

适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益

马忠明¹, 王平², 陈娟¹, 包兴国¹

(1 甘肃省农业科学院, 甘肃兰州 730070; 2 兰州市农业科技研究推广中心, 甘肃兰州 730000)

摘要:【目的】河西绿洲灌溉农业区是我国主要的商品粮生产及玉米制种基地, 结合当地耕作制度进行土壤有效培肥是提高农业生产效益和可持续发展的基础。本研究以河西灌漠土长期定位试验为依托, 探讨了长期施用一种或者多种有机肥以及有机无机肥配合对土壤养分、土壤酶活性及产量的影响, 为筛选出适于当地农业可持续发展的施肥模式提供理论依据。【方法】试验采用随机区组排列, 除对照外, 在施磷肥 (P_2O_5) 150 kg/hm² 的基础上, 再设 12 个处理: 单施用农家肥 120 t/hm² (M); 单施绿肥 45 t/hm² (G); 单施秸秆 10.5 t/hm² (S); 单施氮肥 375 kg/hm² (N); 农家肥 60 t/hm² + 绿肥 22.5 t/hm² (1/2MG); 农家肥 60 t/hm² + 秸秆 5.25 t/hm² (1/2MS); 农家肥 60 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm² (1/2MN); 绿肥 22.5 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm² (1/2GN); 秸秆 60 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm² (1/2SN); 农家肥 40 t/hm² + 绿肥 15 t/hm² + 氮肥 124.5 kg/hm² (1/3MGN); 农家肥 40 t/hm² + 秸秆 3495 kg/hm² + 氮肥 124.5 kg/hm² (1/3MSN); 农家肥 30 t/hm² + 秸秆 2625 kg/hm² + 绿肥 11.25 t/hm² + 氮肥 94.5 kg/hm² (1/4MSGN)。调查了耕层土壤有机质和速效养分含量变化以及几种主要土壤酶活力, 采用主成分分析、聚类分析、经济效益分析综合比较了不同施肥方式对土壤质量与经济效益的影响。【结果】长期不施肥、单施氮肥(N)、氮肥配施绿肥或者秸秆均会造成土壤钾素匮乏, 较 1988 年初测土土壤速效钾含量分别下降了 16.59%、39.37%、25.04%、23.31%; M、G、S 三种有机肥单施或与氮配施均能提高土壤碱解氮、土壤有效磷、土壤有效钾、土壤有机质(SOM)含量, 不同施肥方式下, 其含量大小总体表现为高量有机肥 > 减量有机肥 + 减量 N > N > CK; M、G、S、N 单施或 1/2MN、1/2GN、1/2SN 处理均能提高蔗糖酶、磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶活性, 以 G、1/2GN 处理对提高土壤蔗糖酶、脲酶的活性的效果最显著, M、G、MN、GN 处理对提高碱性磷酸酶活性的效果最显著; 主成分得分进行聚类分析, 不同处理培肥土壤质量效果由高到低分成四类, 分别为一类高量有机肥 M、G、1/2MG > 二类有机肥与氮肥减量配施 1/2MN、1/3MSN、1/3MGN、1/2GN、1/2MS、1/4MSGN > 三类氮肥、秸秆、秸秆与氮肥 N、1/2SN、S > 四类不施肥(CK); 各施肥方式均能提高作物产量, 与不施肥(CK)相比, 增产幅度为 12.21%~235.4%, 肥料贡献率在 10.89%~70.18% 之间, 单施肥增产总趋势为 N > G > M > S, 减量配施肥增产总趋势为 1/2GN > 1/2MN > 1/2MS, 施肥方式以有机肥配施 N 对产量贡献最大; 经济效益分析表明施 N 或有机肥与 N 配施对于提高净收益作用较大。【结论】通过主成分分析与聚类分析、经济效益与产量综合比较, 农家肥、绿肥和秸秆长期单施成本高, 产量和经济效益低, 维持土壤养分和产量需要的用量大。因此, 提倡适量有机肥与氮肥配施, 达到提高作物产量, 增加经济效益, 保证土壤肥力可持续发展。

关键词: 长期施肥; 土壤养分; 土壤酶活; 主成分分析; 聚类分析; 作物产量

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)05-1298-12

Combined long-term application of organic materials with nitrogen fertilizer in suitable amount could improve soil fertility and crop production profit in He-xi Oasis of Gansu Province

MA Zhong-ming¹, WANG Ping², CHEN Juan¹, BAO Xing-guo¹

(1 Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2 Lanzhou Agro-technical Research and Popularization Center, Lanzhou 730070, China)

