植物营养与肥料学报 2010,16(6):1333-1340
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响

何晓雁[1], 郝明德[1,2*], 李慧成[2], 蔡志风[3]
(1 西北农林科技大学资源与环境学院,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;
3 西北农林科技大学林学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 在长期定位试验的基础上,研究了黄土高原旱地不同施肥对小麦产量、土壤养分和水分的变化及其利用效率的影响。结果表明,单施有机肥(M)增产效果较好,产量达 5265.0 kg/hm^2; 有机肥和化肥配施(NPM)小麦产量最高,达 5898.8 kg/hm^2。NPM 配施小麦总吸氮量最大,比单施氮肥(N)增加了 131.4 kg/hm^2; NPM 配施的氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥生理利用率分别为 67.0%、49.16 kg/kg、36.97 kg/kg、73.11 kg/kg; 在不同施肥体系中其变化趋势基本一致,均为: N < NP < NM < NPM,处理间差异显著。土壤养分含量变化看出,单施氮肥土壤全氮、碱解氮与不施肥(CK)的差异不显著; 有机肥可显著提高土壤速效钾的含量; NPM 配施土壤耗水量最大为 558.3 mm,水分利用率最高为 31.5 kg/(hm^2 · mm),随着耗水量增加的同时,土壤出现干燥化趋势。

关键词: 黄土高原旱地; 施肥; 养分利用效率; 水分利用效率
中图分类号: S512.1.06　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)06-1333-08

Effects of different fertilization on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau

HE Xiao-yan[1], HAO Ming-de[1,2*], LI Hui-cheng[3], CAI Zhi-feng[1]
(*1 College of Resource and Environment Science, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MOW, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3 College of Forestry Science, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Effects of different fertilization on yield of wheat and soil nutrient and water changes and its use efficiency were studied using a long-term experiment in rainfed lands of the Loess Plateau. The result shows that the best for the yield-increasing in the single applications is the application of the organic compound fertilizer (M), and its output can reach to 5265 kg/ha. The combined applications of organic fertilizer and chemical fertilizer increase the yield of wheat, and the highest yield is 5898.8 kg/ha under the NPM fertilization. Under the NPM combined application, wheat grain and stalk uptake the largest amounts of total N with the increase of 131.4 kg/ha compared to the single application of N fertilizer. The maximum fertilizer utilization is the combined application of organic fertilizer and nitrogen and phosphorus fertilizer, and the nitrogen utilization; nitrogen partial factor productivity, agronomic efficiency and physiological nitrogen utilization are 67.0%, 49.16 kg/kg, 36.97 kg/kg and 73.11 kg/kg. Different fertilization systems reflect the nearly same trend, that is: N < NP < NM < NPM and have the significant differences among the treatments. Soil total nitrogen and available nitrogen are not significant difference between

收稿日期: 2010-01-25　　**接受日期**: 2010-05-13
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-424-3); 国家科技支撑计划(2006BAD05B07 和 2006BAD09B04); 中国科学院重大项目(KSCX1-YW-09-07)资助。
作者简介: 何晓雁(1984—),女,山西省偏关县人,硕士研究生,主要从事土壤-植物养分循环方面的研究。E-mail: hexiaoyan25@yahoo.cn
*通讯作者 Tel: 029-87012399, E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn

under the single application of N fertilizer and CK (no fertilizer), and the organic fertilizer can significantly increase the content of soil available K. In different fertilization systems, the water consumption of the NPM fertilizer can up to 558.3 mm, water use efficiency up to 31.5 kg/(ha · mm), and with the increase of water consumption at the same time, the soil appears dry trend.

