

长期施肥对黄土旱塬区土壤—植物系统中氮、磷养分的影响

陈磊^{1,2}, 郝明德^{1,2*}, 戚龙海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: 对 1984 年建立的长期试验田, 分析了 2005 年小麦产量、养分吸收及土壤养分变化。结果表明, 单施磷肥增产 25.6%, 单施氮肥增产 48.1%, 其吸氮、磷量也相应增加, 但收获指数显著低于对照; 氮磷配施增产幅度为 101.3% ~ 302.8%, 养分吸收量增加显著, 最佳施肥量为 N₂P₂ (N 90 kg/hm²、P 56.4 kg/hm²)。施肥明显改变了耕层土壤养分的含量, 也影响了养分在土壤剖面的分布。氮磷配施是培肥土壤的有效途径, 耕层土壤全磷增加了 8.3% ~ 45.2%, 速效磷增加 54.8% ~ 917.8%。中等施氮 (N 90 kg/hm²) 水平下, 随着磷的增加, 耕层土壤全磷累积和施磷量的关系为 $y = 0.002x - 0.112$ 。速效磷含量增加和磷肥用量的关系为 $y = 9.6537 \ln(x) - 35.371$, 施肥对 60 cm 以下磷素影响较小。

关键词: 长期定位试验; 小麦; 养分吸收量; 土壤养分

中图分类号: S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)06-1006-07

Effects of long-term fertilization on nutrient variety of soil and plant systems in dry-land of Loess Plateau

CHEN Lei^{1,2}, HAO Ming-de^{1,2*}, QI Long-hai¹

(1 College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MOWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on 20 years of long-term experiment of applying fertilizer on continuous wheat in dry-land of Loess Plateau. Wheat yield, nutrient uptake and soil nutrient were analyzed in year 2005. The results showed that yield was increased by 25.6% and 48.1% with single application of P and N fertilizer, respectively. The N and P uptake was increased too, but the harvest index was decreased. The combination of N and P could increase yield by 101.3% - 302.8% and nutrient uptake significantly. Soil nutrient content in surface soil (0 - 20 cm) and the distribution of nutrient in soil layer varied. The combination of N and P was an effective ways to soil fertility management. Total P and available P in soil increased by 8.3% - 45.2% and 54.8% - 917.8%, respectively. The relation between total P accumulation and the amount of P fertilizer applied was $y = 0.002x - 0.112$, and the relation between available P and the amount of P fertilizer applied was $y = 9.6537 \ln(x) - 35.371$. The difference was not that significant in subsoil layer.

Key words: wheat; long-term application of fertilizer; yield; fertilizer use efficiency

2004 年, 我国氮肥用量约为 3300 万吨, 占世界氮肥用量的 28%^[1]。随着我国农业生产与化肥工业的不断发展, 资源、生态和环境问题日益受到关

注。赖庆旺^[2]等研究认为, 连续施用化学肥料导致土壤结构破坏、土壤质量降低和土地生产能力下降; 林葆等^[3-4]指出施化肥可以增加回归土壤中的生物

收稿日期: 2006-11-16

修改稿收到日期: 2007-03-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”(2005CB121101); 中科院知识创新方向性项目(kzcx2-yw-424-3);

中科院农业项目(kzcx1-yw-n15-04)资助。

作者简介: 陈磊(1982-), 男, 陕西三原人, 硕士研究生, 主要从事土壤—植物养分循环方面的研究。

Tel: 029-87012322, E-mail: chenl061@163.com. * 通讯作者 Tel: 029-87012322, E-mail: mdhao@iswc.ac.cn

量,提高土壤有机质含量;沈善敏等^[5-9]报道,长期试验是全面了解农田生态系统的重要场所,为评估肥料利用率、施肥对土壤肥力和环境质量的影响提供了重要的研究基础。通过长期施肥建立土壤养分库,有利于培肥土壤。

本试验通过 20 年的长期试验,分析施用化肥对小麦产量、养分吸收及土壤肥力的关系,揭示土壤—植物系统的养分循环和平衡,寻求维持和提高土壤肥力的最佳途径,以期对黄土区旱地合理施肥、培肥改土提供科学的依据。