收稿日期: 2015-08-06 接受日期: 2015-12-18 网络出版日期: 2016-05-26

基金项目: 公益性行业专项北方高原山地区面源污染监测与氮磷投入阈值研究(201003014-7)资助。

作者简介: 马忠明(1964—), 男, 甘肃省民勤人, 博士生导师, 研究员, 主要从事作物栽培和节水农业研究。

E-mail: mazhming@163.com

Abstract: 【 Objectives 】 Irrigation agricultural area in He-xi Oasis, Gansu Province, is one of the important commercial maize production base in China. Study on the effects of different fertilization patterns on soil fertility and crop yield will provide a scientific basis for high efficient and sustainable agricultural production in the area. 【 Methods 】 A long-term field experiment (1988–2009) under the base of application of P_2O_5 150 kg/hm², except control, was conducted in irrigated desert soil. The 13 treatments included single application of farmyard manure 120 t/hm²(M), green manure 45 t/hm² (G), straw 10.5 t/hm² (S), N fertilizer 375 kg/hm² (N) and their combined application with each other as: 1/2MN, 1/2GN, 1/2SN, 1/2MG, 1/2MS, 1/2GS and 1/3MGN, 1/3MSN and 1/4MGSN. The soil organic carbon and available nutrient contents and the main soil enzyme activities were determined. Principle components analysis, cluster analysis and cost and economic returns were used to evaluate the soil quality and economic returns of different fertilization treatments. 【 Results 】 Long term treatments of CK, N, NG, NS caused soil available K deficiency, and the corresponding decrease was 16.59%, 39.37%, 25.04% and 23.31%, compared to those in 1988. The single application of M, G, and S or combined application with N could increase the contents of soil available N, soil available P, soil available K and soil organic matter (SOM) and soil enzyme activities (invertase, urease, alkaline phosphatase and catalase), and the contents of soil available N, P, K and SOM were in order of combined organic fertilizer application in high quantity > the combined application of low quantity organic fertilizer with low N > single N > CK. The single G or GN could increase the activities of invertase and urease, and the treatments of M, G and MN, GN could increase activities of alkaline phosphatase. The PCA and clustering analyses showed that the 13 fertilizer treatments can be divided into four categories according to the quality of soil: the first one was the high quantity organic fertilization including M, G and MG, the second one was the combined application of organic manure and N fertilizer including MN, MSN, MGN, GN, MS and MSGN, the third one was N, SN and S, and the last one was CK. Compared to CK, all the fertilization treatments could significantly improve crop yields, the crop yields were increased by 12.21%–235.4%, and the fertilizer contribution rates were in a range from 10.89% to 70.18%. The order of the crop yields was N > G > M > S, and the order of the crop yields was GN > MN > MSN > MGN > MG > SN > MSGN > MS. The organic fertilizer combined with application N fertilizer could obtain high yields. The cost and economic returns analysis showed that the single application of N fertilizer or organic fertilizer combined with N fertilizer could increase the net income. 【 Conclusions 】 Through the analysis and comparison, single application of farmyard, straw and green manure needs huge amount of input to keep soil fertility and a certain level of yield in the long run, the cost is high and economic benefit is low as a result. Therefore, the combined application of suitable amount of nitrogen fertilizer with organic materials is recommended for the increase of the crop yields and economic efficiency, ameliorate soil health and improve soil ecological environment.

Key words: long term fertilization; soil nutrient; enzyme activities; principal components analysis; clustering analysis; crop yield

河西绿洲灌溉农业历史发展悠久, 是我国主要的商品粮生产及玉米制种基地^[1]。1980 年以后, 随着化肥的大量应用, 灌区农民为了追求粮食高产, 盲目对化肥进行高投入, 而农家肥施用严重不足。这种长期的不合理施肥方式使得土壤养分含量下降、化肥利用率低、作物产量下降、地下水污染及农田生态系统遭到破坏^[2-3]。

土壤养分是土壤中能直接或经转化后被植物根

系吸收的有效营养成分, 是土壤供养能力的重要评价指标^[4]。施肥是影响土壤质量演化及其可持续利用最为深刻的农业措施之一^[5], 近年来, 关于 NPK 配比试验研究较多, 单一有机肥与化肥配施试验研究报告也很多。但是利用长期肥力定位试验研究不同种类的有机肥及有机肥与化肥配施对土壤理化性质的影响较少, 对土壤肥力指标进行综合评价分析更少。目前, 大多数的学者开始结合主成分分析与聚

类分析对长期定位的肥力指标进行综合评价、打分^[6-7]。这一方法不仅减少了计算量,降低了主观随意性,而且克服了聚类分析方法因原始数据量庞大,错综复杂而造成其结果偏离实际较远的缺点,大大提高了综合评价结果的准确性^[8]。本文通过分析目前生产实践应用较为广泛的三种有机肥(农家肥、绿肥、秸秆)与化肥(氮肥)单施或有机肥与氮肥之间减量配施对土壤养分、酶活性及作物产量的影响,综合土壤培肥效果,以期为河西灌区施肥措施改良提供可靠的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地为甘肃武威市白云村(38°37'N, 102°40'E),海拔 1504 m,无霜期 150 d 左右,年降雨量 150 mm,年蒸发量 2021 mm,年平均气温为 7.7℃,日照时数 3023 h,10℃ 的有效积温为 3016℃,年太阳辐射总量 140~158 kJ/cm²,麦收后 ≥10℃ 的有效积温为 1350℃。供试土壤为石灰性的灌漠土,表土为轻壤土,1988 年 3 月试验前取 0—20 cm 耕层土壤分析,有机质含量为 16.35 g/kg, pH 值为 8.8,耕层土壤全氮为 1.1 g/kg,全磷为 1.5 g/kg,碱解氮为 64.4 mg/kg,有效磷为 13.1 mg/kg,速效钾为 180.0 mg/kg,土壤容重 1.4 g/cm³,孔隙度 47.8%。