Key words: rainfed land of Loess plateau; different fertilization; soil nutrients use efficiency; water use efficiency

黄土高原是我国传统旱作农业区,该区水土流失严重,土壤肥力低下,作物产量低[1]。水分和养分是限制该区农业发展的主要因素,同时水分、养分也是反映该区土壤质量变化的重要指标[2]。上世纪80年代,李玉山等[3]研究证明,旱地农田限制作物产量的主要因素是肥,施肥是提高旱区作物水分利用率,实现增产的主要措施[4-5]。黄土高原地区粮食作物降水生产效率一般 ≤ 3.0 ~ 4.5 kg/(hm^2 · mm),而管理较好的农田则 ≥ 7.5 ~ 10.5 kg/(hm^2 · mm),生产潜力巨大[6]。现阶段,黄土高原区水资源状况仍没有较大的改观,为了获得作物高产,大量施用肥料,从而导致极大浪费;合理施用肥料,提高水肥利用效率,成为该区农业增产节支的主要措施。对于提高旱地水肥利用率的问题,李生秀[7]将其归纳为8个方面:即集水、蓄水、保水、提高水分利用效率、提高灌水利用效率、改善生态环境、重视旱地农业科学研究以及制定有利于发展旱地农业的政策和法规。为此,基于长期定位试验,开展了研究小麦在不同施肥条件下土壤养分和水分的变化,探讨小麦养分和水分的利用效率,以期为完善该区合理培肥土壤技术、增加小麦产量、有效指导农业生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然概况

长期定位试验开始于1984年,地处黄土高原中南部陕西省长武县十里铺村塬地上。多年平均气温9.1 ℃,无霜期171 d;多年平均降水量为584 mm,季节性分布不均,7 ~ 9月降水量占全年降水量的55 %。供试土壤为黄盖黑垆土,田间持水量21 % ~ 24 %,萎蔫湿度9 % ~ 12 %,土壤稳定湿度为15.5 %。地下水埋深60 m以下,是典型的旱作雨养农业区。试验开始时,耕层土壤养分含量为:有机质10.5g/kg,全氮0.57 g/kg,碱解氮37.0 mg/kg,全磷0.659 g/kg,有效磷3.0 mg/kg,速效钾129.3 mg/kg,pH (H_2O)为8.24,属中等肥力水平。2007年7月至2008年6月生育年降水量为658.3 mm,属于丰水年,小麦生长季降水量为453.0 mm,休闲期降水量为205.3 mm。

1.2 试验设计

在长期定位试验的基础上,选择了小麦施肥的6个处理:1)不施肥(CK),2)单施氮肥(N),3)单施有机肥(M),4)氮和磷肥配施(NP),5)氮和有机肥配施(NM),6)氮、磷和有机肥配施(NPM),随机区组设计,3次重复。小区面积6.5 m × 10.3 m。试验所用氮肥为尿素,施用量为N 120 kg/hm^2,磷肥为过磷酸钙,施用量为P 26.4 kg/hm^2,有机肥为厩肥(有机质含量106 g/kg,全氮2.65 g/kg ,碱解氮3.65 mg/kg,有效磷0.11 g/kg),用量75 t/hm^2。

小麦品种为长武134,2007年9月23日播种,2008年6月18日收获,播种量225 kg/hm^2,肥料于播种前撒施后,翻入土中,田间管理同大田。

1.3 测定项目与方法

2007年9月10日和2008年7月2日采集各处理0—400 cm的土壤样品,每20 cm为一层,并用烘干法测定其含水量。取0—20 cm土层样品,自然风干后,分别过1 mm和0.25 mm筛,供养分分析用。

土壤有机质用重铬酸钾外加热法;全氮用凯氏定氮法;碱解氮用碱解扩散法;全磷用酸溶—钼锑抗比色法;速效磷用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾用火焰光度计法测定。测定结果以风干基表示。土壤水分用烘干法(105℃)测定。

相关参数计算公式:

储水量(W) = h × a × b × 10/100

式中:W为土壤储水量(mm);h为土层厚度(cm);a为土壤容重(g/cm^3);b为土壤含水量(%)。

水分利用效率 WUE[8-9] = Y(BM)/ET = Y(BM)/[P + I - (We - Wi)]

式中:ET为蒸散;Y为产量;BM为生物量;P为降雨量;I为灌溉量;Wi为初始土壤含水量;We为期末土壤含水量。

氮肥利用效率 NRE[8-14](%) = (施氮区地上部吸氮量 - 对照区地上部吸氮量)/施氮量 × 100

氮肥偏生产力 NPEP(kg/kg) = 施氮区产量/施氮量;

氮肥农学效率 NAE(kg/kg) = (施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量;

