灌漠土长期有机配施土壤肥力特征和作物产量可持续性分析

吴科生[1,2]，车宗贤[1,2]，包兴国[1,2]，张久东[1,2]，
卢秉林[1,2]，杨新强[1,2]，杨蕊菊[1,2]

（1.甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所，兰州 730070；
2.农业部甘肃耕地保育与农业环境科学观测实验站，甘肃 武威 733017）

摘要：为揭示长期施用有机肥对灌漠土土壤培肥效果，依托甘肃河西绿洲灌区灌漠土长期定位培肥试验（1988－至今），设计有机肥磷肥配施（MP）、有机无机配施（1/2MN＋P）、氮磷配施（NP）和不施肥（CK）4 个处理，测定其第 31 年和已有的土壤养分和作物产量数据，研究灌漠土长期有机培肥对土壤肥力特征和作物产量的影响。结果表明：有机无机配合施用第 31 年和历年平均值与试验初始值相比，土壤有机质增加 72.5％和 24.9％，土壤全氮增加 72.3％和 25.7％，土壤全钾增加 16.1％和 33.0％；与无肥对照（CK）相比，土壤有机质增加 54.9％和 19.1％；土壤全氮增加 47.3％和 14.9％，土壤全磷增加 73.0％和 15.3％。有机无机配合施用能有效降低土壤 pH。有机无机配施处理第 31 年和逐年平均值与对照（CK）相比，小麦/玉米间作体系产量增加 149.2％和 139.2％，肥料贡献率（FCR）为 0.58，变异系数（CV）为 0.21，可持续性指数（SYI）为 0.61，养分和产量各项指标均达到高优水平。灌漠土长期有机无机配施措施能持续增加灌漠土土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量，降低土壤 pH，提高土壤肥力和肥料贡献率，显著提高小麦/玉米间作体系产量及其稳定性和可持续性。研究结果可为甘肃河西绿洲灌区农田土壤科学培肥和农业可持续发展提供决策依据。

关键词：长期有机培肥；灌漠土；土壤肥力特征；产量稳定性；产量可持续性

中图分类号：S158.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2021)03-0333-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.046

Analysis on Soil Fertility Characteristics and Crop Yield Sustainability of Irrigated Desert Soil with Long-term Organic Fertilization Application

WU Kesheng[1,2], CHE Zongxian[1,2], BAO Xingguo[1,2], ZHANG Jiudong[1,2],
LU Binglin[1,2], YANG Xinqiang[1,2], YANG Ruiju[1,2]

(1.*Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agriculture Science, Lanzhou* 730070; 2.*Gansu Scientific Observing and Experimental Station of Agri-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture, Wuwei, Gansu* 733017)

Abstract: In order to reveal the effect of long-term organic fertilization on soil fertility of irrigated desert soil, based on the long-term fertilization experiment of irrigated desert soil in Hexi oasis irrigation area of Gansu province (1988 to present), four treatments including organic phosphate fertilizer (MP), organic and inorganic NPK (1/2 MN + P), nitrogen and phosphorus (NP) and no fertilizer (CK) were designed. Based on the existing test data of soil nutrient and crop yield and those data measured in the 31st year, the effects of long-term organic fertilization on soil fertility and crop yield in desert soil were studied. The results showed that compared with the initial value of the experiment, the average soil nutrient value of the past years and that in the 31st year of organic-inorganic combined application all increased, which indicted that the soil organic matter increased by 72.5% and 24.9%, soil total nitrogen increased by 72.3% and 25.7%, and soil total potassium increased by 16.1% and 33.0%. Compared with non-fertilizer control (CK), soil organic matter increased by 54.9% and 19.1%, soil total nitrogen increased by 47.3% and 14.9%, and soil total phosphorus increased by 73.0% and 15.3%. Combined application of organic and inorganic fertilizer could effectively reduce soil pH. Compared with CK, the average value of the past years and that in the 31st year of organic-inorganic

收稿日期：2020-12-30
资助项目：国家重点研发计划项目(2018YFC1903700)
第一作者：吴科生(1978－)，男，高级农艺师，主要从事土壤肥料和农业生态研究。E-mail：wukesheng218@163.com
通信作者：车宗贤(1964－)，男，研究员，主要从事土壤肥料农业资源环境研究。E-mail：chezongxian@163.com

combined application showed that the yield of wheat/maize intercropping system increased by 149.2% and 139.2%, fertilizer contribution rate (FCR) was 0.58, coefficient of variation (CV) was 0.21, and sustainability index (SYI) was 0.61. Nutrient and yield indexes all reached high quality level. In Hexi oasis irrigation area, Gansu province, long-term combined application of organic and inorganic could continuously and significantly increase the contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium, reduce soil pH and increase soil fertility and the contribution rate of fertilizer. It could significantly improve the yield, stability and sustainability of wheat/maize intercropping system. This study could provide decision-making basis for scientific fertilization of farmland soil and sustainable development of agriculture in Hexi Oasis Irrigation Area of Gansu Province.

