

黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响

张少民¹, 郝明德², 陈磊¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 重点分析黄土高原长武试验站长期定位施肥试验地 2004 年长期施肥对小麦产量、肥料利用率及土壤肥力影响的试验结果, 表明: 单施磷肥和单施氮肥的产量很低, 与对照的产量无明显差异, 氮磷钾配施与氮磷配施能显著提高小麦的产量。单施磷肥的磷肥利用率最低, 为 1%; 单施氮肥的氮肥利用率为 12.5%; 氮磷配施的氮、磷肥利用率均较高, 磷肥利用率比单施磷肥提高 5.7%, 氮肥利用率比单施氮肥提高 42.1%。氮磷钾配施较氮磷配施的氮肥利用率降低了 4.5%, 而磷肥利用率升高了 2.2%, 钾肥的利用率不高, 仅为 7.3%。单施磷肥只增加土壤磷素含量而降低了氮素含量, 单施氮肥能增加土壤中氮素的含量, 速效磷含量增加了 31%, 氮磷肥配施增加了土壤有机质和氮、磷养分含量。氮、磷配施或氮、磷、钾配施是提高黄土高原小麦产量和土壤肥力的有效措施。

关键词: 施肥; 小麦产量; 土壤肥力

中图分类号: S157.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)06-0085-05

黄土高原地区, 肥力低下是影响小麦产量提高的重要因素。20 世纪 80 年代以来, 人们通过大量施用化肥提高粮食的产量。黄土高原传统农业中的养分由单施农家肥逐渐转向以化肥供应为主。但我国目前肥料的当季利用率不高^[1], 不合理地使用化肥, 使化肥利用率降低, 肥料效益下降, 甚至对生态环境带来潜在危害^[2,3]。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, 能为农业发展提供决策依据。我们在长期试验的基础上研究不同施肥对作物产量和土壤肥力的影响, 以为当地合理施肥提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

长期施肥定位试验站位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村塬地上, 塬面平坦宽阔, 黄土堆积深厚, 土壤为黄盖粘黑垆土, 母质是深厚的中壤质马兰黄土, 全剖面土质均匀疏松, 通透性好, 肥力中等。试验地海拔 1 200 m, 年均降雨 578.5 mm, 年均气温 9.1℃, >10℃ 积温 3 029℃, 无霜期 171 d, 属暖温带半湿润大陆型季风气候。1984 年布设试验时耕层土壤有机质含量为 10.5 g/kg, 全氮含量为 0.57 g/kg, 碱解氮含量为 37.0 mg/kg, 全磷含量为 0.659 g/kg, 有效磷含量为 2.0 mg/kg, 速效钾含量为 129.3 mg/kg。试验地土壤养分含量、地貌特征

在黄土高原沟壑区有一定代表性。

1.2 试验设计

试验以氮肥、磷肥和钾肥为基本供试因子, 处理: ① CK; ② 单施磷肥 P(P₂O₅ 90 kg/hm²); ③ 单施氮肥 N(N 90 kg/hm²); ④ 氮磷肥配施 NP(N 90 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm²); ⑤ 氮磷钾配施 NPK(N 90 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 90 kg/hm²), 试验小区面积 22.2 m², 三次重复, 顺序排列。试验从 1984 年开始连续种植冬小麦(品种 1984、1985 年用秦麦 4 号, 1986~1995 年用长武 131, 1996 年后用长武 134), 播种期 9 月中、下旬(本次试验播种期为 9 月 12 日~9 月 25 日)。氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用硫酸钾, 肥料一次性在播种前施入, 田间管理同大田。

1.3 分析方法

2004 年在小麦生育期(拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期)采集土样和植物样品以供测定。

测试项目为: 土壤有机质(重铬酸钾外加热法); 全 N(开氏定氮法); 全磷(酸溶-钼锑抗比色法); 速效氮(碱解扩散法); 有效磷(NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法)^[4], 测定结果土样以风干样重表示。