1 材料与方方法

1984 年建立的长期肥料定位试验位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村旱地上。试验地海拔 1200 m, 年均降雨 578.5 mm, > 10℃ 积温 3 029℃, 年均气温 9.1℃, 无霜期 171d, 属暖温带半湿润大陆型季风气候, 是典型的雨养农业区。土壤为黄盖粘黑垆土, 试验时耕层土壤基础养分性状为: 有机质 10.5 g/kg, 全氮 0.57 g/kg, 碱解氮 37.0 mg/kg, 全磷 0.659 g/kg, 有效磷 2.3 mg/kg, 速效钾 129.3 mg/kg, pH 8.3。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。本试验在长期定位施肥的基础上, 于 2004 年选取其中小麦连作施肥的 10 个处理: 1) CK、2) N₂P₀、3) N₂P₁、4) N₂P₂、5) N₂P₃、6) N₂P₄、7) N₀P₂、8) N₁P₂、9) N₃P₂、10) N₄P₂ 进行研究。其中氮肥用量为 N 45、90、135、180 kg/hm², 磷肥为 P 26.4、52.8、79.2、105.6 kg/hm², 分别用 N₁、N₂、N₃、N₄ 和 P₁、P₂、P₃、P₄ 表示。小麦品种为长武 134, 于 9 月 12 日播种, 2005 年 6 月 21 日收获。小麦收获时采集 0—200 cm 的土壤样品, 每 20 cm 为一层。土壤样品经自然风干, 分别通过 1 mm 和 0.25 mm 筛, 供分析测定。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法, 全氮采用凯氏定氮法, 全磷采用酸溶—钼锑抗比色法, 碱解氮采用碱解扩散法, 速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定^[10]。植物样品经 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮后, N 采用开氏定氮法; P 采用钼兰比色法; K 采用火焰光度法测定。测定结果均以风干基表示。

2 结果与分析

2.1 产量

2005 年试验结果(表 1)分析表明, 施肥小麦子粒产量增产率为 25.6%~302.8%, 各处理差异显著。施 P 52.8 kg/hm² 增产幅度 25.6%, 施 N 90

kg/hm² 增产 48.1%, NP 配施增产显著, 增幅 101.3%~302.8%。

表 1 还看出, 同一施磷水平小麦产量随氮肥用量增加而增加 ($P < 0.01$)。与 CK 处理相比, N 45 kg/hm² 小麦增产 15.7%, N 90 kg/hm² 增产 169.5%, N 135 kg/hm² 产量增加 202.7%, N 180 kg/hm² 增产 220.8%。氮肥的增产效应呈报酬递减型, 符合 Mitscherlich 方程(对数方程), 施 N 量和小麦产量的关系为 $y = 2676.1 \ln(x) - 9599$ ($R^2 = 0.9319$), 同一施氮水平, 各处理差异显著 ($P < 0.05$), 施 P 量和小麦产量的关系为 $y = 1616.4 \ln(x) - 5407.9$ ($R^2 = 0.9821$)。

表 1 施肥对小麦产量的影响

Table 1 Effect of applying different fertilizers on wheat yield

处理 Treatment	产量(kg/hm ²) Yield	处理 Treatment	产量(kg/hm ²) Yield
CK	1420.8 eD	CK	1420.8 eE
N ₄ P ₂	5723.3 aA	N ₂ P ₄	4994.8 aA
N ₃ P ₂	5399.3 bA	N ₂ P ₃	4806.8 aAB
N ₂ P ₂	4806.8 cB	N ₂ P ₂	3872.7 bBC
N ₁ P ₂	2064.3 dC	N ₂ P ₁	2860.3 cCD
N ₀ P ₂	1783.9 dC	N ₂ P ₀	2104.3 dD

注(Note): 各列中数字后面不同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values in each column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$.