氮肥生理效率 NPE(kg/kg) = (施氮区产量-不施氮区产量)/(施氮区吸氮量-不施氮区吸氮量)。

试验数据采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对小麦产量的影响

长期不同施肥处理小麦增产差异显著。图 1 表明,不施肥对照,小麦产量为 1462.5 kg/hm^2,单施氮肥(N)虽有增产作用,但与对照产量差异不显著;单施有机肥(M)可显著提高产量,比 CK 增产 3802.5 kg/hm^2;比 NP 处理增产 1316.2 kg/hm^2。化肥和有机肥配施均能明显提高产量,NM、NPM 处理增产效应与 N 处理差异达显著水平。可见,只有化肥和有机肥合理配合施用,才能获得最高产量和最佳的经济效益。

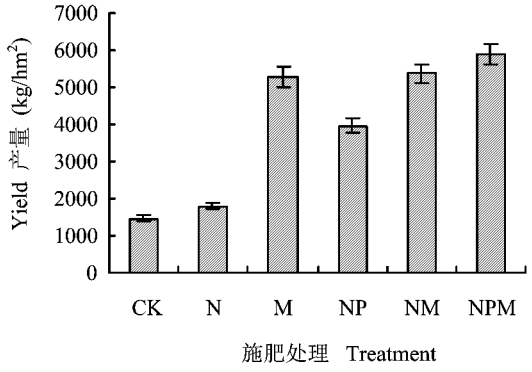

图 1　小麦连作施肥对产量的影响

Fig. 1　Effects of the fertilization on yield in continuous cropping of wheat

2.2 施肥对小麦养分吸收量的影响

2.2.1 施肥对小麦氮吸收量的影响　N 处理小麦子粒和秸秆总吸氮量虽有增加,但与 CK 差异不显著;NP 处理的总吸氮量比 CK 增加了 219.3%,比 N 处理增加了 51.0 %。M 处理的总吸氮量为 156.0 kg/hm^2,NM 处理为 138.4 kg/hm^2,比 M 处理分别减少了 11.2%;而 NPM 处理的总吸氮量比 M 处理增加 10.0%(表 1)。

表 1　小麦连作施肥对养分吸收的影响

Table 1　Effects of the fertilization on nutrient uptake in continuous cropping of wheat

处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg/hm^2)			吸磷量 P uptake (kg/hm^2)			吸钾量 K uptake (kg/hm^2)		
	子粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total	子粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total	子粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total
CK	22.5 d	3.2 d	25.7 e	4.4 d	0.13 d	4.5 d	4.4 d	7.3 d	11.7 e
N	33.6 d	6.5 d	40.1 e	4.3 d	0.16 d	4.5 d	4.8 d	15.5 c	20.3 d
M	130.2 ab	25.8 a	156.0 b	15.1 a	0.74 b	15.8 a	14.5 b	24.9 b	39.4 b
NP	71.2 c	10.7 c	81.9 d	8.2 c	0.47 c	8.7 c	10.2 c	20.5 b	30.7 c
NM	117.2 b	21.2 b	138.4 c	11.4 b	0.7 b	12.1 b	14.4 b	54.7 ab	69.1 ab
NPM	147.9 a	23.6 ab	171.5 a	14.9 a	1.12 a	16.0 a	15.8 a	59.0 a	74.8 a

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at 5% level.

与不施肥相比,N 处理的子粒吸氮量与不施肥间差异不显著,NP 处理比 N 处理增加了 111.9%,单施有机肥的小麦子粒吸氮量为 130.2 kg/hm^2,NM、NP 处理比 M 处理的吸氮量减少了 10.0%、45.3%,而 NPM 处理却增加了 13.6%。

小麦茎秆吸氮量,N 处理与不施肥相比差异不显著,NP 处理比单施 N 增加 4.19 kg/hm^2;M 处理比 NM 处理增加了 21.2%;NPM 与 M 处理差异不显著,而与 NP 处理间差异极显著。

2.2.2 施肥对小麦磷吸收量的影响　表 1 还看出,N 处理会减少小麦子粒和茎秆总吸磷量,NP 处理的总吸磷量比 N 处理增加了 94.41%,NM 处理比 M 处理分别减少了 23.6%,NPM 处理和 M 的差异不显著。

