磷含量 P content/(g·kg ⁻¹)		磷累积量 P accumulation/(kg·hm ⁻²)		地上部磷携出量 Total P uptake /(kg·hm ⁻²)
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	
CK	4.70	1.25	2.49g	2.13g	4.63g
N	4.55	1.28	5.25e	4.27f	9.51f
NP	5.35	1.91	8.86c	8.82d	17.69d
NPK	5.38	1.97	9.25c	9.35c	18.60c
M	4.50	1.50	4.58f	4.41f	8.99f
MN	4.76	1.39	6.97d	5.71e	12.68e
MNP	5.60	2.08	9.90b	10.15b	20.05b
MNPK	5.65	2.06	10.72a	10.68a	21.40a

2.2.3 长期不同肥料配施对冬油菜钾素吸收的影响 与氮、磷含量的变化趋势不一致,冬油菜秸秆钾

含量明显大于籽粒钾含量,施用钾肥后地上部钾携出量显著增加(表 5)。

表 5 冬油菜地上部不同器官中钾吸收量
Table 5 The potassium uptake rate in grain and straw of winter rapeseed

处理 Treatment	钾含量 K content/(g·kg ⁻¹)		钾累积量 K accumulation/(kg·hm ⁻²)		地上部钾携出量 Total K uptake /(kg·hm ⁻²)
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	
CK	19.69	23.88	10.44g	40.76f	51.20g
N	19.67	23.83	22.68e	79.45e	102.13e
NP	19.20	25.43	31.81c	117.46c	149.27c
NPK	20.50	28.13	35.25b	133.48b	168.73b
M	20.20	24.93	20.54f	73.30e	93.84f
MN	19.89	26.33	29.14d	108.11d	137.25d
MNP	20.23	28.37	35.76b	138.40b	174.16b
MNPK	21.03	29.50	39.90a	152.89a	192.80a

不施有机肥条件下,NPK 处理地上部钾携出量较 NP、N 和 CK 处理分别提高 13.04%、65.21% 和 229.55%,施有机肥条件下,MNPK 处理地上部钾携出量较 MNP、MN 和 M 处理分别提高 10.7%、40.47% 和 113.32%,较 CK 提高 276.56%。可以看出,施用钾肥使冬油菜植株体内钾素累积量急速上升,施用氮肥和磷肥钾素累积量增加则相对较小。钾肥与氮、磷肥配施,冬油菜植株发育良好,钾素向秸秆中积累量增加,籽粒中吸钾量下降。相同施肥水平下,施有机肥处理地上部钾携出量较不施有机肥处理分别提高 76.52%、34.39%、16.67% 和

14.27%,有机肥对冬油菜地上部钾携出量影响较大。

2.3 长期不同肥料配施对冬油菜氮、磷、钾肥利用率的影响

肥料偏生产力、农学利用率、表观利用率和生理利用率从不同的角度展现作物对肥料养分的利用情况,其中肥料表观利用率反映了作物对化学养分的吸收情况,备受学术界和政府的关注^[14]。偏生产力主要反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量的综合效应,农学利用率则反映单位施肥量增加作物产量的能力。

表 6 不同施肥处理下冬油菜的氮、磷、钾肥效率

Table 6 Fertilizer use efficiency of N、P and K under different fertilization treatments

肥料 Fertilizer	肥料效率 Fertilizer efficiency	CK	N	NP	NPK	M	MN	MNP	MNPK
N	偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)	—	7.69	11.04	11.46	11.30	6.10	7.37	7.91
	农学利用率 AE/(kg·kg ⁻¹)	—	4.15	7.51	7.93	5.41	3.90	5.16	5.70
	表观利用率 RE/%	—	41.73	73.05	77.93	46.93	39.55	52.76	57.78
	生理利用率 PE/(kg·kg ⁻¹)	—	9.96	10.28	10.18	11.53	9.85	9.78	9.86
P ₂ O ₅	偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)	—	—	22.09	22.93	29.05	41.86	16.07	17.25
	农学利用率 AE/(kg·kg ⁻¹)	—	—	15.02	15.86	13.91	26.72	11.25	12.43
	表观利用率 RE/%	—	—	17.41	18.63	11.49	23.00	14.02	15.25
	生理利用率 PE/(kg·kg ⁻¹)	—	127.68	86.27	85.16	121.10	116.17	80.28	81.54
K ₂ O	偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)	—	—	—	22.93	3.05	4.40	5.31	4.65
	农学利用率 AE/(kg·kg ⁻¹)	—	—	—	15.86	1.46	2.81	3.72	3.35
	表观利用率 RE/%	—	—	—	156.71	11.77	25.84	36.92	34.71
	生理利用率 PE/(kg·kg ⁻¹)	—	12.23	11.49	10.12	12.43	10.87	10.07	9.66

Note: PFP—partial factor productivity; AE—agronomic efficiency; RE—apparent recovery efficiency; PE—physiological efficiency.