Keywords: long-term organic and inorganic fertilization; irrigated desert soil; soil fertility characteristics; yield stability; yield sustainability

土壤肥力是农业可持续发展的基本要素,土壤培肥是维持土壤肥力水平、提高土壤质量、建立科学施肥制度和增加作物产量必不可少的农业措施[1-2]。有机肥是培肥土壤的传统方式,从提高土壤肥力、充分利用资源、保护环境等各方面考虑,有机无机配施是实现土壤可持续利用的科学施肥方式[3]。但近年来我国有机肥施用在逐年减少,导致土壤质量和综合生产能力下降[4]。为增强农业可持续发展能力,国家大力推行有机肥替代化肥等绿色生产方式。因此,有机无机配施对提高土壤肥力实现可持续发展意义重大。关于有机配施对土壤养分和作物产量的影响有大量报道,有机无机配施既能培肥不同类型的土壤,减少化肥施用量,又能提高土壤有机质、全量养分及速效养分含量,增加土壤碳、氮储量[5-10];能提高肥料利用率[11];能更有利于维持玉米产量的稳定性及生产可持续性[12-13]。Yang 等[14]通过 33 年的小麦－玉米轮作试验表明,试验初期有机无机配施对产量没有显著影响,而随着时间的延长其增产效益显著。

灌漠土是甘肃河西绿洲灌区主要土壤类型,是保障甘肃粮食安全重要的农业生产要素之一。不同施肥措施对灌漠土土壤养分、作物产量影响等短期研究开展较多,但长期连续有机配施后灌漠土养分演变规律和土壤肥力特征尚不清楚,作物产量的稳定性和可持续性亟待澄清。长期定位施肥试验具有时间的长期性、气候的重复性等特点,能够系统地揭示土壤肥料演变规律及作物产量的变化,为施肥制度合理性的评价提供理论依据。本研究利用 1988 年布置的长期定位试验,在较长时间尺度上研究了长期连续有机培肥灌漠土土壤有机质、全氮、全磷、全钾以及速效养分等肥力指标的演变规律和肥料贡献率,揭示了灌漠土长期有机培肥的土壤肥力特征,分析了作物产量稳定性和可持续性及其影响机制,可为甘肃河西绿洲灌区农田土壤科学培肥和农业可持续发展提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验始设于 1988 年,试验地位于甘肃省武威市凉州区永昌镇白云村(38°37′N,102°40′E),海拔 1 504 m,年均气温 7.7 ℃,无霜期 150 天左右,年均降水量 150 mm,年均蒸发量 2 021 mm。日照时间 3 028 h,相对湿度 53%,≥10 ℃的有效积温 3 016 ℃,年太阳辐射总量 140～158 kcal/cm^2,麦收后≥10 ℃的有效积温为 1 350 ℃。属典型的 2 季不足、1 季有余的自然生态区。区内蒸发量大,降水量少,且主要集中在 6—9 月,降水可利用率较低。灌溉水源为地下水(井灌)。试验地土壤为石灰型灌漠土,表土质地为轻壤,开始时耕层(0—20 cm)土壤 pH 为 8.8,有机质含量 16.35 g/kg,全氮含量 1.06 g/kg,全磷含量 1.505 g/kg,全钾含量 17.6 g/kg,碱解氮含量 64.47 mg/kg,有效磷含量 13.1 mg/kg,速效钾含量 180.0 mg/kg,土壤容重 1.40 g/cm^3。

1.2 试验设计

长期定位试验采用随机区组设计,共设 13 个处理。本研究选用其中 4 个处理:(1)有机肥磷肥配施(MP);(2)有机无机配施(1/2MN＋P);(3)氮磷配施(NP);(4)空白对照(CK)。M 指有机肥,用量 60 000 kg/hm^2,N 指纯氮肥,用量 375 kg/hm^2,P 为 P_2O_5,用量 150 kg/hm^2,1/2MN 指 M 和 N 用量都各减 1/2。试验小区长 6.9 m,宽 4.5 m,小区面积 31.05 m^2。各处理的肥料用量均为每年总用量,所用有机肥为牛粪(含有机质 180～220 g/kg,全氮 1.78～2.05 g/kg,全磷 1.83～2.58 g/kg,全钾 23.1～30.0 g/kg),在播种前先将农家肥粉碎后翻压在 30 cm 的耕作层内,所用有机肥全部作基肥;氮肥为尿素,其中 20%在小麦播种前结合整地施入土壤耕层,20%在小麦拔节期追施,30%在玉米拔节期追施;30%在玉米灌浆期追施;磷肥采用过磷酸钙,除对照不施磷肥外,其余处理全

部作基肥一次性施入耕层。

1.3　试验方法

栽培作物为小麦和玉米。播种、除草、配药、收获等农事均为人工操作。小麦品种为“武春 121”或“陇春”系列,3 月中旬播种,行距 12 cm,播种量为 600 kg/hm^2,4 月中上旬出苗,7 月中旬收获;玉米品种为“中单”系列或“武科 2 号”,4 月下旬覆膜播种,株距 20 cm,行距 40 cm,5 月初出苗,10 月收获。

种植模式为:1988 年开始时,以小麦－玉米－小麦/玉米间作为 1 个轮作种植周期进行种植。1999 年开始至今,全部采用小麦/玉米间作的种植模式。小麦/玉米间作种植模式,采用的带幅宽 1.5 m,每小区设 3 个小麦玉米组合种植带,中间 1 个组合种植带为取样和测产带。采用传统的 6∶2 高产栽培模式,即小麦带宽 70 cm,种 6 行小麦,玉米带 80 cm,种 2 行玉米。全生育期小麦、玉米共灌水 6～7 次。

1.4　样品采集与处理

2018 年 10 月作物收获时,各小区取中间 1 带作为小麦玉米测产带单打单收,在另外 2 个带幅中选取生长均匀植株作为考种样品,小麦选取 20 株,玉米选取 10 株。风干后分别测定小麦、玉米的农艺性状。

2018 年 10 月玉米收获后采集土壤样品,每小区随机选取 5 个取样点,分别采集 0－20 cm 土层的混合土样,风干、混匀后,过 0.25 mm 筛,用于土壤养分分析。

有机质采用重铬酸钾氧化－油浴加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采取氢氧化钠熔融法测定,全钾采用氢氧化钠熔融法测定,有效磷采用 Olsen 法测定,速效钾采用乙酸铵浸提火焰光度法测定,具体方法参照文献[15]。