2.2 施肥对小麦养分吸收的影响

2.2.1 小麦的吸氮量 施肥显著提高了子粒对氮、磷的吸收, 比 CK 处理提高了 38.7%~346.5% (表 2)。同一施氮水平, 高磷处理吸收量低于中低磷, 施 P 量 > 52.8 kg/hm², 小麦吸氮量下降。同一施磷水平, 吸氮量随氮肥用量增加而增加, 与单施氮肥相比, 配施 N 45 kg/hm² 增加 11.4%, 施 N 90 kg/hm² 增加 194.8%, 施 N 135 kg/hm² 增加 228.7%, 施 N 180 kg/hm² 增加 258.6%。

与 CK 相比, 单施氮肥小麦秸秆吸氮量增加 218.0%, 单施磷肥增加 63.1%。氮磷配施差异显著, N₁P₂ 增加 4.6%, 变化不明显, 而中等氮肥处理 N₂P₁、N₂P₂、N₂P₃、N₂P₄、N₃P₂、N₄P₂ 秸秆增加了 106.1%~296.0%。

2.2.2 小麦的吸磷量 作物磷素利用率较低, 吸磷量在低范围水平波动, 子粒在 5.4 kg/hm²~20.8 kg/hm²、秸秆在 1.5 kg/hm²~4.6 kg/hm² 范围。子粒的吸磷量随施肥不同而变化, 单施磷肥吸磷量提高

表 2 长期施肥对小麦氮、磷吸收的影响
Table 2 Effect of long-term fertilizer application on wheat N and P uptake

项目 Items	CK	同一施氮水平(N 90 kg/hm ²) Same N fertilizer level					同一施磷水平(P 52.8 kg/hm ²) Same P fertilizer level				
		N ₂ P ₀	N ₂ P ₁	N ₂ P ₂	N ₂ P ₃	N ₂ P ₄	N ₀ P ₂	N ₁ P ₂	N ₂ P ₂	N ₃ P ₂	N ₄ P ₂
		子粒吸收(kg/hm ²) Seed uptake	N 31.8	50.5	115.7	116.8	64.9	87.9	39.6	44.1	116.8
	P 5.4	7.2	15.5	15.5	10.2	13.6	7.6	8.0	15.5	20.8	18.4
秸秆吸收(kg/hm ²) Straw uptake	N 13.1	41.7	38.3	37.0	27.0	33.0	21.4	13.7	37.0	48.7	51.9
	P 1.5	3.0	2.3	3.0	2.2	3.2	4.1	1.7	3.0	4.6	4.8
收获指数 Harvest index	N 0.709	0.548	0.751	0.759	0.706	0.727	0.650	0.763	0.759	0.728	0.732
	P 0.788	0.707	0.871	0.837	0.825	0.809	0.651	0.828	0.837	0.819	0.792

40.7%，其它处理提高了 88.6%~285.9%。同一施氮水平，随着施磷量的增加其增加幅度减少，与单施氮肥相比，增加 41.4%~115.1%。

同一施磷水平，随氮肥用量增加，小麦的秸秆吸磷量增加幅度较大：与 N₀P₂ 比，N₁P₂、N₂P₂、N₃P₂、N₄P₂ 增加 5.7%、103.7%、174.2%、141.7%。同一施氮水平，随施磷量变化，秸秆吸磷量为 N₂P₁、N₂P₃ 比不施磷肥减少了 23.6% 和 28.0%，N₂P₂ 变化不大，N₂P₄ 增加了 6.6%。说明在施氮量一定的情况下，增加磷肥用量对磷素的吸收贡献较小，而在施磷量一定时，增加氮肥投入能促进作物对磷素的吸收^[11]。

2.2.3 氮、磷养分收获指数 养分收获指数是指子粒中养分累积量和地上部分吸收总量的比值。单施氮或磷处理的收获指数均小于对照(0.709)，配施氮磷的处理收获指数增加显著。同一施氮水平，配施

磷肥收获指数显著增加，但随着施磷量增加(>52.8 kg/hm²)时，其增加幅度有下降趋势，这与产量结果一致。同一施氮条件下各处理氮、磷的收获指数随着施磷量的增加呈上升趋势，这说明在中等施磷水平条件下，适当的增加磷肥会提高磷向小麦子粒中的转运。但低氮水平下，施氮、磷比不施氮肥减少了 17.1 和 5.2 个百分点，其原因可能是因为增加氮素投入不够，小麦为保证营养生长，使大量的养分向秸秆中运输造成的。