N 处理小麦子粒吸磷量减少,但差异不显著。NP 处理比 N 处理增加了 3.9 kg/hm^2;M 处理子粒的吸磷量比 NM 处理增加了 32.5%;NPM 和 M 处理小麦子粒吸磷量无差异。

N 处理小麦茎秆吸磷量比不施肥仅增加了 0.03 kg/hm^2,几乎没有差异;NP 处理与 N 处理差

异显著；M、NM 处理间差异不显著；NPM 处理小麦茎秆的吸磷量最大，为不施肥的 8.62 倍。

2.2.3 施肥对小麦钾吸收量的影响　单施有机肥的小麦子粒和茎秆总吸钾量增加了 94.8%～236.6%（表1）。NPM 处理总吸钾量达最大值，其吸钾量与其他施肥处理相比，差异显著；NM 处理的总吸钾量比单施氮处理增加了 241.8%，比单施有机肥处理增加了 117.0%，比 NPM 处理减少了 8.1%。

N 处理对小麦子粒吸钾量的影响差异不显著，M 处理的小麦子粒吸钾量比 N 处理增加 9.77 kg/hm^2。NM 比 M 处理减少了 0.7%，比 N 处理增加了 114.1%，NPM 处理为最大值。

茎秆中含钾量较高，是子粒的 2～4 倍。单施氮的小麦茎秆吸钾量增加了 112.7%，NP 处理茎秆的吸钾量比 N 处理增加了 60.7%；单施有机肥比不施肥增加了 241.8%，比单施氮增加了 60.7%，NM、NPM 处理与单施有机肥相比，差异显著，茎秆吸钾量增加了 120.1%～176.8%。

2.3 施肥对小麦肥料利用效率的影响

氮肥利用率（Nitrogen recovery efficiency，NRE）反映了作物对土壤中氮的利用程度，是评价作物对氮素肥料吸收的一个重要指标，又称氮肥回收效率。NP 处理的氮肥利用率与 NM 差异显著，而与 N、NPM 处理的差异达显著水平。表2 表明，单施氮小麦对土壤中氮肥的回收利用效果最小；在施氮量相同的条件下，NP、NM、NPM 处理可大幅度增加氮肥回收效率，增幅为 292.9%、357.3%、461.9%。但是，在长期施肥情况下，氮肥利用率已不能反映其现实状况，所测氮肥利用率偏高，原因是其基数相对偏低[15-16]。

氮肥偏生产力（Nitrogen partial factor productivity，NPFP）指单位投入的肥料氮所能生产的作物子粒产量，是评价肥料效应的适宜指标。NM 处理的氮肥偏生产力与 NP 处理的差异达显著水平，而与 NPM 处理的差异不显著，即在氮和有机肥配施 的基础上，再施磷肥对氮肥偏生产力的影响不会太大，仅增加了 4.47 kg/kg，为单施氮肥的 29.7%。

氮肥农学效率（Nitrogen agronomic efficiency，NAE），是单位施氮量对小麦子粒产量增加的反映，也是评价肥料增产效应较为准确的指标。表2 看出，各处理之间氮肥农学效率差异显著。单施氮处理农学效率仅为 2.84 kg/kg；NP 和 NM 处理，氮肥农学效率是单施氮肥的 7.30 倍和 11.44 倍；NPM 处理农学效率最高，为 36.97 kg/kg，比单施氮处理增加了 120.18%，比 NP 处理增加了 78.4%，比 NM 处理增加了 13.8%。

氮肥生理效率（Nitrogen physiological efficiency，NPE）是作物地上部吸收每千克肥料中的氮所获得的子粒产量的增加量，反映了作物在吸收同等数量氮素时所获得经济产量的效果，是植物体内养分的利用效率。N 处理的氮肥生理利用率与 NPM 的差异显著，仅占 NPM 处理的 32.6%；NPM 处理小麦氮肥生理效率最大，为 73.11 kg/kg，而 NP、NM 处理的氮肥生理效率仅为 NPM 处理的 60.6%、81.5%（表2）。

氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥生理效率在不同施肥中总变化趋势一致，均为 N < NP < NM < NPM，说明要实现高产还需化肥和有机肥配合施用。