1.2 试验设计

本试验开始于 1988 年,小区面积为 30.01 m²,施磷肥(P₂O₅) 150 kg/hm² 作基肥,至试验分析已有 21 年。所用农家肥为当地土圈粪(牛粪),平均养分含量为有机质 29.1 g/kg,全氮 1.5 g/kg,全磷 0.88 g/kg,有效磷 60.3 mg/kg,有效钾 1293 mg/kg;绿肥为箭筈豌豆,鲜草含全氮 1.90 g/kg,全磷 0.34 g/kg,全钾 2.42 g/kg;秸秆为小麦秸秆(含 N 量为 0.45 g/kg),农肥、绿肥、秸秆全部播前基施。N 肥为尿素,1/4 在小麦播种时撒施,3/4 在玉米拔节期及抽雄期追施在玉米带,氮肥追施方式和时间与田间管理与当地一致。试验采用随机区组排列,共设 13 个处理,分别为:1) 不施肥(CK);2) 农家肥 120 t/hm² (M);3) 绿肥 45 t/hm² (G);4) 秸秆 10.5 t/hm² (S);5) 氮肥 375 kg/hm² (N);6) 农肥 60 t/hm² + 绿肥 22.5 t/hm² (1/2MG);7) 农肥 60 t/hm² + 秸秆 5.25 t/hm² (1/2MS);8) 农家肥 60 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm²

(1/2MN);9) 绿肥 22.5 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm² (1/2GN);10) 秸秆 5.25 t/hm² + 氮肥 187.5 kg/hm² (1/2SN);11) 农家肥 40 t/hm² + 绿肥 15 t/hm² + 氮肥 124.5 kg/hm² (1/3MGN);12) 农肥 40 t/hm² + 秸秆 3495 kg/hm² + 氮肥 124.5 kg/hm² (1/3MSN);13) 农肥 30 t/hm² + 秸秆 2625 kg/hm² + 绿肥 11.25 t/hm² + 氮肥 94.5 kg/hm² (1/4MGSN)。

1.3 采样及测定

本试验为小麦/玉米间作。于 2008 年播前(4 月 13 日)、小麦拔节期(5 月 12 日)、小麦灌浆期(6 月 20 日)、小麦收获后(7 月 20 日)采样,在各小区内采用 S 形 5 点混合采样法采集 0—20 cm 土样,装入自封袋中带回实验室,过 1 mm 筛,置于 4℃ 冰箱贮存,测定土壤理化性质。产量为小麦玉米折合公顷产量的和值,土壤养分与酶活性数值均为生育期内的均值。

碱解氮、速效 P、速效 K 及有机质含量采用碱解扩散法、0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提铝锶抗比色法、火焰光度法及重铬酸钾容量法测定^[9]。过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法、蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定、脲酶活性用苯酚钠比色法测定、碱性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定^[10]。

1.4 计算及数据统计方法

肥料贡献率^[11-12] (fertilizer contribution rate) = (施肥区产量 - 无肥区产量) / 施肥区产量 × 100%。数据分析采用 Excel 2013 和 SPSS21 统计软件,主成分分析和聚类分析采用 SPSS21 软件,作图采用 Excel 2013。

2 结果与分析

2.1 长期定位施肥对土壤养分的影响

2.1.1 不同施肥方式对土壤有机质含量的影响 等磷条件下,不同施肥处理下土壤有机质含量在 17.98~25.73 g/kg 之间(表 1),各施肥处理土壤有机质含量均高于 CK。其中,单施化肥(N)处理虽较 CK 高,远不及有机肥理。有机肥处理较试验初,有机质含量增幅在 22.26%~48.93%,M、G、S 之间差异不显著。有机肥两两减量配施处理有机质含量较 CK 增幅在 14.40%~39.82% 之间,其中 1/2MN 处理较 1/2GN、1/2SN 提高显著。三种以上减量配施处理(1/3MGN、1/4MGSN、1/3MSN)土壤有机质含量较 CK 增幅在 27.64%~43.10%。有机肥减量配施与有

机肥单施比较, 有机质含量差异不显著。有机质含量个处理由高到低为 $M > 1/2MN > N > CK$, $G > 1/2GN > N > CK$, $S > 1/2SN > N > CK$, 总的有机质含量表现为高量有机肥 $>$ 减量有机肥 + 减量 $N > N > CK$ 。

2.1.2 不同施肥方式对土壤碱解氮含量的影响 较试验初, 各施肥处理土壤碱解氮含量均显著高于 CK, 在 75.83~106.20 mg/kg 之间(表 1)。有机肥单施或与 N 配施均能提高土壤碱解氮含量。单施肥处理下, 土壤碱解氮含量 N 处理显著低于有机肥处理, 碱解氮含量大小表现为 G、M 显著大于 S、N, 较 CK 增幅在 15.11%~40.05%; 两两减量配施处理土壤碱解氮含量大小规律与有机肥单施含量相似, 均显著高于 CK, 其增幅为 14.80%~39.22%。三种以上有机肥减量配施处理(1/3MGN、1/4MGSN、1/3MSN)碱解氮含量较 CK 增幅在 28.64%~34.11%。 $G > 1/2GN > N > CK$, $M > 1/2MN > N > CK$, G 与 M 能显著增加土壤碱解氮含量, 秸秆和氮肥与其配施同样能增加土壤碱解氮含量。土壤碱解氮含量大小为高量有机肥 $>$ 减量有机肥 + 减量 $N > N > CK$ 。