2.3 施肥对土壤养分的影响

施肥对土壤养分含量有明显影响。在中等施肥量下，同一施氮或磷肥，配施磷肥或氮肥量增加，上层(0—20、20—40 cm)土壤养分含量提高，但施肥量偏高则呈下降趋势(表 3)。具体分析 0—200 cm 土壤剖面养分变化，可以看出施肥对不同深度土层养分的影响。

表 3 长期施肥对 0—40 cm 土层土壤肥力的影响
Table 3 Effect of long term fertilization on soil fertility in 0—40 cm

深度 Depth	项目 Item	处理 Treatment									
		CK	P ₂	N ₁ P ₂	N ₂ P ₂	N ₃ P ₂	N ₄ P ₂	N ₂ P ₀	N ₂ P ₁	N ₂ P ₃	N ₂ P ₄
0—20cm	有机质 OM(g/kg)	14.06	14.14	15.16	15.40	15.44	13.78	12.59	14.69	16.43	16.61
	全氮 Total N(g/kg)	0.776	0.790	0.876	0.942	0.909	0.880	0.810	0.892	0.960	0.930
	全磷 Total P(g/kg)	0.703	0.933	0.854	0.813	0.806	0.867	0.761	0.753	0.898	1.021
	速效磷 Avail. P(mg/kg)	2.30	23.41	13.15	10.70	6.95	8.51	2.18	3.56	14.71	16.74
	碱解氮 Avail. N(mg/kg)	43.61	39.02	58.53	64.26	56.56	53.77	63.59	50.17	60.33	56.72
20—40cm	有机质 OM(g/kg)	11.34	12.25	11.71	11.32	11.30	5.67	11.41	11.72	13.40	11.47
	全氮 Total N(g/kg)	0.72	0.665	0.752	0.738	0.692	0.344	0.745	0.743	0.752	0.718
	全磷 Total P(g/kg)	0.60	0.585	0.719	0.635	0.595	0.584	0.542	0.635	0.712	0.677
	速效磷 Avail. P(mg/kg)	2.07	8.43	6.34	3.84	2.20	3.03	0.66	0.74	4.46	3.03
	碱解氮 Avail. N(mg/kg)	36.23	32.62	45.90	58.20	48.36	38.20	54.43	36.39	40.00	43.44

2.3.1 土壤有机质含量 长期施用化肥对土壤耕层有机质影响不一，单施氮肥、磷肥，土壤有机质变

化不大，仅增加 0.5% 左右。氮磷配施增加了 4.5%~18.1%，且随着氮肥用量增加而增加，但是对耕层

以下影响不大。同一施磷水平,有机质变化较小(图 1);同一施氮水平下施肥量越大耕层肥力状况越好(图 2);随着土层深度的增加,施氮量越大,有机质的消耗越多,这可能是由于 N、P 供应充足,小麦的根系生长旺盛,加速了养分消耗造成的。

2.3.2 土壤全氮含量 施肥显著提高土壤耕层中全氮的含量(图 3)。同一施磷水平下,耕层土壤全氮含量呈现增加趋势。在 60 cm 处,土壤剖面全氮含量急剧下降,但各处理的含量都高于 CK; 80 cm 以下土壤全氮含量减少,变化趋势趋于平缓,随着施氮量的增加土壤全氮累积。

同一施氮水平下(图 4),随施磷量的增加,耕层中全氮含量都呈现出增加趋势。 N_2P_0 、 N_2P_1 、 N_2P_2 、

N_2P_3 、 N_2P_4 分别比对照增加了 4.1%、14.9%、21.4%、23.7%、19.8%。20 cm 以下随着施磷量的增加土壤全氮含量呈现先增加后减少的趋势;低磷水平全氮高于对照,高磷水平全氮则减少。可能是增加施磷量,促进作物根系的生长,加速土壤氮素的消耗造成的。