1.5　数据计算与处理

肥料贡献率(fertilizer contribution rate,FCR,%)指施用肥料增加的作物产量占总产量的百分比,反映了年投入肥料的生产能力[16]。计算公式为:

$$FCR=\frac{(Y-Y_0)}{Y}\times 100 \quad (1)$$

式中:Y 为施肥区作物产量(kg/hm^2);Y_0 为无肥区作物产量(kg/hm^2)。

产量稳定性以统计学上的变异系数(coefficient of variation,CV,%)表示,可衡量年际间产量的变异程度,CV 越大,则说明产量稳定性越低。计算公式[17]为:

$$CV=\frac{\sigma}{\overline{Y}}\times 100 \quad (2)$$

式中:σ 为标准差 (kg/hm^2);$\overline{Y}$ 为平均产量(kg/hm^2)。

产量可持续性采用可持续产量指数 SYI(sustainable yield index,%)来表征,指数越高,则说明该系统的可持续越好。计算公式[18]为:

$$SYI=(\overline{Y}-\sigma)/Y_{max}\times 100 \quad (3)$$

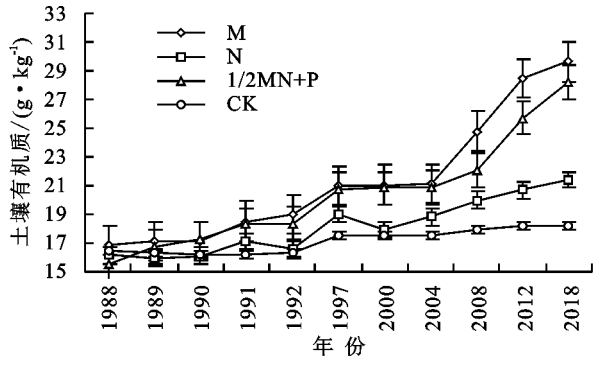
式中:Y_{max} 为所有年份中产量的最大值(kg/hm^2)。

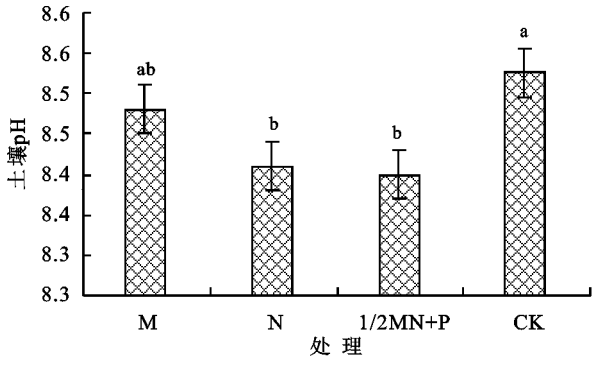
采用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行整理和计算,SAS 8.0 统计软件对数据进行统计分析。文中历年平均值为 1988—2018 年逐年的算数平均值。

2　结果与分析

2.1　长期有机无机配施对土壤肥力的影响

2.1.1　土壤有机质和土壤 pH　土壤有机质随着施用年限的延长逐年增加的趋势明显(图 1)。MP 最高,1/2MN＋P 次之且高于 NP,CK 最低。2018 年(第 31 年)MP、1/2MN＋P、NP、CK 土壤有机质含量比试验初始值分别提高 81.0%,72.5%,30.9%,11.3%。MP、1/2MN＋P、NP 处理较 CK 分别增加 62.6%,54.9%,17.6%。各处理历年平均值(表 1)较试验初始值分别增加30.5%,24.9%,11.1%,4.8%,较 CK 分别增加 24.5%,19.1%,6.0%。MP 和 1/2MN＋P 之间差异不显著,但二者与 NP、CK 分别显著。2018 年土壤 pH 的变化为 CK＞MP＞NP＞1/2MN＋P。NP、1/2MN＋P 与 CK 差异显著。长期施肥降低了灌漠土土壤 pH,其中有机无机配施降低幅度最大。





注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1　不同施肥处理土壤有机质和 pH 变化

2.1.2 土壤全氮和碱解氮含量 土壤全氮含量随施用年限的延长逐年增加(图 2)。MP 最高,1/2MN+P 次之且高于 NP、CK。2018 年(第 31 年)MP、1/2MN+P、NP、CK 土壤全氮含量比试验初始值分别提高 92.5%,72.3%,22.6%,17.0%,MP、1/2MN+P、NP 较 CK 分别增加 64.5%,47.3%,4.8%。各处理历年平均值(表 1)较试验初始值分别增加 32.0%,25.7%,10.3%,9.5%,较 CK 分别增加 20.6%,14.9%,0.8%。MP 和 1/2MN+P 之间差异不显著,但二者与 NP、CK 差异显著。

土壤碱解氮含量年际间变异较大(图 2)。2004 年以后,MP 和 1/2MN+P 土壤碱解氮含量逐年增加。2018 年(第 31 年)MP、1/2MN+P、NP、CK 土壤碱解氮含量比试验初始值分别提高 119.6%,92.0%,14.5%,7.1%。MP、1/2MN+P、NP 较分别增加 105.1%,79.3%,6.9%。各处理历年平均值(表 1)较试验初始值分别增加34.4%,30.2%,14.9%,10.7%,较 CK 分别增加 21.4%,17.6%,3.8%,MP 与 NP、CK 差异显著。