2.1.3 不同施肥方式对土壤有效磷含量的影响 不同施肥处理下的土壤有效磷含量变化范围为 8.92~36.00 mg/kg, 均高于 CK。除了施 N 处理, CK 处理

下的土壤有效磷含量显著低于其他处理, 较试验初的 13.1 mg/kg 下降了 31.19%, 说明在没有外源磷施入的情况下, 土壤有效磷含量会持续下降。从(表 1)可以看出, 单施 M、S、G、N 的处理土壤有效磷含量较 CK 增幅在 60.31%~303.59%, 单施氮不能显著增加有效磷含量; 两两减量配施处理土壤有效磷含量均高于 CK; 三种及以上减量配施处理 1/4MGSN、1/3MSN、1/3MGN 的土壤碱解氮含量较 CK 增幅分别为 158.30%、167.71% 和 164.35%。表明单施农家肥、秸秆及绿肥均能显著增加土壤有效磷含量, 与其它肥料配施也能显著增加土壤有效磷含量。有机肥之间配施土壤有效磷含量较有机肥与 N 配施高, 单施 N 增加的幅度最小, 其因为三种有机肥自身含有较高的磷, 其中农家肥含全磷 0.88 g/kg、有效磷 60.30 mg/kg; 绿肥含全磷 0.34 g/kg, 秸秆磷含量一般为作物干重的 0.2%~1.1%^[19]。

2.1.4 不同施肥方式对土壤速效钾含量的影响 有机肥均能提高土壤速效钾的含量, 施 N 处理的土壤速效钾含量最低(表 1)。CK、N、1/2GN 和 1/2SN 处理较 1988 年试验初始值, 土壤速效钾含量降幅在 16.5%~23.31%。2008 年 M、G、S 处理土壤速效钾含量较 CK 分别显著增加了 255.94%、33.19%、39.86%, 而 N 处理显著下降了 27.31%; 两两减量配

表 1 不同施肥处理土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient contents affected by long-term fertilization treatment

处理 Treatment	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Avail. N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)
CK	17.98 e	75.83 f	8.92 f	150.13 fg
M	24.35 ab	103.11 ab	36.00 a	534.38 a
G	23.29 abc	106.20 a	23.63 bcd	199.96 e
S	21.76 bcd	90.31 de	25.14 bc	194.96 ef
N	19.99 de	87.29 e	14.30 ef	109.12 g
1/2MG	25.14 a	105.57 ab	28.83 b	452.54 b
1/2MS	24.02 ab	95.08 bcd	29.78 ab	387.96 c
1/2MN	23.82 ab	93.40 cde	26.56 b	343.58 cd
1/2GN	20.08 de	90.15 de	17.91 de	138.04 g
1/2SN	20.57 cde	87.05 e	18.08 cde	134.92 g
1/3MGN	25.73 a	101.70 abc	23.04 bcd	322.58 d
1/3MSN	22.95 abcd	97.55 abcde	23.58 bcd	310.21 d
1/4MGSN	24.84 ab	99.25 abcd	23.88 bcd	295.38 d

注 (Note): CK—No fertilizer; M—Farmyard; G—Green manure; S—Maize straw; 不同小写字母表示处理间差异显著 Different letters within a row indicate the significant differences ($P < 0.05$).

施处理 1/2MG、1/2MS、1/2MN 土壤速效钾含量较 CK 分别增加了 201.43%、158.41%、128.86%，而 1/2GN、1/2SN 分别下降了 8.05%、10.13%；三种以上配施处理速效钾含量较 CK 分别增加了 96.74%~114.86%。

长期绿肥和秸秆分别与氮减量配施增加了作物对钾的吸收，而绿肥和秸秆中的钾不足以弥补作物带走的钾，因此，这两种组合及其用量是不利于土壤钾素的平衡的。包兴国等进行的绿肥或者秸秆减半与N配施也得到了土壤速效钾亏损的结论^[17]。GN 或者 SN 配施能够增加作物对钾的吸收，NP 配合秸秆还田能使小麦吸收的 84% 的钾素还回土壤中，减缓了钾素的严重亏缺，但仍处于亏缺状态，钾素年表观亏缺达到 13.4~23.1 kg/hm²^[18]，长期氮磷与秸秆或者绿肥配施会造成土壤钾素亏缺，会加剧土壤钾的耗竭风险^[19]。

2.2 长期定位施肥对土壤酶活性的影响

2.2.1 不同施肥方式对土壤蔗糖酶活性的影响 土壤蔗糖酶活性大小不仅反映土壤有机碳积累与分解转化的规律，也是评价土壤熟化程度和土壤肥力水平的重要指标^[20]。由 (表 2) 可以看出，不同施肥处理土壤蔗糖酶活性均高于 CK；G 与 S、N、M 相比土壤

蔗糖酶活性差异显著；两两减量配施或三种及以上配施与 CK 相比均能增加蔗糖酶活性。G 与 1/2GN 处理的土壤蔗糖酶活性最高，这主要是由于绿肥对土壤有机质和全量养分影响较大，有机肥与 N 配施较单施 N 更能提高其活性。