2.3.3 土壤碱解氮 同全氮含量变化相似,施氮肥对土壤耕层碱解氮含量增加极为明显,但随氮磷用量的变化波动幅度较大(图 5、图 6)。与对照相比,单施磷肥的土壤碱解氮减少了 10.5%,而单施氮肥或氮磷配施处理的增加了 15.1%~47.4%。同一施氮水平下,增施磷肥提高了氮的有效性,使耕层土壤碱解氮含量增加。

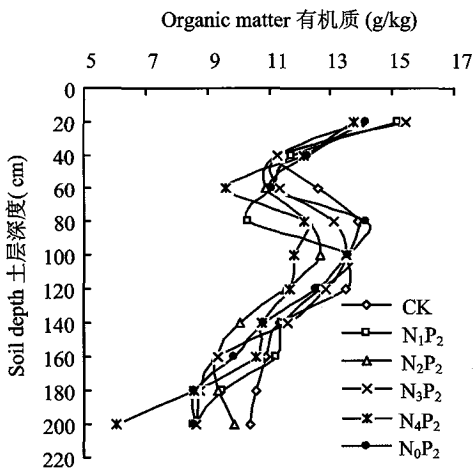


图 1 同一施磷水平土壤有机质变化

Fig.1 Changes of soil organic matter at same P level

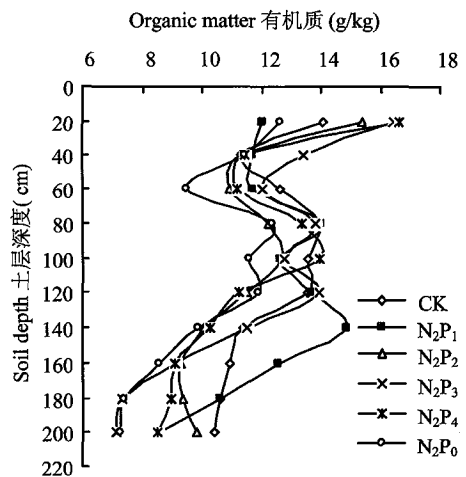


图 2 同一施氮水平土壤有机质变化

Fig.2 Changes of soil organic matter at same N level

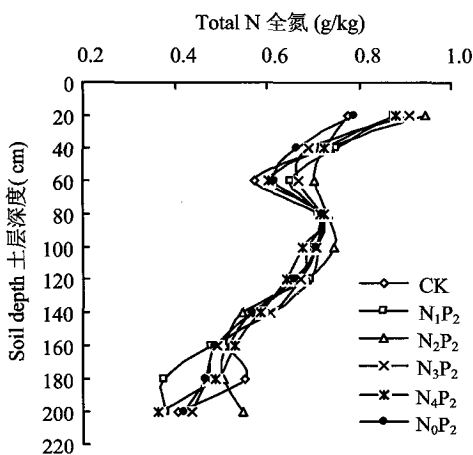


图 3 同一施磷水平土壤全氮变化

Fig.3 Change of soil total N at same P level

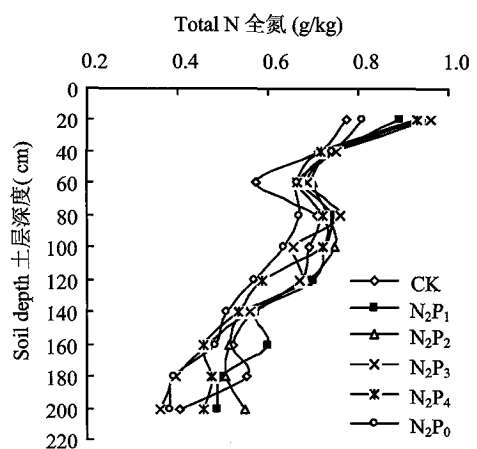


图 4 同一施氮水平土壤全氮变化

Fig.4 Change of soil total N at same N level

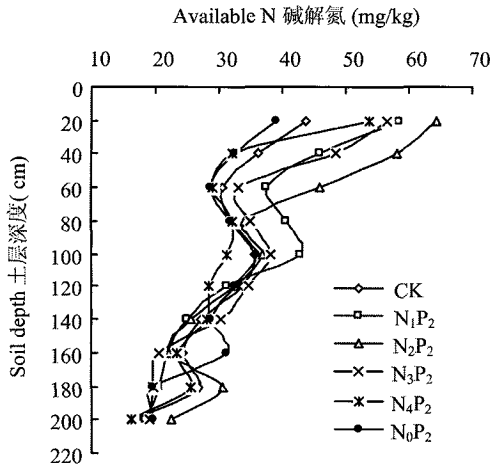


图5 同一施磷水平土壤碱解氮变化

Fig.5 Change of soil available N at same P level

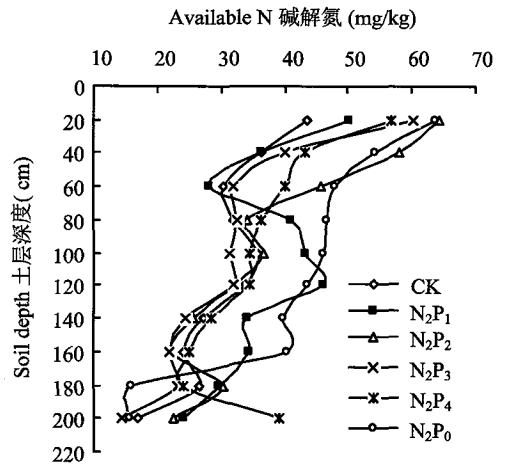


图6 同一施氮水平土壤碱解氮变化