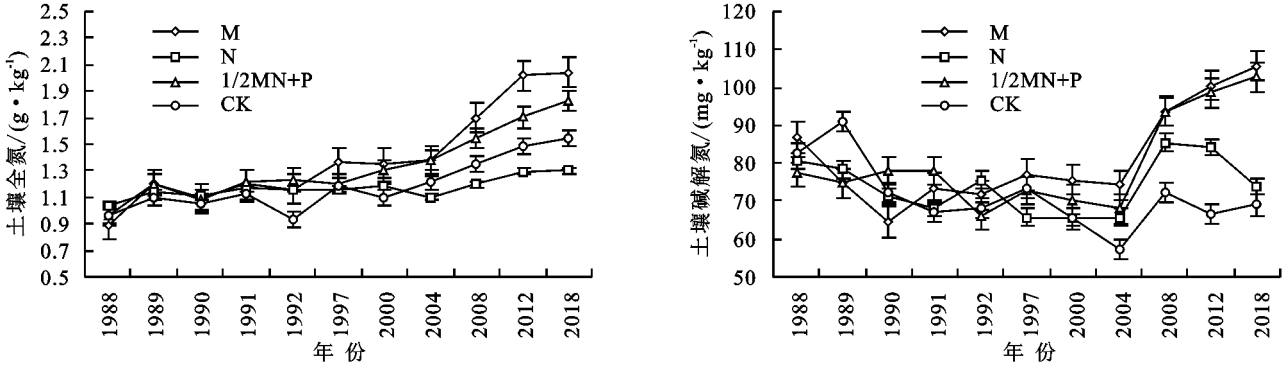


图 2 不同施肥处理全氮和碱解氮含量变化

2.1.3 土壤全磷和有效磷含量 土壤全磷含量随施用年限的延长先增加后降低,2004 年出现拐点(图 3)。MP 最高,1/2MN+P 次之且高于 NP,CK 最低。与试验初始值相比,2018 年(第 31 年)MP 提高 9.6%,1/2MN+P、NP、CK 分别降低 10.7%,32.7%,48.4%。MP、1/2MN+P、NP 较 CK 分别增加 112.4%,73.0%,30.5%。各处理历年平均值(表 1)与试验初始值相比,MP、1/2MN+P 分别增加 11.9%,5.3%,NP 和 CK 分别降低 3.9%,8.7%,与 CK 相比,各处理分别增加 22.5%,15.3%,5.3%。MP 和 1/2MN+P 差异不显著,二者与 NP、CK 差异显著。

长期不同施肥土壤有效磷含量在年际间变化不大(图 3)。MP、1/2MN+P 高于 NP、CK。2018 年(第 31 年)MP、1/2MN+P、NP 土壤有效磷含量比试验初始值分别提高 1 338.2%,703.6%,102.5%,CK 降低 70.0%。MP、1/2MN+P、NP 较 CK 分别增加 4 689.8%,2 576.3%,574.6%。各处理历年平均值(表 1)较试验初始值分别增加 397.0%,213.3%,14.2%,−9.4%,较分别增加 372.2%,192.3%,26.1%。MP 与 NP 和 CK 差异显著。

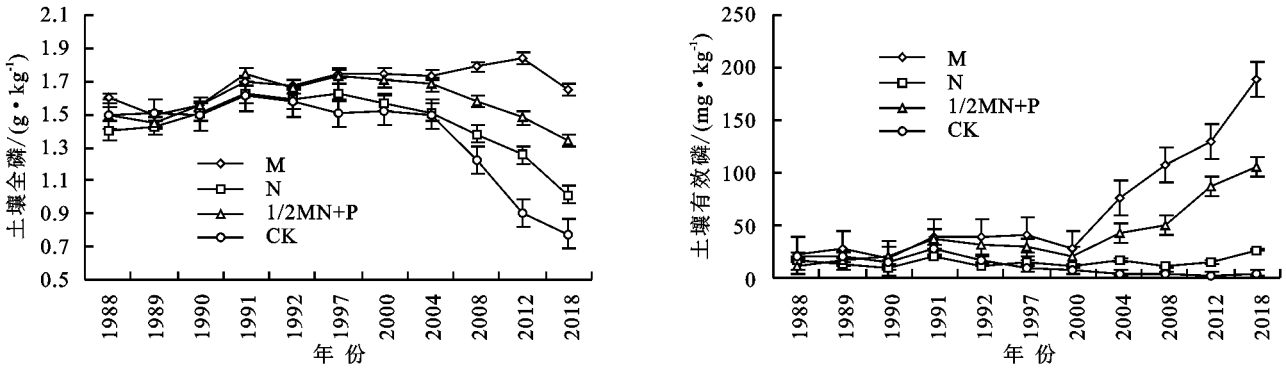
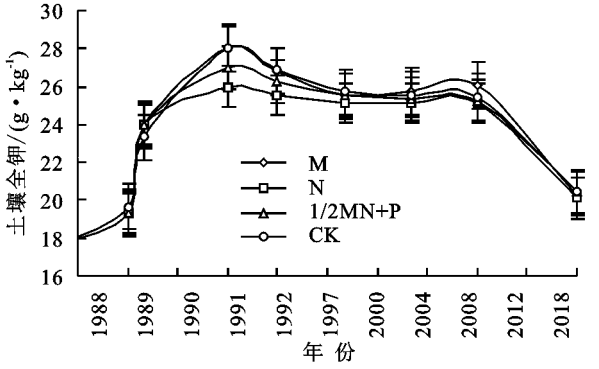