植物样品氮、磷、钾含量测定: H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法, N 用开氏定氮法, P 用钼兰比色法, K 用火焰光度计法。

收稿日期: 2006-07-04

基金项目: 中国科学院野外站基金; 中国科学院知识创新项目(KZCX2-413-3); 国家科技攻关项目(2001BA508B15)

作者简介: 张少民(1979-), 男, 陕西城固人, 在读硕士, 主要从事植物营养与生态环境方面的研究。

通讯作者: 郝明德, Tel: 029-87012322, E-mail: Haodong@pubic.xa.sn.cn.

2 试验结果分析

2.1 不同处理小麦产量构成因素及产量

氮、磷、钾是小麦生长所需的大量营养元素,缺乏时会严重影响小麦的生长发育,从而影响成穗数和千粒重,最终影响小麦产量。氮、磷、钾肥配施是补给作物营养元素,提高产量的有效措施。单施 P 肥和单施 N 肥的处理分别下降了 7.7% 和 11.8% (表 1), 而单施 P 肥比单施 N 肥成穗数高 13.3 万穗/hm², NP 和 NPK 配施的成穗数分别增加 32.5% 和 38.4%, NP 配施分别比单施 P 和 N 肥增加了 132 万穗/hm² 和 145.4 万穗/hm², NPK 配施比 NP 配施的成穗数增加了 19.3 万穗/hm²。不同处理的千粒重均有增加,单施 P 肥和单施 N 肥分别比 CK 增加了 4.1 g 和 3.4 g, 单施 P 肥比单施 N 肥增加了 0.7 g, NP 配施分别比单施 P 肥和 N 肥增加了 2.4 g 和 3.1 g, NPK 配施比 NP 配施增加了 1.2 g, NP 配施和 NPK 配施能有效提高小麦千粒重,提高小麦籽粒饱满度。在单施 P 肥或单施 N 肥的条件下,成穗数均有下降,但磷肥更能促进小麦分蘖,提高小麦的成穗率^[5,6]。NP 配施和 NPK 配施能大幅度的提

高小麦的成穗数和千粒重。

试验研究结果表明(表 1):不同施肥处理的产量均有增加,增加趋势为: NPK>NP>N>P>CK。其中 CK、P、N 处理之间无明显差异, NPK 处理和 NP 处理与 CK、P、N 处理之间达到显著性差异。单施 P 肥产量增加了 106.4 kg/hm², 增幅 10.1%, 单施 N 肥产量增加 436.7 kg/hm², 增幅 41.3%, NP 配施的产量增加 2 079 kg/hm², 分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加 169.8% 和 110.1%, NPK 配施较 NP 配施的产量提高了 13.7%, 但没有达到显著性差异。说明黄土高原 NPK 配施和 NP 配施是提高产量的有效措施。

一般把无肥区的产量视为土壤地力对产量的贡献,按下公式可计算出肥料对产量的贡献率^[7]:

肥料对产量的贡献率 =

$$\frac{\text{施肥区产量} - \text{无肥区产量}}{\text{施肥区产量}} \times 100\%$$

单施 P 肥和单施 N 肥,肥料对产量的贡献率分别为 9.1% 和 29.2%。NP 配施,肥料对产量的贡献率分别比单施 P 肥和单施 N 肥提高了 57.2% 和 37.1%。NPK 配施比 NP 配施,产量无明显差异。

表 1 产量性状和肥料对产量贡献率

Table 1 Yield traits and contribution rate of fertilizer

处理 Treatments	成穗数 Number of effective spikelets (万穗/hm ²)	千粒重 Yield 1000 grain (g)	产量 Yield (kg/hm ²)	显著性(LSD0.05) Singnificance	肥料对产量的贡献率 Contribution rate of fertilizer (%)
CK	328.0	43.2	1056	b	—
P	302.7	47.3	1162	b	9.1
N	289.3	46.6	1492	b	29.2
NP	434.7	49.7	3135	a	66.3
NPK	454.0	50.9	3566	a	70.4