Fig.6 Change of soil available N at same N level

2.3.4 土壤全磷含量 施肥增加了0—20 cm 土层中全磷的含量(图7、图8)。中等施氮(90 kg/hm²)水平,随施磷量增加耕层全磷累积量增加,N₂P₀、N₂P₁、N₂P₂、N₂P₃、N₂P₄ 分别增加了8.3%、7.1%、15.6%、22.7%、45.2%。土壤全磷累积和施磷量的关系为 $y = 0.002x - 0.112$ ($R^2 = 0.9753$)。中等施磷水平下(52.8 kg/hm²),不施氮肥的全磷累积最为显著,增加了32.7%,氮磷配施随着施氮量增加,土壤磷素消耗增加,全磷增加量减少。同一施磷水平的各处理,全磷含量在60 cm 处达到最低,在120 cm 处反而有所增加,在120—180cm 土层基本稳定。说明施肥对耕层以下全磷含量影响不大。

2.3.5 土壤速效磷含量变化 施肥对土壤速效磷影响显著(图9、图10),单施氮肥速效磷增加不大。

同一施氮水平下,随着施磷量的增加,耕层中速效磷含量迅速增加,N₂P₁、N₂P₂、N₂P₃和 N₂P₄ 分别比对照增加了54.8%、365.2%、539.6%和627.8%。速效磷增加和磷肥用量关系为 $Y = 9.6537 \ln(x) - 35.371$ ($R^2 = 0.9962$),说明增施磷肥对提高土壤速效磷具有重要作用。

同一施磷水平下,N₁P₂、N₂P₂、N₃P₂和 N₄P₂ 土壤速效磷分别比对照增加202.2%~471.7%,但随着氮肥用量增加其增加量减少,因为增加氮素的投入,作物磷素吸收增加,使土壤速效磷含量减少。速效磷在土壤剖面中的分布,耕层变化较大,40 cm 以下保持平稳。说明施肥对速效磷下层剖面分布的影响很小。