2.4 施肥对耕层土壤养分的影响

2.4.1 施肥对土壤有机碳含量的影响　不同施肥处

表2　小麦产量及肥料利用效率

Table 2　The yield of wheat and various nutrient use efficiencies

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm^2)	氮肥利用率 NRE (%)	氮肥偏生产力 NPEP (kg/kg)	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮肥生理效率 NPE (kg/kg)
CK	1462.5 e				
N	1803.8 d	11.93 d	15.03 d	2.84 d	23.84 d
NP	3948.8 c	46.75 c	32.91 c	20.72 c	44.32 c
NM	5362.5 b	54.56 b	44.69 b	32.50 b	59.57 b
NPM	5898.8 a	67.03 a	49.16 a	36.97 a	73.11 a

注（Note）：氮肥（尿素）施用量为 N 120 kg/hm^2 The N rate is N120 kg/ha. NRE—Nitrogen recovery efficiency of applied N；NPEP—Nitrogen partial factor productivity；NAE—Nitrogen agronomic efficiency；NPE—Nitrogen physiological efficiency. 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level.

理后土壤养分变化明显(表 3)。24 年不施肥土壤极度贫瘠,土壤有机碳含量仅为 6.7 g/kg,而各施肥处理的有机碳有不同程度增长。单施氮的土壤有机碳增加了 7.7 %,NP 处理增加了 21.3 %,单施有机肥增加了 40.4 %。NM 处理比单施氮增加了 29.0 %,NPM 比 NP 处理增加了 18.7 %。说明有机肥在培肥土壤方面的作用不容忽视。

2.4.2 施肥对土壤全氮、碱解氮含量的影响　单施氮的土壤全氮含量与不施肥基本相同;NP 比 N 处理的土壤全氮含量显著提高;单施有机肥与 NM 处理的土壤全氮含量达最大值,均为 1.15g/kg。单施有机肥、NM 和 NPM 处理在增加土壤全氮含量方面均有很明显的作用。

单施氮肥的土壤碱解氮含量比不施肥增加了 5.28%,但差异不显著。NP 比 N 处理增加了 20.1%,M 与 NM 处理的碱解氮含量差异不显著,NM 处理的碱解氮含量比 N 处理增加了 62.8%,NPM 处理的碱解氮含量最大为 75.07 g/kg。说明有机肥的施入可增加土壤的氮素,有效改善土壤肥力状况,尤其在速效氮方面有明显的作用。

2.4.3 施肥对土壤全磷、速效磷含量的影响　单施氮的土壤磷素得不到补给,土壤全磷含量减少 10.3 %。单施有机肥的土壤全磷比对照增加了 17.7 %,NP 处理的土壤全磷含量增加显著,达 22.1 %;而 NM 处理的土壤全磷含量比单施有机肥增加了 14.7 %,NPM 处理的全磷含量最大,为不施肥的 1.34 倍。

施肥对速效磷含量的影响极显著。单施氮的土壤速效磷含量比对照减少了 34.7 %,氮磷配施可大幅增加速效磷含量,比不施肥增加了 144.6 %。NPM 较其它施肥处理可显著提高土壤的速效磷含量,促进土壤磷素向有效态转化,比单施有机肥增加 49.1 %,比 NM、NP 处理分别增加了 149.8 %、204.6 %。

2.4.4 施肥对土壤速效钾含量的影响　试验地开始时土壤速效钾的含量较高,长期不施钾肥使土壤钾素得不到补给,逐渐处于亏缺状况。小麦单施氮及氮磷配施处理,其土壤速效钾含量明显降低,分别比对照减少了 12.7%、13.4%。施用有机肥可显著提高土壤速效钾含量,比不施肥增加了 253.9 %;NM、NPM 比 M 处理分别减少了 33.7 %、19.3 %。

表 3 结果说明,长期单施氮不利于土壤养分平衡,氮磷配施有一定的改善土壤养分状况的作用;单施有机肥或有机肥与化肥配施能显著增加土壤中各养分的含量,提高养分有效性,培肥土壤。

表 3　小麦连作施肥的土壤养分变化

Table 3　The change of soil nutrient under the fertilization in continuous cropping of wheat