2.2 小麦地上部分生物量

小麦干物质的积累是形成产量的基础,小麦不同生育期的干物质积累均以 CK 最低,拔节期为 328.6 kg/hm²,孕穗期为 751.8 kg/hm²,抽穗期为 1 028.8 kg/hm²,灌浆期为 2 185.2 kg/hm²,成熟期为 2 466.4 kg/hm²(图 1)。单施 P 肥的生物量在拔节期为 504.6 kg/hm²,增加了 53.6%,单施 N 肥为 553.4 kg/hm²,增加了 68.4%,NP 配施最高,为 970.8 kg/hm²,分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加 90% 和 80%,NPK 配施较 NP 配施下降了 20%。

单施 P 肥的生物量在孕穗期增加了 10.1%,单施 N 肥增加了 19.3%,NP 配施分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加 109.8% 和 93.5%,NPK 配施较 NP

配施增加了 26.7%。单施 P 肥和单施 N 肥的干物质积累速率较慢,分别为 20.2 kg/(d·hm²) 和 21.5 kg/(d·hm²), NP 配施为 47.8 kg/(d·hm²), NPK 配施的养分供应充足,干物质积累速率最大,为 85.7 kg/(d·hm²)。

小麦在抽穗期生长发育迅速。单施 P 肥的生物量在抽穗期增加了 51.7%,单施 N 肥增加了 165.1%,NP 配施比单施 P 肥和单施 N 分别增加 127.2% 和 30%,NPK 配施较 NP 配施下降了 31.6%。单施 P 肥处理的干物质积累速率为 45.8 kg/(d·hm²),单施 N 肥和 NP 配施速率均较大,分别为 114.4 kg/(d·hm²) 和 113.1 kg/(d·hm²),NPK 配施的速率为最小,为 14.2 kg/(d·hm²)。

单施 P 肥的生物量在灌浆期增加了 18.2%，单施 N 肥增加了 57.9%，NP 配施分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加 148.9%和 86.2%，NPK 配施较 NP 配施下降了 5.2%。在这时期小麦生长旺盛，干物质积累迅速，除单施 N 肥外，其它施肥处理的干物质积累速率均达到最大，单施 P 肥处理为 63.8 kg/(d·hm²)，单施 N 肥为 45.2 kg/(d·hm²)，NP 配施为 180 kg/(d·hm²)，NPK 配施为 229 kg/(d·hm²)，为小麦生育期最大累积速率。

单施 P 肥的生物量在小麦成熟期增加 18.7%，单施 N 肥增加 66.8%，NP 配施分别比单施 P 肥和

单施 N 肥增加 132.7%和 70.7%，NPK 配施较 NP 配施增加 3%，无明显差异。此期由于小麦叶片逐渐衰亡，干物质积累速率均有不同程度的下降，单施 P 肥的干物质积累速率为 21.5 kg/(d·hm²)，单施 N 肥 41.4 kg/(d·hm²)，NP 配施 23.9 kg/(d·hm²)，NPK 配施为 57.8 kg/(d·hm²)。在小麦生育期内，生物量逐渐增加，单施 P 肥的生物量增加缓慢，且始终最低，NP 配施和 NPK 配施均较高，成熟期的生物量与产量变化趋势基本一致。不同施肥处理的生物量增加速率呈单峰曲线变化，单施 N 肥在抽穗期达到最大，其它处理在灌浆期达到最大值。