图 3 不同施肥处理全磷和有效磷含量变化

2.1.4 土壤全钾和速效钾含量 土壤全钾含量前 10 年逐年增加,1997 年之后的 15 年保持相对稳定,2012 年后有下降趋势(图 4)。不同处理在年际间变化基本一致。2018 年(第 31 年)MP、1/2MN+P、NP、CK 土壤全钾含量比试验初始值分别提高 15.2%,16.1%,14.2%,16.1%。MP、NP 较 CK 分别降低 0.8%,1.6%。各处理历年平均值(表 1)较试验初始值分别增加 34.6%,33.0%,31.3%,34.2%,MP 较 CK 增加 0.3%,NP、1/2MN+P 较 CK 分别降低 2.2%,0.9%。MP 和 CK 之间差异不显著,但二者与 NP 差异显著。

土壤速效钾含量年际间变异较大(图 4)。各处理大小关系为 MP>1/2MN+P>CK>NP。2018 年(第 31 年)土壤速效钾含量与试验初始值相比,MP、1/2MN+P 分别增加 173.5%,60.4%,NP、CK 分别降低 52.0%,

29.8%。MP、1/2MN＋P 较 CK 分别增加 289.7%，128.5%，NP 较 CK 降低 31.7%。与试验初始值相比，MP、1/2MN＋P 历年平均值(表 1)分别增加 91.6%，29.7%，而 NP、CK 分别降低 28.7%，17.9%，MP、1/2MN＋P 较 CK 分别增加 133.4%，58.0%，NP 较 CK 降低 13.1%。MP 与其他处理差异显著。



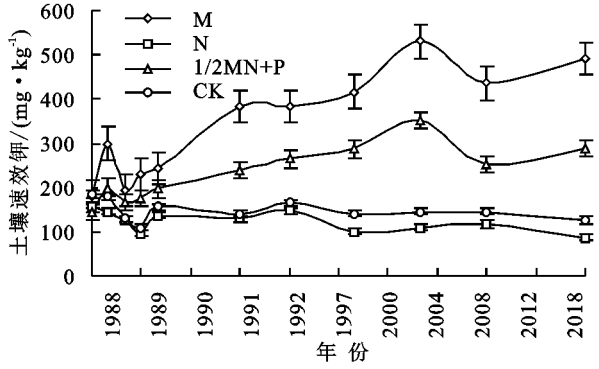


图 4　不同施肥处理全钾和速效钾含量变化

表 1　不同施肥处理土壤养分历年平均含量

处理	有机质/(g·kg⁻¹)	全氮/(g·kg⁻¹)	全磷/(g·kg⁻¹)	全钾/(g·kg⁻¹)	碱解氮/(mg·kg⁻¹)	有效磷/(mg·kg⁻¹)	速效钾/(mg·kg⁻¹)
MP	21.34±4.47a	1.40±0.37a	1.68±0.10a	23.69±3.69a	86.68±23.71a	56.02±21.18a	334.03±122.97a
1/2MN＋P	20.42±3.85a	1.33±0.26a	1.58±0.13a	23.42±3.39ab	83.93±20.26ab	34.68±26.18ab	228.01±62.14b
NP	17.98±1.69b	1.17±0.08b	1.45±0.18b	23.10±3.18b	74.06±7.37bc	14.97±4.89bc	128.34±23.36c
CK	17.14±0.83b	1.16±0.16b	1.37±0.28c	23.62±3.59a	71.38±8.99c	11.86±8.94c	147.78±22.74c

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2　长期有机无机配施对作物产量的影响

2.2.1　小麦/玉米间作体系小麦产量　从图 5a 可知，1988 年、1992 年、1996 年、1999－2018 年为小麦/玉米间作体系小麦产量，1989 年、1993 年、1995 年为单作小麦产量。随着试验年限延长小麦产量稳中有降。1/2MN＋P 最高，MP 次之且高于 NP，CK 最低。2018 年(第 31 年) MP、1/2MN＋P、NP、CK 小麦产量比试验初始值分别降低 32.6%，15.5%，50.3%，84.1%。MP、1/2MN＋P、NP 较 CK 分别增加 437.7%，558.1%，295.8%。各处理历年平均值(表 2)较试验初始值分别降低 21.6%，8.6%，18.9%，52.2%，较 CK 分别增加 107.8%，136.6%，114.6%。1/2MN＋P 与 MP、NP、CK 差异显著。

2.2.2　小麦/玉米间作玉米产量　从图 5b 可知，1988 年、1992 年、1996 年、1999－2018 年为小麦/玉米间作体系玉米产量，1990 年、1994 年、1998 年为单作玉米产量。随施用年限延长玉米产量先降低后稳中有升。各处理玉米产量高低顺序为 NP＞1/2MN＋P＞MP＞CK。2018 年(第 31 年) MP、1/2MN＋P、NP、CK 玉米产量比试验初始值分别增加 193.4%，47.2%，7.4%，128.4%。MP、1/2MN＋P、NP 较 CK 分别增加 102.5%，106.0%，94.3%。从历年平均值(表 2)来看，MP、1/2MN＋P、CK 较试验初始值分别增加 63.4%，8.4%，53.9%，NP 降低 9.8%，较 CK 分别增加 67.5%，142.3%，125.2%。NP、1/2MN＋P 与 MP、CK 差异显著。

2.2.3　小麦/玉米间作体系产量　长期有机无机配施小麦/玉米间作体系产量与玉米产量变化大致相同(图 5c)。间作体系产量高低顺序为 NP＞1/2MN＋P＞MP＞CK。2018 年(第 31 年) MP、1/2MN＋P、CK 处理体系总产量比试验初始值分别增加 69.2%，24.0%，0.4%，NP 降低 10.9%。MP、1/2MN＋P、NP 处理较 CK 分别增加 134.5%，149.2%，113.5%。从历年平均值(表 2)来看，只有 MP 较试验初始值增加 10.3%，NP、1/2MN＋P、CK 分别降低 16.4%，2.9%，18.2%，较 CK 分别增加 87.5%，145.7%，139.3%。NP、1/2MN＋P 与 MP、CK 差异显著。