表 6 结果显示,肥料配施处理偏生产力、农学利用率较肥料单施效果好,相同施肥条件下,不施有机肥处理肥料偏生产力和农学利用率显著高于施有机肥处理。不同施肥处理氮、磷、钾肥平均偏生产力分别为 8.98、24.88、8.07 kg·kg⁻¹,相应农学利用率下降至 5.68、15.87、5.44 kg·kg⁻¹。肥料表观利用率反映作物对肥料养分吸收状况,在相同施肥条件下,不施有机肥处理氮、磷、钾肥表观利用率随 N、NP、NPK 呈递增趋势,施有机肥条件下,配施氮肥后各处理氮肥表观利用率递增,配施磷、钾肥后磷、钾肥表观利用率却下降。这可能是因为供试作物对土壤缺失肥料消耗较多,导致其他肥料利用率不高,另一方面充分说明肥料合理配施是提高肥料利用率的有效途径^[22]。不同施肥处理肥料平均表观利用率以氮肥表观利用率最大,为 55.68%,钾肥表观利用率次之,为 53.19%,磷肥表观利用率最小,仅为16.63%。生理利用率是表征作物吸收的养分转化为经济产量的能力,本研究中不同处理氮、钾肥平均生理利用率大小相近,分别为 10.21 kg·kg⁻¹和 10.98 kg·kg⁻¹,磷肥平均生理利用率最大,为 99.74 kg·kg⁻¹。由以上分析可以得出,在冬油菜生产中需要同时关注地力水平和肥料平衡施用才能实现高产。

3 结论与讨论

作物产量受多种因素影响,其中肥料对提高作物产量的效果最好^[23]。多年试验证明施用氮、磷、钾及有机肥较不施肥料都有明显的增产效应,在施用氮肥的基础上合理配施磷肥,能够显著提高作物产量^[24]。不论施有机肥与否,氮肥、氮磷肥配施的

增产率明显高于钾肥增产率,钾肥的增产效益不明显。长期化肥配施(NKP)可显著提高作物产量^[5,25],化肥与有机肥配施(NPKM)处理作物增产效果更好^[26-27],产量达 1 897 kg·hm⁻²,较对照增产 258.02%,有机肥对作物的增产作用不容忽视。说明在冬油菜生产中氮磷钾肥与有机肥平衡配施增产作用显著,可作为冬油菜高产的施肥模式。

本试验氮、磷、钾肥施用后肥料偏生产力较高,但肥料农学利用率有所下降^[25],说明基础地力对冬油菜产量有较大影响。试验中氮、钾肥的生理利用率较小,但磷肥的生理利用率却很大,说明吸收每千克磷转化为油菜籽粒产量的能力很强。不同肥料配施冬油菜对氮、磷、钾的吸收利用存在显著差异,本研究所得出肥料表观利用率与其他冬油菜种植区域相比较较低^[11],可能与试验地土壤养分含量、生育期降雨量、气候、作物品种等各种因素有关。试验钾肥表观利用率超过 100%(NPK 处理),说明冬油菜吸收的钾素远大于化肥提供的钾素,表明施用化学钾肥后植株表观上仍需要从土壤中吸收大量钾素^[11],水稻^[28]、小麦^[29]等作物研究有相似的结论。产生原因一方面可能是施用钾肥显著促进作物生长,促进了作物对土壤钾素的吸收,另一方面是可能低估了施钾后作物从土壤中吸收的钾素,因此,以表观利用率表征钾肥利用率的合理性有待进一步商榷。试验中相同施肥条件下,配施有机肥肥料表观利用率反而下降^[30],可能是有机肥中含有丰富的钾素,配施化肥后钾素过剩反而影响作物对钾的吸收利用,导致耕层土壤中的钾素残留量较高,在此后的农业施肥指导中可考虑适当减少有机肥的投入,这当然

与有机肥中氮、磷、钾的含量有关。因此,在农业生产中,要根据各地土壤肥力水平及作物对养分的需求规律,在充分利用土壤养分的基础上,合理施肥,以减少肥料的损失,提高肥料利用率。

参 考 文 献:

[1] 殷 艳,廖 星,余 波,等.我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J].中国油料作物学报,2010,32(1):147-151.