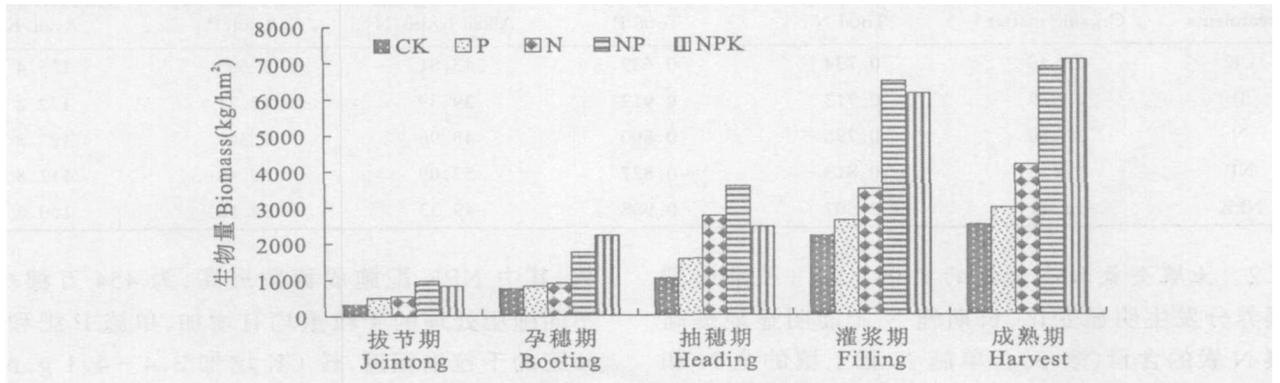


图 1 小麦不同生育期生物量变化

Fig.1 Change of biomass in different growing stages

2.3 肥料利用率变化

我国目前小麦生产中，肥料的当季利用率不高，提高黄土高原的肥料利用率对农业发展具有重要意义。施用 N 肥能增加籽粒的含氮量，有利于提高小麦品质。单施 P 肥或 N 肥能增加籽粒的吸磷量或吸氮量，而且能增加其它养分的吸收量。单施 P 肥的吸氮量增加了 1.7 kg/hm²，增率 7.4%，单施 N 肥增加了 11.3 kg/hm²，增加 50.6%，NP 配施分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加了 47.6 kg/hm² 和 37.9 kg/hm²，增加率为 198.7%和 113%，NPK 配

施与 NP 配施下降了 3.2 kg/hm²，下降 4.5%。单施 P 肥的吸磷量增加了 0.92 kg/hm²，增加 22.8%，单施 N 肥的吸磷量增加了 1.1 kg/hm²，增加率 27.3%，单施 N 肥比单施 P 肥的吸磷量增加 0.18 kg/hm²，NPK 配施比 NP 配施增加了 2.02 kg/hm²，增加了 20%。单施 P 肥的吸钾量增加了 0.53 kg/hm²，增加 14.1%，单施 N 肥的吸钾量增加 1.52 kg/hm²，增加 40.2%，NP 配施的吸钾量为 10.85 kg/hm²，分别比单施 P 肥和单施 N 肥增加 150.9%和 104.2%，NPK 配施与 NP 配施降低了 4.6%。

表 2 养分吸收量及肥料利用率

Table 2 Nutrient absorbing and utilization rate of fertilizer

处理 Treatments	氮肥 Nitrogenous fertilizer		磷肥 Phosphorus fertilizer		钾肥 Potassium fertilizer	
	吸氮量(kg/hm ²) Amount of N absorbed	利用率(%) Recovery rate	吸磷量(kg/hm ²) Amount of P absorbed	利用率(%) Recovery rate	吸钾量(kg/hm ²) Amount of K absorbed	利用率(%) Recovery rate
CK	22.29	—	4.03	—	3.79	—
P	23.94	—	4.95	1.02	4.32	—
N	33.57	12.5	5.13	—	5.31	—
NP	71.5	54.7	10.09	6.74	10.85	—
NPK	68.29	51.1	12.11	8.97	10.35	7.3

利用率分别比单施 N 肥和 P 肥高 42.1% 和 5.7%。NPK 配施较 NP 配施的 N 肥利用率降低 4.5%，而 P 肥利用率升高了 2.2%，籽粒吸钾量下降 0.49 kg/hm²，NPK 配施有利于提高籽粒吸磷量和磷肥的利用率，但钾肥本身的利用率不高仅为 7.3%。单施 N 肥和单施 P 肥的肥料利用率均较低，以 P 肥最低。NP 配施有利于提高小麦对养分的吸收，能显著的提高肥料的利用率。