2.3　长期有机无机配施肥料贡献率和作物产量稳定性、可持续性

在小麦/玉米间作体系中，对小麦的 FCR 以 1/2MN＋P最高，其次为 NP，MP 最低；对玉米和间作体系的 FCR 大小关系均为 NP＞1/2MN＋P＞MP，MP 对玉米和间作体系的 FCR 为 0.40 和 0.47，而 NP 和 1/2MN＋P 均在 0.56～0.59。不同作物和种植模式下，作物产量的稳定性(CV)不同(表 3)。小麦产量的 CV 关系为 MP＜1/2MN＋P＜NP＜CK，说明 MP、1/2MN＋P 的小麦产量稳定性优于 NP，均显著小于 CK。玉米产量的 CV 大小关系为 NP＜1/2MN＋P＜MP＜CK，MP 和 CK 变异系数接近且最大，显著高于其他处理；在小麦/玉米间作体系产量的 CV 大小关系为 MP＞CK＞1/2MN＋P＞NP，其值介于 0.21～0.27，说明整个体系的产量稳定性较强。可持续性指数(SYI)在不同作物上差异显

著(表 3)。小麦各处理 SYI 的平均值大小顺序为 MP>1/2MN+P>NP>CK,MP 最高,为 0.45,说明 MP 对小麦产量可持续性影响较大;玉米各处理 SYI 的平均值大小顺序为 NP>1/2MN+P>MP>CK,说明单施化肥玉米产量可持续性最强(0.52);小麦/玉米间作体系产量 SYI 的平均值大小顺序为 NP>1/2MN+P>MP>CK,NP 和 1/2MN+P 的 SYI 均>0.55,说明在体系中产量可持续性最好。

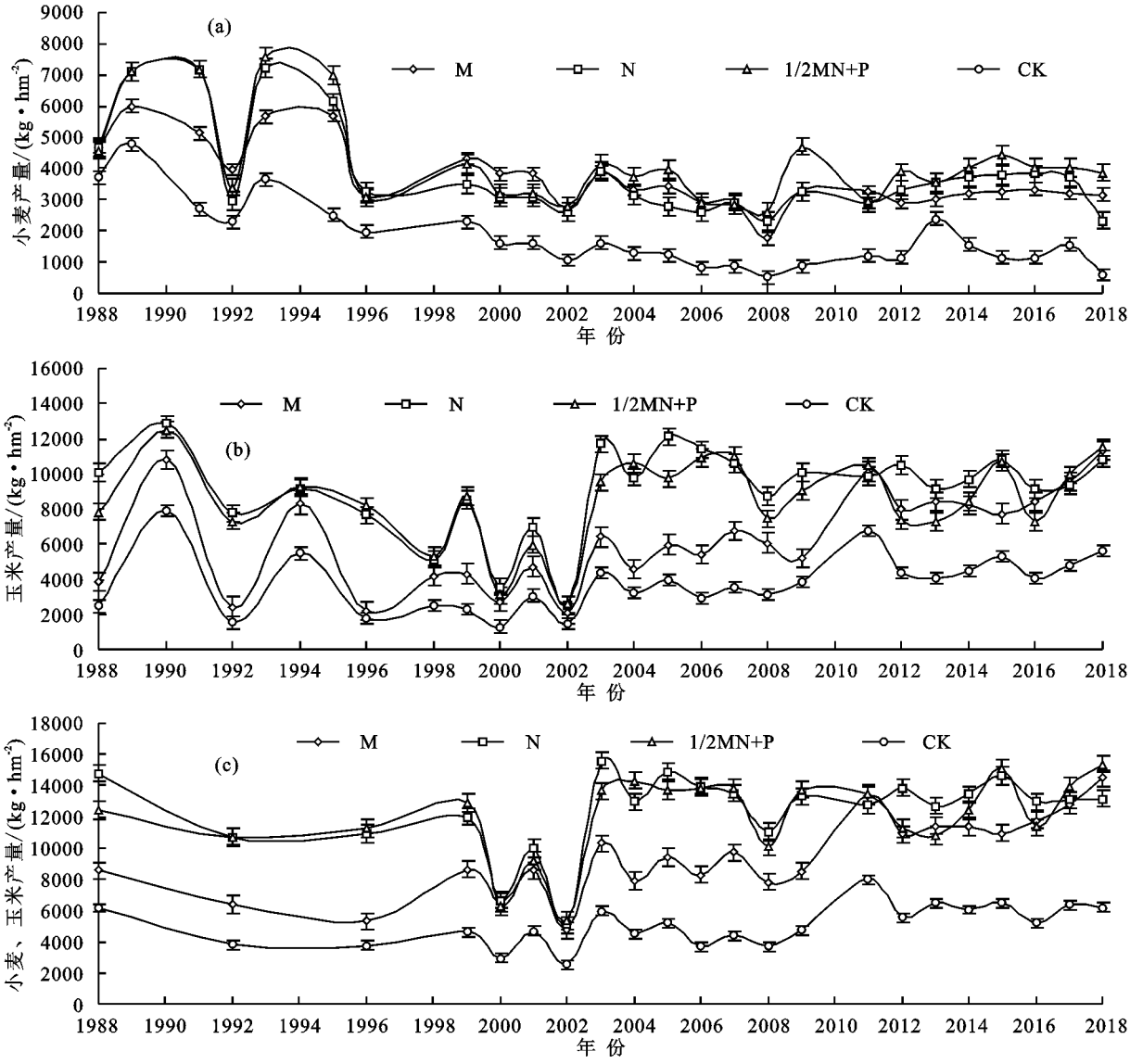


图 5 不同施肥处理对作物产量的影响

表 2 不同施肥处理小麦、玉米历年平均产量

单位:kg/hm²

处理	小麦	玉米	小麦玉米总和
MP	3683.5±1016b	6300.8±2720b	9434.4±2553b
1/2MN+P	4194.5±1437a	8471.9±2452a	12042.3±2603a
NP	3803.9±1463b	9116.0±2483a	12363.1±2547a
CK	1772.5±1037c	3761.9±1644c	5031.8±1339c