处理 Treatment	有机碳 Organ. C	全氮 Tot. N	全磷 Tot. P	碱解氮 Avai. N	速效磷 Avai. P	速效钾 Avai. K
	(g/kg)			(mg/kg)		
CK	6.66 c	0.81 c	0.68 b	42.02 c	6.25 d	159.0 d
N	7.17 bc	0.82 c	0.61 b	44.24 c	4.08 d	138.9 d
M	9.35 a	1.15 a	0.80 ab	70.26 a	31.52 b	562.7 a
NP	8.08 b	0.95 b	0.83 a	53.12 b	15.29 c	137.7 d
NM	9.25 a	1.15 a	0.78 ab	72.02 a	18.65 c	373.0 c
NPM	9.59 a	1.13 a	0.91 a	75.07 a	46.58 a	454.4 b

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level.

2.5　施肥对土壤水分的影响

对 0—400 cm 土壤水分的测定结果显示,小麦收获后施肥处理的剩余含水量均小于不施肥的剩余含水量。储水量也比对照少 8.6 ~ 214.3 mm(图 2)。比较 0—400 cm 土壤各层次贮水量的变化可以看出,0—40 cm 土层由于受降水以及大气因素影响较大,施肥处理间有一定差异,但施肥处理的剩余含水量大于对照,且储水量比对照多 22.04 mm。而在 40—200 cm 土层,施肥处理间差异显著,表现出了不同施肥对土壤水分利用的差异。从不同施肥处理的剖面土壤水分分布看出,单施氮的土壤剖面剩余含水量分布与不施肥处理差异不明显,但其剖面贮水量都比对照有所增加。0—400 cm 土层贮水量以单施有机肥处理最低,为 9.7%;单施有机肥处理的 0—400cm 土层剩

余含水量远低于对照,会对下季作物生长发育造成影响。

不同肥料配施可向作物提供较多的营养物质,但对土壤水分的影响也很显著。NP 处理土壤贮水量低于单施氮处理,收获后其剖面平均贮水量为 760.01 mm,而单施氮为 872.52 mm。单施氮作物对土壤水分的利用率有所下降,NP 处理的作物生长状况得到改善,促进作物根系生长发育,加强了对土壤深层水的利用。氮和有机肥配施后,土壤剖面剩余含水量明显低于 N、M 处理,在 0—80 cm 土层,M 和 NM 处理的差异不明显;在 80—200 cm 土层,则 NM 处理比 M 有较大程度地降低。200 cm 土层以下,剩余含水量有增加趋势,但 N、M 处理的增幅不大,NPM 处理有明显的增加趋势,剖面土壤剩余含水量增加 10.0 %。

图 2 还表明,耕层土层由于受降雨以及大气因素影响,小麦播种前耕层土壤剩余含水量较收获后差异明显。以 100cm 土层处变化幅度最大,在 150 cm 土层以下不同施肥处理剖面水分分布基本一致,有逐渐增大趋势。收获后土壤剖面水分分布明显在 80 cm 土层处分为两种情况:一是不施肥和单施氮的处理的剩余含水量较高;另一则是有机肥、有机肥和化肥配施的处理的剩余含水量较低。变化规律均为先减少,达到最低点后逐渐增大,300 cm 土层以下分布趋于一致。可见,不同处理小麦的产量受 0—300 cm 土层土壤剩余含水量的影响,不施肥与单施化肥小麦产量较低,利用土壤水分较少,则土壤剩余含水量较高;相反,单施有机肥或肥料配施产量较高,土壤水分利用较多,则其剩余含水量较低。