表 3 不同施肥处理对土壤肥力影响

Table 3 Effects of soil fertility after different fertilization

处理 Treatments	有机质(g/kg) Organic matter	全 N(g/kg) Total N	全 P(g/kg) Total P	碱解 N(mg/kg) Alkali hydro·N	速效 P(mg/kg) Avail·P	速效 K(mg/kg) Avail·K
CK	12.48	0.734	0.639	43.81	5.603	125.4
P	12.29	0.713	0.912	39.39	45.21	122.2
N	12.50	0.796	0.690	48.96	7.347	123.8
NP	12.73	0.813	0.827	52.09	39.46	112.8
NPK	12.41	0.807	0.908	49.33	32.18	150.6

2.4.2 土壤全氮和有效氮的变化 20 a 长期施肥土壤养分发生明显变化，长期施 N 肥能明显地提高土壤 N 素的含量(表 3)。单施 N 肥土壤的全 N 和碱解 N 分别增加了 8.4% 和 11.8%，长期单施 P 肥的碱解 N 水平有所下降，下降了 10.1%，NP 配施的全 N 和碱解 N 分别比单施 N 肥增加 0.017 g/kg 和 3.13 mg/kg，NPK 配施的碱解 N 较 NP 配施下降了 2.76 mg/kg。

2.4.3 土壤全磷和速效磷的变化 长期施 P 肥显著地增加了土壤 P 素的含量，单施 P 肥土壤的全 P 增加了 42.7%，速效 P 含量增加尤其显著，增加了 7.1 倍，单施 N 肥的速效 P 含量增加了 31%，NP 配施的速效 P 含量比单施 P 肥下降了 5.75 mg/kg，NPK 配施的速效 P 较 NP 配施下降了 7.28 mg/kg。长期施氮肥不仅能明显地提高土壤氮素含量，而且能提高石灰性土壤的有效磷水平^[3]。

2.4.4 土壤速效钾的变化 单施 N 肥或 P 肥的处理速效 K 含量略有下降但不明显，NP 配施的最低，较 CK 下降了 10%，NPK 配施的速效 K 含量最高，增加了 20.1%。NPK 配施的速效 K 含量较 NP 配施增加了 33.5%。NP 配施增加了土壤速效 K 的携出量导致速效 K 含量降低，长期施用钾肥能显著地提高土壤速效 K 的含量。

3 结 论

1) 单施 P 肥和单施 N 肥的处理成穗数均低于 CK，NP 配施和 NPK 配施能显著提高小麦的成穗

2.4 长期施肥对土壤养分的影响

2.4.1 有机质的变化 有机质含量的变化直接反映了土壤肥力的高低。在不同施肥处理中，单施 N 肥和 NPK 配施无明显变化，单施 P 肥下降 1.5%，只有 NP 配施的有机质含量升高了 2%(表 3)。这主要是因为氮、磷配施有利于增加小麦根茬、枝叶等残留量^[8,9]。

数，其中 NPK 配施成穗数最高，为 454 万穗/hm²。不同施肥处理的千粒重均有增加，单施 P 肥和单施 N 肥的千粒重相近，较 CK 增加 3.4~4.1 g，NP 配施和 NPK 配施的千粒重相近，增加 6.5~7.7 g。不同处理产量的增加趋势为：NPK>NP>N>P>CK，在黄土高原 NP 配施和 NPK 配施是提高小麦产量的有效措施。

2) 在小麦生育期内，单施磷肥的生物量缓慢增加，且始终最低，氮磷配施和氮磷钾配施均较高，成熟期的生物量与产量变化趋势基本一致。不同施肥处理的生物量增加速率呈单峰曲线变化，单施氮肥在抽穗期达到峰值，其它处理在灌浆期达到峰值。