3 讨 论

3.1 长期有机无机配施对土壤肥力的影响

第 31 年和历年平均值变化规律一致表明,不论施肥与否,土壤有机质、全氮和碱解氮含量比 30 年前平均分别提高 4.8%~30.5%,9.5%~32.0%,10.7%~34.4%;与 CK 相比,MP 和 1/2MN+P 均能显著提高土壤有机质、全氮和碱解氮含量,其中 MP 处理 SOM、TN、AN 平均分别增加 24.5%,20.6%,21.4%,1/2MN+P 平均分别增加 19.1%,14.9%,17.6%。MP 培肥效果优于 1/2MN+P,而长期施用化肥和不施肥处理土壤有机质基本保持稳定状态,此研究结果与其他研究[8,19]结论一致。唐继伟等[20]利用 8 年长位试验表明,有机肥培肥效果优于化肥,且随施肥量的增加持续提高了土壤养分库容量,化肥处理处于一个相对稳定的水平。灰漠土长期配施有机肥土壤有机质增加了 38.3%[19],原因是单施化肥和不施肥处理的土壤有机碳主要来源于作物根茬、土壤中小动物以及土壤微生物活动等,无人为措施向土壤输入外源有机物料,因此土壤有机质含量存在下降的风险。MP 和 1/

2MN+P 土壤全氮和碱解氮含量显著高于单施化肥和不施肥处理,可能是化肥氮施入土壤后容易发生挥发和硝酸盐淋失[21],没有被作物及时吸收利用,造成氮素损失,氮肥利用率下降。

表 3　施肥对作物产量稳定性、可持续性和肥料贡献率的影响　　单位:%

处理	小麦			玉米			小麦玉米体系		
	CV	SYI	FCR	CV	SYI	FCR	CV	SYI	FCR
M	27.6	44.5	51.9	43.2	31.7	40.3	27.1	47.5	46.7
1/2MN+P	34.3	36.3	57.7	28.9	48.2	55.6	21.6	61.4	58.2
NP	38.5	32.3	53.4	27.2	51.6	58.7	20.6	62.9	59.3
CK	58.5	15.4		43.7	26.9		26.6	46.4	

有机肥磷肥配施土壤全磷、有效磷含量比 30 年前平均分别提高 11.9%,327.6%,其他处理平均降低 3.9%～8.7%。与 CK 相比,MP 平均分别增加 22.5%,372.2%,1/2MN+P 平均分别增加 15.3%,192.3%,而长期单施化肥则导致土壤全磷含量下降 4.0%左右,而且土壤有效磷含量也处于相对较低状态。魏猛等[22]35 年长期定位试验结果表明,MNPK 处理土壤有效磷较 CK 提高 16.13 倍。原因可能是石灰性土壤中 $CaCO_3$ 含量较高,有效磷施入土壤后易被 Ca^{2+} 固定而转化为缓效态磷,有机肥在转化过程中产生有机酸等物质,可减少对有效磷酸盐的固定,促进无机磷的溶解[23]。本研究中除 CK 外其他处理化学磷肥施用量相同,但只有 MP 土壤全磷含量随着试验年限的延长而增加,这说明施用有机肥增加了土壤有机质,在其转化过程中减少土壤对有效磷酸盐的固定,促进了无机磷的溶解。后期各处理土壤磷素含量降低,可能是该试验磷肥投入量不变,随着作物产量的增加,磷素携出量增大而导致土壤磷素含量有下降趋势,但目前土壤磷素水平仍处于丰富状态。

土壤全钾含量前 10 年逐渐增加,之后的 15 年保持相对稳定,2012 年以后降低。第 31 年和历年平均值变化规律一致表明,不论施肥与否土壤全钾含量比 30年前平均提高 31.3%～34.6%;所有处理土壤全钾含量与 CK 持平或略有下降。MP、1/2MN+P 土壤速效钾含量比 30 年前提高 26.7%～85.6%,NP 和 CK 降低 17.9%～28.7%;MP、1/2MN+P 均能持续显著提高土壤速效钾含量,分别增加 126.0%～289.7%,54.3%～128.5%。可见,MP、1/2MN+P 均能增加土壤全钾、速效钾含量 26.0%以上,而长期单施化肥则会导致土壤全钾和速效钾含量下降。本试验实施中不施用外源化学钾肥,随着作物产量的增加,钾素携出量较大是后期土壤钾素含量降低的主要原因。特别是不施肥或单施化肥处理没有钾素补充,降低更为明显,而有机无机配施对钾素有输入,降幅相对较小。