2.2.2 不同施肥方式对碱性磷酸酶活性的影响 不同施肥处理下碱性磷酸酯酶活性为 1.47~1.74 mg/g 土 (24 h)，施肥均能提高碱性磷酸酶活性 (表 2)。M、G、S 和 N 处理能显著增加磷酸酶活性，较 CK 增幅在 0.67%~18.36%；两两减量配施磷酸酶活性较 CK 增幅在 7.48%~12.24%；三种及以上配施之间差异不显著。M、G 或 N 与其减量配施处理下的磷酸酶活性均高于 CK，增幅为 0.68%~18.37%，以单施 M 处理土壤碱性磷酸酶活性最高。

2.2.3 不同施肥方式对土壤脲酶活性的影响 土壤脲酶活性可用来表征土壤氮营养水平，其对土壤和肥料的氮素转化起着重要作用。各施肥处理下脲酶活性均大于 CK (表 2)，处理 G 与处理 S、M 和 N 之间差异显著，较 CK 增幅在 4.79%~15.43%。处理 S、M 和 N 对脲酶活性影响不显著，这与郑勇等^[21]、孙瑞莲等^[22]的报道一致。两两减量配施处理 1/2MG、1/2GN、1/2MS、1/2SN、1/2MN 均显著高于 CK，但

表 2 不同施肥处理小麦季土壤酶活性

Table 2 Soil enzyme activities during wheat growth season affected by long-term fertilization treatment

处理 Treatment	蔗糖酶 Invertase (mg/g, 24 h)	磷酸酶 Phosphatase (mg/g, 24 h)	脲酶 Urease (NH ₃ -N mg/g, 24h)	过氧化氢酶 Catalase (0.1 mol/L KMnO ₄ mL/g)
CK	31.18 c	1.47 d	0.376 c	5.60 a
M	35.98 bc	1.74 a	0.406 bc	5.92 a
G	59.17 a	1.62 abc	0.434 a	5.87 a
S	38.75 bc	1.51 cd	0.409 bc	5.65 a
N	38.27 bc	1.48 d	0.394 bc	5.89 a
1/2MG	46.59 ab	1.65 ab	0.424 ab	5.92 a
1/2MS	36.99 bc	1.64 ab	0.408 bc	5.89 a
1/2MN	39.76 bc	1.64 ab	0.404 bc	5.88 a
1/2GN	54.18 a	1.63 ab	0.423 ab	5.88 a
1/2SN	41.32 abc	1.58 bcd	0.408 bc	5.75 a
1/3MGN	44.17 abc	1.62 abc	0.417 b	5.96 a
1/3MSN	37.75 bc	1.57 cd	0.381 c	5.96 a
1/4MGSN	43.84 abc	1.60 bcd	0.409 bc	5.80 a

注 (Note)：土壤样品取自 0~20 cm 耕层 Soil samples were collected at 0~20 cm；土壤酶活性为生育期内均值 Enzyme activities were the averages of wheat grow period；CK—No fertilizer；M—Farmyard manure；S—Maize straw；数据后不同小写字母表示处理间差异显著 Values followed by different letters within a row indicate the significant differences ($P < 0.05$)。

配施处理脲酶活性差异不显著; 三种及以上配施脲酶活性均高于 CK。施入秸秆可以增加脲酶活性, 因为秸秆对根际土壤脲酶活性有激活效应^[23], 其中又以秸秆与 NP 配合施用效果较好^[24]。

2.2.4 不同施肥方式对过氧化氢酶活性的影响 过氧化氢酶是一种重要的氧化还原酶, 参与土壤中物质与能量转化过程, 在一定程度上较灵敏地反映了土壤微生物学过程和作物代谢过程的强度, 能促进过氧化氢对各种化合物的氧化^[25]。与不施肥相比, 长期施肥均能提高过氧化氢酶活性, 但无论单施、两两配施还是三者以上配施对过氧化氢酶活性影响不大, 这与袁玲等研究结果相一致^[26]。除单施 N 外, 不同施肥处理的土壤过氧化氢酶活性均高于 CK。

2.3 土壤肥力状况主成分分析及不同施肥制度的聚类分析

对不同处理土壤养分和酶活性进行分析, 根据主成分分析的原理, 第一、第二、第三主成分对应的特征大于 1, 累积方差贡献率大于 80%~85% 以上, 即可代表样本的总体变异。土壤养分的第一、二、三主成分可代表土壤肥力系统内的总体变异信息, 反映土壤肥力在不同施肥方式下的土壤养分变化状况 (表 3)。通过表 4 的旋转因子载荷可以看出, 第一主成分综合了 SOM、碱解氮、有效 P、有效 K 的变异信息, 成为土壤养分因子。第二主成分综合了 SOM、碱解氮、蔗糖酶、脲酶的信息。第三主成分综合了土壤蔗糖酶、磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶的信息, 成为酶活性因子。通过各土壤养分的变量

表 3 主成分分析的特征根和方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance contribution of principal components analysis

项目 Item	特征根 Eigenvalue	方差贡献率(%) Variance contribution	累积方差贡献率(%) Cumulative contribution
1st	4.663	46.63	46.63
2nd	2.155	21.55	68.18
3rd	1.504	15.04	83.23