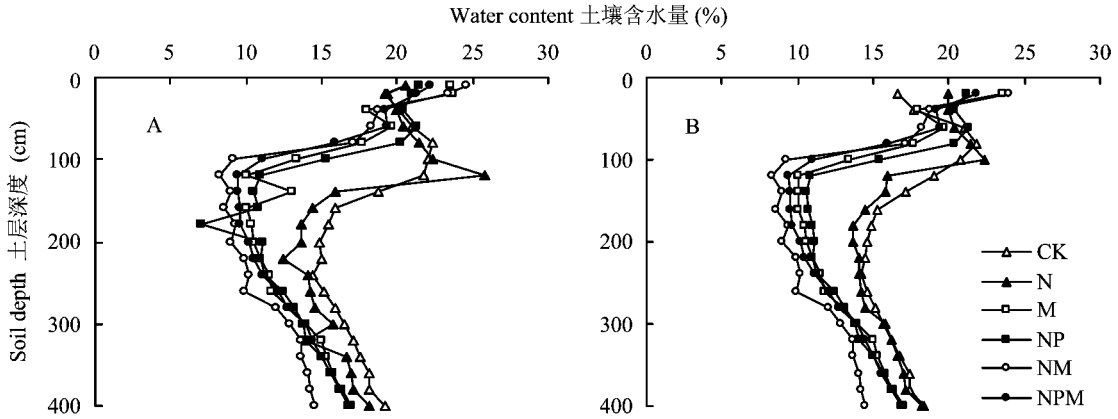

图 2 小麦连作施肥的土壤剖面水分分布

Fig. 2 Soil water contents in the profile under the different fertilizer treatments

[注(Note):A—小麦播种前 Before sowing of wheat;B—小麦收获后 After the wheat harvest.]

2.6 施肥对土壤水分利用效率的影响

表 4 表明,施肥对小麦经济产量和生物产量的影响规律相同。施用有机肥影响最大,化肥配施次之,化肥单施和不施肥最小。长期施用有机肥对于作物产量的提高有非常明显的作用。

单施氮、有机肥处理的土壤水分利用效率均大于对照。单施氮土壤水分利用效率比对照提高了 15.3 %,但差异不显著;而单施有机肥的土壤水分利用效率比对照提高了 196.5 %。说明单施化肥或有机肥都会提高土壤水分利用效率,只是提高的程度不同。

NP 处理比 N 处理水分利用效率有较大提高,NP 处理的土壤水分利用效率比对照提高了 140.0%;NM 处理的土壤水分利用效率最高,比对照提高了 281.2 %,优于 NPM 处理。说明施用有机肥能显著提高小麦的水分利用效率。

3 讨论与结论

1)化肥与有机肥合理配施可增加小麦产量。氮、磷和有机肥配施比不施肥增产 4436.3 kg/hm^2,比氮磷配施增产 1950 kg/hm^2,其增产率为 49.4 %。

2)氮、磷和有机肥配施培肥效果最好,有机碳含量比不施肥增加了 44.0 %;氮磷配施可显著提高土壤的速效磷含量,比单施氮提高了 2.75 倍;长期单施氮的土壤速效钾比不施肥减少了 12.7 %,施用有机肥可显著提高土壤速效钾的含量。这与陈磊[17]等的长期定位试验结果一致。

表 4　小麦连作施肥对土壤水分利用效率变化的影响

Table 4　Effect of the fertilization on water use efficiency in continuous cropping of wheat

处理 Treatment	土壤储水量 Soil water storage		水分亏缺量 Water deficit	耗水量 Water consumption	经济产量 Economic yield	生物产量 Biomass Yield	水分利用效率 WUE kg/(hm²·mm)
	播前 Pre-sowing	收获后 Post-harvest					
	(mm)				(kg/hm²)		
CK	925.8 a	855.3 a	70.5 d	523.5 d	1462.5 d	4436.3 f	8.5 c
N	892.1 b	797.9 b	94.3 c	547.3 c	1803.8 c	5362.5 e	9.8 c
M	717.9 d	573.8 e	144.1 a	597.1 a	5265.0 ab	15042.9 c	25.2 b
NP	750.0 c	639.5 c	110.4 b	563.4 b	3948.8 b	11505 d	20.4 bc
NM	666.9 e	596.4 d	70.5 d	523.5 d	5362.5 ab	16965 b	32.4 a
NPM	685.2 e	579.8 e	105.3 bc	558.3 bc	5898.8 a	17595 a	31.5 a

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at 5% level.