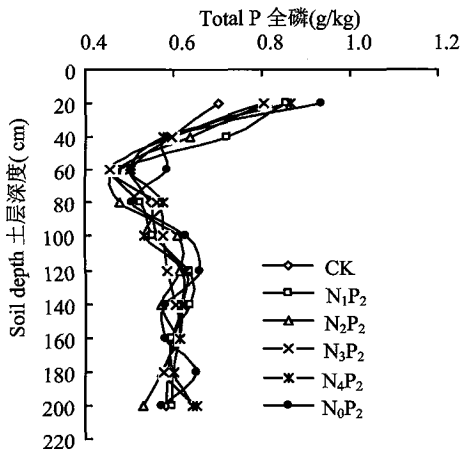


图7 同一施磷水平土壤全磷变化

Fig.7 Change of soil total P at same P level

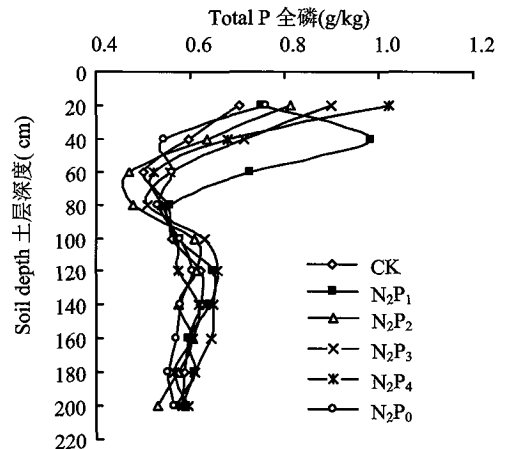


图8 同一施氮水平土壤全磷变化

Fig.8 Change of soil total P at same N level

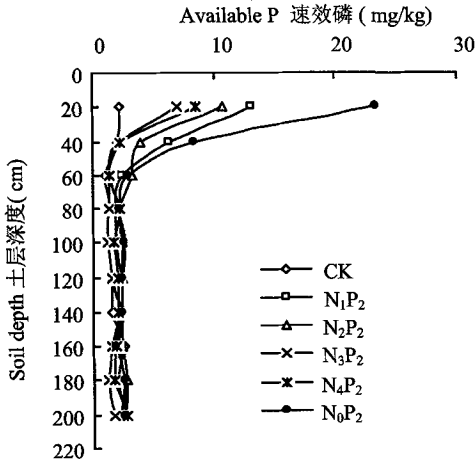


图 9 同一施磷水平土壤速效磷变化

Fig.9 Change of soil available P at same P level

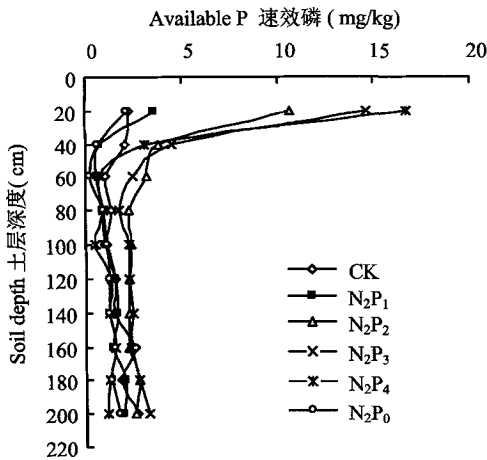


图 10 同一施氮水平土壤速效磷变化

Fig.10 Change of soil available P at same N level

3 结论

1) 长期施肥能增加小麦产量。单施磷增产 25.6%, 单施氮增产 48.1%, 氮磷配施增产效果显著^[12,13], 增幅 101.3%~302.8%。最佳施肥量为 N₂P₂ (N 90 kg/hm², P 56.4 kg/hm²)。同一施磷水平, 随氮肥用量变化小麦产量增加了 15.7%~220.8%, 施氮量和小麦产量的关系为 $y = 2676.1 \ln(x) - 9599$ 。同一施氮水平, 随施磷量增加产量增加, 比不施磷肥增产了 35.9%~137.4%。施磷量和小麦产量的关系为 $y = 1616.4 \ln(x) - 5407.9$ 。

2) 施肥明显提高了小麦对氮、磷的吸收量。小麦子粒吸磷量在 5.4~20.8 kg/hm², 秸秆在 1.5~4.6 kg/hm²。在施氮量一定的情况下, 增加磷肥用量对磷素的吸收贡献较小; 而在施磷量一定时, 增加氮肥投入能促进作物对磷素的吸收。土壤中磷素

处于积累状态。

单施氮肥和单施磷肥的氮收获指数低于对照。中等施氮条件下, 磷肥的施用量增加不一定能增加小麦的吸磷量, 相反还影响小麦对氮素的吸收。中等施磷条件下, 各处理氮、磷的收获指数随着施氮量的增加呈上升趋势, 适当的增加氮肥会提高磷素向小麦子粒中的转运。