载荷因子权系数和表 3 特征根, 可计算得到土壤总养分信息系统的第 一、二、三主成分模型方程如下:

$$F1 = 0.42ZX1 + 0.41ZX2 + 0.43ZX3 + 0.41ZX4 + 0.06ZX5 + 0.27ZX6 + 0.01ZX7 + 0.22ZX8 - 0.38ZX9 + 0.17ZX10$$

$$F2 = 0.08ZX1 + 0.23ZX2 - 0.02ZX3 - 0.25ZX4 + 0.56ZX5 + 0.05ZX6 + 0.49ZX7 - 0.13ZX8 - 13ZX9 - 0.53ZX10$$

$$F3 = -0.05ZX1 + 0.07ZX2 - 0.24ZX3 - 0.11ZX4 + 0.25ZX5 + 0.35ZX6 - 0.47ZX7 + 0.66ZX8 + 0.15ZX9 - 0.26ZX10$$

利用第一、二、三主成分方程, 分别结合方差贡献率 (表 4), 最终构建出不同施肥方式下的土壤总养分状况的综合评价模型: $F = 0.24ZX1 + 0.30ZX2 + 0.19ZX3 + 0.15ZX4 + 0.22ZX5 + 0.23ZX6 + 0.05ZX7 + 0.20ZX8 - 0.22ZX9 - 0.09ZX10$ 。式中, ZX 表示标准化后的数据, 其中 X1 为 SOM; X2 为土壤碱解氮含量; X3 为土壤有效磷含量; X4 为土壤速效钾含量; X5 为蔗糖酶活性; X6 为土壤磷酸酶活性; X7 为土壤脲酶活性; X8 为土壤过氧化氢酶活性; X9 为土壤容重; X10 为土壤 pH 值。

根据主成分模型即可计算主成分得分, 结合第一、二、三主成分得分与对应的特征根计算出综合主成分得分, 并按主成分分值进行排序 (表 5)。

根据第一、二、三主成分的得分信息, 应用平均联接法对个案进行聚类 (图 1)。本研究根据不同施肥方式对土壤养分及酶活性的影响进行聚类分析。土壤质量等级可以通过主成分综合得分进行划分^[20], 根据综合得分的最大值和最小值及聚类分析把不同施肥方式下的土壤质量划分为四个等级 (四大类)。

第一类包含 G、M、1/2MG, 综合得分范围 0.95~1.41。长期施用高量有机肥条件下, 对于土壤养分、酶活性的提高具有较大的作用。

第二类包含 1/2MN、1/3MSN、1/3MGN、1/2GN、1/2MS、1/4MGSN, 综合得分范围 -0.14~0.62。有机肥与氮肥的配施与单施氮处理相

表 4 主成分旋转因子载荷

Table 4 Component score coefficient matrix

主成分 Principal	有机碳 SOC	碱解氮 Avail. N	有效磷 Avail. P	有效钾 Avail. K	蔗糖酶 Invertase	磷酸酶 Phosphatase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	土壤容重 Bulk density	pH
1st	0.901	0.888	0.931	0.895	0.125	0.586	0.027	0.466	-0.825	0.370
2nd	0.120	0.339	-0.029	-0.369	0.822	0.076	0.726	-0.193	0.193	-0.778
3rd	-0.061	0.082	-0.297	-0.132	0.311	0.424	-0.575	0.805	0.187	-0.313

表 5 各样本主成分得分

Table 5 Principal scores of each treatment

处理 Treatment	1 st	排名 Ranking	2 nd	排名 Ranking	3 rd	排名 Ranking	综合得分 Composite	排名 Ranking
CK	-4.21	13	-2.83	13	0.24	8	-2.75	13
M	3.56	1	-1.22	11	-0.63	11	0.96	2
G	0.79	5	2.59	1	0.76	1	1.41	1
S	-1.24	10	0.36	5	-2.74	13	-0.89	11
N	-2.08	12	1.14	4	0.37	4	-0.63	10
1/2MG	2.06	3	-0.63	9	1.83	3	0.95	3
1/2MS	2.10	2	-1.40	12	0.30	7	0.62	4
1/2MN	0.30	8	0.06	6	-1.01	12	-0.14	9
1/2GN	-1.60	9	1.53	2	1.37	2	0.05	8
1/2SN	-2.24	11	0.07	7	-0.04	6	-0.92	12
1/3MGN	1.30	4	0.05	8	0.22	9	0.55	5
1/3MSN	0.74	6	-1.14	10	1.13	5	0.24	7
1/4MGSN	0.51	7	1.43	3	-1.36	10	0.37	6

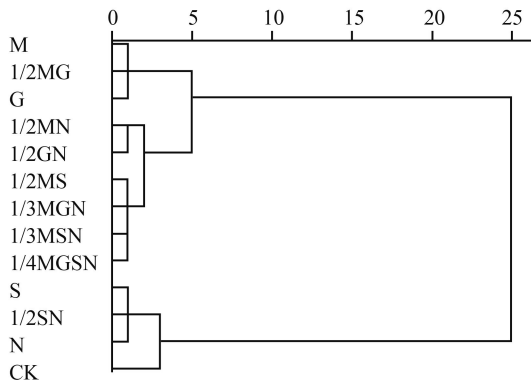


图 1 聚类分析

Fig. 1 Dendrogram

比，土壤中的 SOM、碱解氮、速效钾、有效磷等指标均有所增加。

第三类包含 N、1/2SN、S，综合得分范围 -0.92~-0.63。从聚类图可以看出，单施 N、S 及两者配施培肥地力较差。

第四类为不施肥，综合得分 -2.72。由于常年不施肥，速效K及其他土壤养分指标均很低。

2.5 不同施肥处理对小麦/玉米产量及经济收益的影响

图 2 显示不同施肥处理的小麦、玉米产量差异显著。2008 年小麦/玉米合计产量在 4658~15622.4 kg/hm² 之间，与 CK 相比，增产幅度在 12.21~235.4%，肥料贡献率在 10.89%~70.18% 之间。施肥