3)关于氮肥利用效率,目前应用较多的指标有氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥生理效率等,从不同的侧面描述了作物对氮肥吸收和利用的程度[18-19];而从提高产量,合理利用肥料的角度来看,氮肥回收效率这一指标具有很大的实际意义[20]。但是,由于小麦的收获部分是子粒,因此除考虑氮肥回收率外,还需要考虑氮肥偏生产力、农学效率或氮肥生理效率,这样才能较准确地反映氮肥在小麦体内的吸收和利用状况。在本试验条件下,NM、NPM 处理间的氮肥偏生产率、氮肥农学效率虽无显著性差异,但 NM 处理的氮肥回收效率却明显低于 NPM 处理。

4)施用有机肥土壤水分利用效率较高,NM 处理的土壤水分利用效率比不施肥提高了 281.2%。魏孝荣等[21]研究表明,在氮、磷、有机肥配施中,水分含量状况为 CK > NP > M > NPM。说明肥料的单施或配施可大大增加作物的生物产量和土壤水分利用率,同时也会增加土壤的耗水量,进而加剧土壤的干燥化程度。即使经 7、8 月的雨季对土壤水分的补充,到播种作物时,施肥处理后的土壤水分仍处于一个较低水平,不能恢复到对照的土壤水分水平。可见,长期施肥对土壤水库容量会有较大影响。

参 考 文 献:

[1] 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学,2002,35(7):848-855.
Shan L. Development trend of dryland farming technologies[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(7): 848-855.

[2] Hayen S R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 211-219.

[3] 李玉山,张孝中,郭民航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报,1990,27(1):1-7.
Li Y S, Zhang X Z, Guo M H. The field experiments on the field-response of crops to water and fertility in the south of the loess plateau[J]. Acta Pedol. Sin., 1990, 27(1): 1-7.

[4] 党廷辉. 施肥对旱地冬小麦水分利用效率的影响[J]. 生态农业研究,1999,7(2):28-31.
Dang T H. Effects of fertilization on water use efficiency of winter wheat in arid highland[J]. Eco-Agric. Res., 1999, 7(2): 28-31.

[5] 张仁陟,李小刚,胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.
Zhang R Z, Li X G, Hu H J. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(3): 221-226.

[6] 徐学选,刘文兆,琚彤军,等. 黄土丘陵区县域尺度农业水资源高效利用探讨[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):105-108.
Xu X X, Liu W Z, Ju T J *et al*. Efficient use of agricultural water resources at county scale in loess hilly region[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2003, 21(4): 105-108.

[7] 李生秀. 中国旱地农业[M]. 北京:中国农业出版社,2004. 24-37.
Li S X. Dryland agriculture in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004. 24-37.

[8] 李韵珠,王凤仙,黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J]. 土壤通报,2000,31(4):150-155.
Li Y Z, Wang F X, Huang Y F. Comparison for various definitions about soil water and nutrient use efficiency[J]. Chin. J. Soil Sci., 2000, 31(4): 150-155.

[9] 王韶唐. 植物的水分利用效率和旱地农业生产[J]. 干旱地区农业研究,1987,(2):67-80.

Wang S T. Plant response to water and dryland farming production [J]. Agric. Res. Arid Areas, 1987, 2: 67-80.

[10] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant Soil, 1981, 58: 177-204.

[11] Cassman K G, Peng S, Olk D C *et al*. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Res., 1998, 56: 7-38.

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

[13] 李方敏,樊小林,陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4): 494-500.
Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 494-500.

[14] Dobermann A. Nitrogen use efficiency—State of the art[R]. Paper of the IFA International Workshop on enhanced-efficiency fertilizers[Z]. Frankfurt, Germany: 2005.

[15] 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 (9): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiencies of major crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45 (9): 915-924.

[16] 赵云英,谢永生,郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15 (6): 1273-1279.
Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Effect of fertilization on fertility and nitrate accumulation of black loessial soil of dry land in Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15 (6): 1273-1279.

[17] 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.
Chen L, Hao M D, Zhang S M *et al*. Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(2): 230-235.

[18] Fan X L, Zhang J P, Wu P. Water and nitrogen use efficiency of lowland rice in ground covering rice production system in south China[J]. J. Plant Nutr., 2002, 25(9): 1855-1862.

[19] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(12): 1456-1461.
Liu L J, Sang D Z, Liu C L *et al*. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36(12): 1456-1461.

[20] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2): 145-152.
Fu J R. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2001, 7(2): 145-152.

[21] 魏孝荣,郝明德,张春霞. 旱地长期施肥对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究,2003,10(1): 95-97.
Wei X R, Hao M D, Zhang C X. Effects of long-term fixed fertilization on soil water[J]. Res. Soil Water Conserv., 2003, 10 (1): 95-97.