3) 单施 N 肥或 P 肥均能提高小麦对土壤养分的吸收，单施 N 肥提高幅度高于单施 P 肥，NP 配施的 N 肥利用率比单施 N 肥提高了 42.1%，P 肥利用率比单施 P 肥提高了 5.7%，而且 N、P 肥配施提高了吸钾量，NPK 配施有利于提高籽粒吸磷量和磷肥的利用率，但钾肥本身的利用率不高，仅为 7.3%。NP 配施有利于提高小麦对养分的吸收，能显著地提高肥料的利用率。

4) 长期单施 N 肥能显著地增加土壤中 N 素养分含量，而且能提高土壤速效 P 含量。单施 P 肥增加了土壤中 P 素含量，速效 P 含量增加尤其显著，增加了 7.1 倍，而碱解 N 水平有所下降。长期施用钾肥能显著地提高土壤速效钾的含量，NP 配施不仅增加了土壤中的 N、P 素含量，而且增加了土壤有机质，是培肥地力的有效措施。

参考文献:

- [1] 刘克礼,高聚林,张永平,等.春小麦氮、磷、钾三要素利用率的研究[J].麦类作物学报,2003,23(3):103-106.
- [2] 郝明德,来 璐,王改玲,等.黄土高原塬区长期施肥对小麦产量的影响[J].应用生态学报,2003,14(11):1893-1896.
- [3] 李科讲,张素芳,贾文竹,等.半干旱区长期施肥对作物产量与土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,1999,5(1):21-25.
- [4] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学分析常规分析方法[M].北京:科学出版社,1984.
- [5] 吴梅菊,刘荣根.磷肥对小麦分蘖动态和产量的影响[J].江苏农业科学,1998,(1):48-49.
- [6] Berzsényi Z, Györfy B, Lap D Q. Effect of crop rotation and fertilization on maize and wheat yields and yield stability in long-term experiment [J]. Journal of Agronomy, 2000, 13 (2~3): 225-244.
- [7] 郝明德,王旭刚,党廷辉,等.黄土高原旱地小麦长期施用化肥的产量效应[J].作物学报,2003,3(11):1106-1112.
- [8] 魏孝荣,郝明德,张春霞.黄土区长期定位培肥试验对土壤肥力的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):37-39.
- [9] Shen Qirong, Xu shuoming, Shi rihe. Effect of incorporation of wheat straw and urea into soil in biomass nitrogen and nitrogen-supplying characteristics of paddy soil [J]. Pedosphere, 1993, 3 (3):201-205.

Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of Loess Plateau

ZHANG Shao-min¹, HAO Ming-de², CHEN Lei¹

(1. College of Natural resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper studied the effects of long-term fertilization on wheat yield, fertilizer use efficiency (FUE) and soil fertility in the test station of Changwu in Loess Plateau. The results showed that the yield increase and the increase rate of the single application of nitrogenous (N) or phosphorus (P) fertilizer were low, there was no significant difference between the single application of N or P and CK, the combined application of N with P and the combined application of N, P and K could increase the yield significantly. The FUE of P of the single application of phosphorus fertilizer was 1%, which was the lowest; the FUE of N of the single application of nitrogenous fertilizer was 12.5%; the FUE of P of the combined application of N with P significantly increased the FUE of P and N. Compared with the combined application of N with P, the combined application of N, P and K increased the FUE of P by 2.2%, but declined the FUE of N by 4.5%; the FUE of K of the combined application of N, P and K was 7.3%, which was low. The single application of phosphorus fertilizer only increased soil P, but declined soil N; the single application of nitrogenous fertilizer increased soil N and increased available P by 31%, and the combined application of N with P increased soil organic matter, soil N and P. The potassium fertilizer had no effect on the yield increase in dry-land of Loess Plateau.

Keywords: fertilizer application; yield; soil fertility