[2] 殷 艳,王汉中.我国油菜产业发展成就、问题与科技对策[J].中国农业科技导报,2012,14(4):1-7.

[3] 邹 娟,鲁剑巍,陈 防,等.我国冬油菜区土壤肥力变化及施肥效果演变[J].中国油料作物学报,2011,33(3):275-279.

[4] 邹 娟,鲁剑巍,陈 防,等.长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究[J].作物学报,2011,37(4):729-734.

[5] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学,2010,43(19):3997-4007.

[6] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review[J]. Agri Ecosyst Environ, 2006, 117: 80-108.

[7] 张奇春,王光火.长期不同施肥下杂交稻与常规稻的产量与土壤养分平衡[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):340-345.

[8] Brennan R F, Bolland M D A. Influence of potassium and nitrogen fertilizer on yield, oil and protein concentration of canola (*Brassica napus* L.) grain harvested in south-western Australia[J]. Aust J Exp Agric, 2007, 47: 976-983.

[9] 刘秀秀,鲁剑巍,王 寅,等.氮磷钾肥施用对油菜产量及养分吸收利用的影响[J].中国油料作物学报,2014,36(4):483-488.

[10] 李 慧,马常宝,鲁剑巍,等.中国不同区域油菜氮磷钾肥增产效果[J].中国农业科学,2013,46(9):1837-1847.

[11] 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 fertilizers[J]. Field Crops Res., 2000, 68: 219-246.

[12] Jiang D, Hengsdijk H, DAITB, et al. Long term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize yield and soil fertility for a winter-wheat maize system in Jiangsu, China[J]. Pedosphere, 2006, 16(1): 25-32.

[13] 杨生茂,李凤民,索东让,等.长期施肥对绿洲农田土壤生产力

及土壤硝态氮积累的影响[J].中国农业科学,2005,38(10): 2043-2052.

[14] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.

[15] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant nutrition, 2003, 26: 1315-1333.

[16] 李银水,鲁剑巍,廖 星,等.磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J].中国油料作物学报,2011,33(1):52-56.

[17] 沈金雄,李志玉,廖 星,等.磷对甘蓝型油菜产量及矿质营养吸收与积累的影响[J].作物学报,2006,32(8):1231-1235.

[18] 鲁剑巍,陈 防,张竹青,等.磷肥用量对油菜产量养分吸收及经济效益的影响[J].中国油料作物学报,2005,27(1):73-76.

[19] 李银水,鲁剑巍,邹 娟,等.湖北省油菜氮肥效应及推荐用量研究[J].中国油料作物学报,2008,30(2):218-223.

[20] 郭胜利.施肥对半干旱地区小麦产量、NO₃-N 积累和水分平衡的影响[J].中国农业科学,2005,38(4):754-760.

[21] 袁新民,同延安,杨学云,等.施用磷肥对土壤 NO₃-N 累积的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):397-403.

[22] Li S Q, Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dry-land agroecosystem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(1): 76-81.

[23] 奚振邦.化肥与农业—简析化肥对现代农业的作用[J].磷肥与复肥,2003,18(2):5-10.

[24] 张少民,郝明德,柳燕兰.黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):159-163.

[25] 李月梅.氮磷钾肥施用对甘蓝型春油菜产量及肥料利用效率的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(2):174-180.

[26] 刘恩科,赵秉强,胡昌浩,等.长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(5): 789-794.

[27] 何晓雁,郝明德,李慧成,等.黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6): 1333-1340.

[28] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等.湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(5): 1058-1065.

[29] 黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣,等.长期定位施肥小麦的肥料利用率研究[J].麦类作物学报,2006,26(2):121-126.

[30] 杨 晓,郝明德,李芳林.黄土区长期施肥对小麦产量和养分吸收的影响[J].土壤通报,2010,41(1):164-169.