3) 施肥明显改变了耕层土壤养分的含量, 也影响了养分在土壤剖面的分布。长期施用化肥不会导致耕层土壤有机质下降。碱解氮含量随施氮、磷量的变化波动幅度大, 与对照相比, 单施磷肥碱解氮含量减少了 10.5%, 而单施氮肥或氮磷配施处理增加了 15.1%~47.4%。耕层土壤磷素累积明显^[14], 全磷增加了 8.3%~45.2%, 中等施肥条件下, 耕层土壤全磷累积和施磷量的关系为 $y = 0.002x - 0.112$; 速效磷含量和磷肥用量的关系为 $y = 9.6537 \ln(x) - 35.371$ 。磷素很难向下淋溶, 所以施肥对 40 cm 以下磷素变化影响较小。

参考文献:

- [1] 郭胜利, 周印东, 张文菊, 等. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量形状的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 16-22.
Guo S L, Zhou Y D, Zhang W J et al. Effect of long-term applying chemical fertilizer on food production and soil distribution [J]. Soil Water Conserv. J., 2003, 10(1): 16-22.
- [2] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构、特性的研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 168-174.
Lai Q W, Li T G, Huang Q H. Research on continuous applying chemical fertilizer on soil structure and characteristic in rice soil [J]. Acta Pedol. Sin., 1992, 29(2): 168-174.
- [3] 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.
Yang S M, Li F M, Suo D R et al. Effect of long-term applying fertilizer on soil productivity and nitrate accumulate in Gansu Oasis [J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(10): 2043-2052.
- [4] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 1-12.
Lin B, Lin J X, Li J K. Crop yield and soil fertility of a long-term fertilization experiment [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetechnology Press, 1996. 1-12.
- [5] 沈善敏. 中国土壤肥力 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Sheng S M. Chinese soil fertility [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.
- [6] 党廷辉. 黄土旱塬区轮作培肥试验研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 44-48.
Dang T H. Research on the crops rotation and fertility in dry-land Loess Plateau [J]. Soil Eros. Soil Water Conserv. J., 1998, 4(3):

- 44-48.
- [7] 钦绳武,顾益初,朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 367-375.
Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 35(3): 367-375
- [8] 刘杏兰,高宗,刘存寿,等. 有机-无机肥配施下的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 138-147.
Liu X L, Gao Z, Liu C S *et al.* Research on the effect of applying organic and inorganic fertilizer on yield and soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 1996, 33(2): 138-147.
- [9] 李科江,张素芳,贾文竹,等. 半旱地区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 21-25.
Li K J, Zhang S F, Jia W Z *et al.* The effect of long-term application on crop yields and soil fertility in semi-arid areas [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(1): 21-25.
- [10] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
Nanjing Agricultural University. Analysis for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: Agricultural Press, 1992.
- [11] 蔡祖聪,钦绳武. 作物 N、P、K 含量对于平衡施肥的诊断意义[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 473-478.
Cai Z C, Qin S W. Diagnosis of balanced fertilization by N, P, K contents in grain and straw of wheat and maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(4): 473-478.
- [12] 樊廷录. 提高黄土高原旱地抗逆减灾的肥料定位试验研究[J]. 水土保持研究, 2003, 3(1): 6-8.
Fang T L. Research of drought-fight and calamity-diminished technology on location fertilizer experiment in dry-land Loess Plateau [J]. Soil Water Conserv. J., 2003, 3(1): 6-8.
- [13] 郝明德,王旭刚,党廷辉,等. 黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析[J]. 作物学报, 2004, 30(11): 1108-1112.
Hao M D, Wang X G, Dang T H *et al.* Analysis of long-term fertilization effect on yield of wheat in dry-land on Loess Plateau [J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(11): 1108-1112.
- [14] 章永松,林咸永,罗安成,苏铃. 有机肥对土壤中磷的活化作用及机理研究 I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145-150.
Zhang Y S, Lin X Y, Luo A C, Su L. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I. Effect of organic manure on activations to different phosphate in soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 145-150.