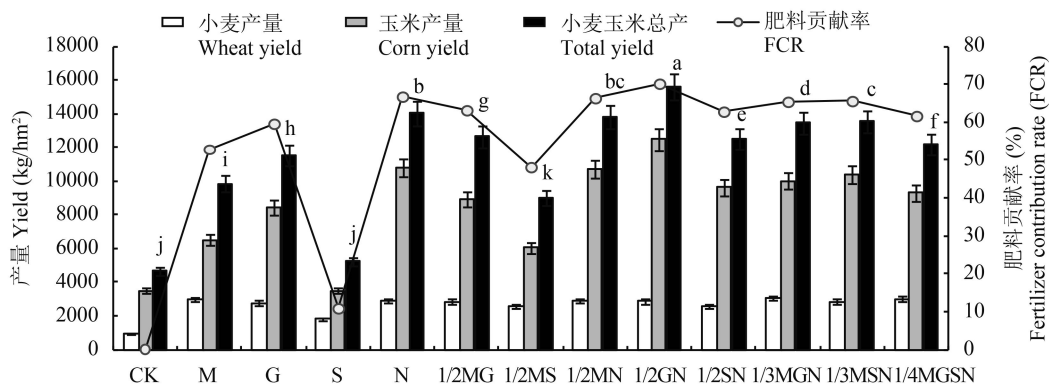


图 2 不同施肥处理作物产量及肥料贡献率

Fig. 2 Crop yields and the contribution rate of fertilizer under different treatments

能显著增加作物产量, 不同肥料对作物增产效果不尽相同。在等磷的条件下, 单施肥产量大小为 $N > G > M > S$, 较 CK 增产了 200.96%、147.56%、111.41%、12.22%; 配施对产量影响大小为 $1/2GN > 1/2MN > 1/3MGN > 1/3MSN > CK$ 。N 处理对作物产量影响最为显著, 与其配施 1/2GN、1/2MN 作物产量较高, 与 CK 相比提高了 235.39%、197.32%, 1/2GN 较单施氮产量增加 11.45%。说明施用有机肥

能提高土壤养分含量, 增加作物产量, 氮减半与土壤有机肥配施, 作物产量较单施氮不减反增, 且氮与有机肥配施肥料贡献率较大。

根据表 6 可以看出, 肥料支出以 1/2MG 最高, 处理 M 与 G 其次。有机肥与氮合理配施的小麦、玉米净利润以 N、1/2GN 较大, CK 和 1/2MS 处理较小, 单施氮肥或氮肥有机肥适量配施对于提高净收益作用较大。

表 6 不同处理作物生产成本和经济收益(yuan/hm²)

Table 6 Cost and economic returns of fertilization under different treatment

处理 Treatment	支出 Cost			产量收益 Income of yield	净收益 Net income
	肥料 Fertilizer	其他 Other	合计 Total		
CK	0	5060	5060	9347.53 j	4287.53 f
M	9000	5060	14060	20167.71 h	6107.71 e
G	9000	5060	14060	23799.32 g	9739.32 d
S	5250	5060	10310	11304.48 k	994.48 g
N	937.5	5060	5997.5	28960.48 b	22962.98 a
1/2MG	10500	5060	15560	25061.19 f	9501.19 d
1/2MS	8625	5060	13685	18286.99 i	4601.99 f
1/2MN	6468.75	5060	11528.75	28826.41 bc	17897.66 b
1/2GN	4968.75	5060	10028.75	32484.41 a	22455.66 a
1/2SN	3094.75	5060	8154.75	25926.94 e	17772.19 b
1/3MGN	7311.75	5060	12371.75	27743.66 d	15371.91 c
1/3MSN	6059.25	5060	11119.25	28112.90 cd	16993.65 b
1/4MGSN	6423.75	5060	11483.75	26125.72 e	14641.97 c

注 (Note): 农家肥 Farmyard manure 100 yuan/t; 绿肥 Green manure 200 yuan/t; 秸秆 Straw 500 yuan/t; 氮肥 Nitrogen fertilizer 2500 yuan/t; 种子 Seed 600 yuan/hm²; 灌水 Irrigation 960 yuan/hm²; 劳力 + 机械 Labor plus machanics 3500 yuan/hm²。

3 讨论

施肥方式直接影响着土壤养分的保持与累积, 进而影响着作物的产量^[27]。合理的施肥方式可以改善土壤理化性质、增加作物产量。本研究是在等磷的条件下, 研究长期定位施用三种有机肥 (M、G、S) 与 N 的配施对土壤养分及酶活性、产量的影响, 通过主成分与聚类及经济收益分析, 综合筛选最为合理的施肥方式, 为当地农业生产提供理论参考。

3.1 不同施肥方式对土壤养分的影响

试验经过 21 年定位施肥后, 有机肥处理的土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量均高于不施肥处理, 有机肥对提高土壤有机质和速效 N、P、K 含量的作用大于化肥。土壤有机质含量的多寡是反映土壤肥力的重要指标, 说明施加有机肥可以提高