3.2　长期有机无机配施对作物产量的影响

本研究结果表明,随着试验年限的延长,小麦产量较试验初始值呈下降趋势。从历年平均值看,MP 降幅为 21.6%,1/2MN+P 小麦产量降幅度最小。本研究结果与其他研究结果一致,林治安等[24]报道,有机肥替代 50%化肥可以获得与单施化肥相同的小麦、玉米产量,100%有机肥处理在开始 15 年作物产量均低于单施化肥。主要原因是小麦生育期较短,有机肥施入土壤后养分释放缓慢,不能满足小麦生长发育所需养分,出现脱肥现象,其次是近年来小麦收获前遇到干热风等极端气候较多,造成小麦灌浆后期生长受阻。相反,玉米产量只有 NP 较试验初始值下降 9.8%,其他处理都增加,MP 增幅最大,为 63.4%,主要原因是玉米生育期较长,有机肥施用后期养分释放量较大,能够满足玉米生长的养分需要。小麦/玉米间作体系总产量只有 MP 比试验初始值增加 10.3%。年际间小麦和玉米籽粒产量有较大波动,原因可能与气候、倒伏、作物品种、病虫害等因素有关,在河西绿洲灌溉农业区,影响小麦产量的主要因素是小麦灌浆后期到成熟期的干热气温,会严重降低小麦产量。而导致该地区玉米减产的主要因素是倒伏和红蜘蛛、玉米螟等虫害。

3.3　长期有机无机配施肥料贡献率和作物产量的稳定性、持续性

作物产量是衡量肥效的一项重要指标。各处理对小麦、玉米的肥料贡献率(FCR)以 1/2MN+P 和 NP 最高,分别为 57.7%和 58.7%,而 MP 最低,分别为 51.9%和 40.3%,可能是 MP 养分释放缓慢,在作物生长前期未能满足氮素需要。作物产量稳定性(CV)可以判断农田生态系统质量好坏。门明新等[25]研究表明,有机无机配施最有益于维持小麦产量的稳定性和生产可持续性。与本研究结果一致,小麦产量稳定性最差的是 CK,原因是作物长势较弱,更容易受干旱、干热风等极端气候的影响,产量波动较大。其他处理 CV 在 0.28～0.39,MP 或 1/2MN+P 小麦产量稳定性较好。玉米产量稳定性最好的是 NP,为 0.27,原因可能是玉米后期会出现脱肥现象。产量可持续性(SYI)用来衡量农田生态系统生产持续能力。SYI 值＞0.55 的产量可持续性为“较好”,0.45～0.55 为“一般”,＜0.45 为“较差”[18]。本研究结

果是,小麦 SYI 以 MP 处理最高,为 0.45;玉米 SYI 以 NP 处理最高,为 0.52,可持续性一般;小麦/玉米间作体系中,NP 和 1/2MN+P 的 SYI 分别为 0.63 和0.61,可持续性较好。说明 NP 和 1/2MN+P 是小麦/玉米间作体系作物产量保持可持续性最好的措施。

4 结 论

长期有机无机配施能显著提高土壤有机质、全氮、碱解氮含量,增幅达 15.0%以上,能有效降低土壤 pH,持续提升土壤肥力,而长期单施化肥灌漠土土壤有机质基本持平或略有下降。有机肥磷肥配施能显著提高土壤全磷和有效磷含量,增幅达 12.0%以上,而长期单施化肥则导致土壤全磷、全钾含量下降,有效磷、速效钾含量也处于相对较低水平。从土壤有机质和 N、P、K 综合考虑,有机无机配施能显著提高土壤肥力。长期有机无机配施能增加小麦/玉米间作体系产量。以小麦/玉米间作体系来分析,长期有机无机配施肥料贡献率和作物产量均为最高,且能显著提高作物产量及其稳定性和可持续性。

参考文献:

[1] 赵秉强.施肥制度与土壤可持续利用[M].北京:科学出版社,2012:451-455.

[2] 黄东风,王利民,李卫华,等.培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J].中国生态农业学报,2014,22(2):127-135.

[3] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.

[4] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.

[5] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China [J]. Soil and Tillage Research,2016,156:140-147.

[6] 查燕,武雪萍,张会民,等.长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4649-4659.

[7] 夏文建,王萍,刘秀梅,等.长期施肥对红壤旱地有机碳、氮和磷的影响[J].江西农业学报,2017,29(12):27-31.

[8] 许咏梅,刘骅,王西和.长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J].中国生态农业学报,2016,24(2):154-162.

[9] 邹文秀,梁尧,郝翔翔,等.黑土颗粒有机碳和氮含量对有机肥剂量响应的定量关系[J].土壤,2016,48(3):442-448.

[10] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7):91-99.

[11] 鲁艳红,廖育林,周兴,等.长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J].土壤学报,2015,52(3):597-606.

[12] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.长期不同施肥对对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4790-4799.

[13] 陈欢,曹承富,孔令聪,等.长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J].中国农业科学,2014,47(13):2580-2590.

[14] Yang J, Gao W, Ren S R. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. Soil and Tillage Research,2015,151:67-74.

[15] 鲍士旦.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业出版,2000.

[16] 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(9):3997-4007.

[17] Piepho H. Methods for comparing the yield stability of cropping systems [J]. Journal of Agronomy and Crop Science,1998,180(4):193-213.

[18] 李忠芳,徐明岗,张会民,等.长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J].应用生态学报,2010,21(5):1264-1269.

[19] Bidisha M, Joerg R, Yakov K. Effect of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil [J]. European Journal of Soil Biology,2010,46(6):365-370.

[20] 唐继伟,徐久凯,温延臣,等.长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(11):1827-1834.

[21] 黄晶,高菊生,张杨珠,等.长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J].应用生态学报,2013,24(7):1889-1894.

[22] 魏猛,张爱君,诸葛玉平,等.长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):304-312.

[23] Yu C J, Qin J G, Xu J, et al. Straw combustion in circulating fluidized bed at low-temperature transformation and distribution of potassium [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering,2010,88(5):874-880.

[24] 林治安,赵秉强,袁亮,等.长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J].中国农业科学,2009,42(8):2809-2819.

[25] 门明新,李新旺,许皞.长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J].中国农业科学,2008,41(8):2339-2346.