土壤质量。有机肥对土壤有机质含量的大小表现为 $M > G > S$, 主要是由于它们均含有较多的有机质如作物秸秆及作物根茬, 农家肥还含有动物粪便、消化道酶及大量微生物^[29], 可以促进氮的矿化, 有机磷的分解^[30-31], 且单施化肥土壤有机质的矿化损失大, 高于配施有机肥处理。因此, 单施有机肥或者有机肥与 N 减量配施可以提高土壤有机质。

土壤有机质与碱解氮含量呈极显著正相关^[32]。施加有机肥处理碱解氮含量高于单施氮, 主要是由于有机肥含有较多有机质, 其腐解、释放的氮素会增加碱解氮含量。本试验中绿肥与农家肥单施, 或者与其减量配施的土壤碱解氮含量较高, 单施秸秆与氮或者与其配施, 土壤碱解氮含量较小。其主要原因是: 土壤腐解速率取决于 C/N 比, 豆科植物易分解组分含量高, C/N 比值小 (约为 20~30 : 1), 在分

解时能释放较多的氮素；本试验农家肥全氮含量比绿肥低 26.67%，C/N 比值高于绿肥低于秸秆；秸秆土壤碱解氮含量最低是由于秸秆的 C/N 比大多在 60~100:1^[29]，C/N 比大，施入土壤后，常易发生微生物与作物争夺氮素。因此，不同施肥处理土壤碱解氮含量大小为绿肥 > 农家肥 > 秸秆 > N。

施用有机肥均能够提高土壤有效 K 的含量，三种有机肥对土壤有效钾含量的影响农家肥 > 绿肥 > 秸秆。钾素主要来源于土壤中含钾矿物风化及土壤有机质分解^[33]，农家肥含有丰富的钾，绿肥、秸秆次之。氮或者氮与绿肥、秸秆配施有效钾含量有所下降，说明施氮肥能促进作物对土壤有效钾的吸收利用，当土壤中钾素含量较少的情况下，随作物籽粒及秸秆携带钾素累积量增加，土壤钾素流失加快^[34]。

长期施有机肥对土壤有效磷含量影响为农家肥 > 秸秆 > 绿肥，以 1/2MS 处理的有效磷含量最高，而秸秆与绿肥对有效磷的影响差异不显著。有机肥本身含有较高的有机磷，而有机磷组分比例不尽相同，从而对土壤有效磷的贡献不同。秸秆中的磷素经过分解和转化积累到土壤中的有效磷较少，可缓慢增加土壤有效磷含量，而 M 中磷素含量较高，磷素形态复杂且分解较快，对土壤有效磷的贡献是 N 的 2~4 倍^[36]。邱凤琼等的研究表明，施秸秆同样有利于土壤有效磷含量的提高^[37]，农家肥和秸秆二者的共同施入能够提高土壤有效磷和有机质含量，为土壤微生物生长提供良好的环境，与颜慧等的研究结论一致^[38]。

3.2 施肥对土壤酶活性的影响

长期施肥可直接影响土壤酶的活性。单施有机肥或者有机肥配施氮对提高土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶的活性均优于单施氮或不施肥；高量有机肥及氮在减半或减到三分之一、四分之一配施下，酶活性并不随有机肥量的剧减而大幅减小，而以有机肥与氮减量配施效果更好，这与宋震震等的结论一致^[39]。绿肥处理能显著提高蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性；农家肥可以显著提高碱性磷酸酶活性，秸秆对于提高酶活性不明显且较绿肥与农家肥差。主要由于绿肥含有丰富的碳源、氮源，是土壤微生物营养源，且易分解，与农家肥或氮肥配施，可以提高土壤微生物量，进而提高土壤酶活性。

3.3 不同施肥方式对作物产量及效益的影响

有机肥源以人畜排泄物和作物秸秆、绿肥等使用较广泛。近年来，由于制作和施用有机肥花工费多，农村劳力逐渐减少等因素使得有机肥施用量呈

下降趋势，从 1979 年单位播种面积平均施用有机肥 10830 kg/hm²，到近几年为 9000~9750 kg/hm²^[40]，但有机肥的用量如果不断增加会导致肥料利用降低和增加农田磷的地表流失量加速了地表水体富营养化，造成环境污染。研究表明有机肥配施无机肥较单施更加能够显著提高产量^[41]，有机无机配施中的矿物质养分和有机养分的释放既能补充土壤养分不足，又具有持久释放的能力，合理运筹氮肥是实现作物高产和超高产的重要措施，而长期单施和过量施用氮肥会造成土壤有机质含量降低、理化性状恶化，长期有机无机肥料配施方可提高土壤微生物量碳氮、脲酶活性^[42]，最大限度地发挥营养元素互补作用，长期施用有机肥料，随着施用年限延续有机肥肥效逐渐积累，并表现出良好的渐进与持续性。常规农村施氮肥的投入均大于产出，过量的氮肥投入不仅降低了其经济效益，也降低了环境生态效益。汪军等研究表明随氮肥用量的增加其经济效益呈先增加后降低的趋势，过量的施氮使得作物新增纯收益率显著低于低氮处理，其经济效益降低^[43]，而有机肥与氮肥的配施较单一施用有机肥或氮肥能更有效地提高潮土的土壤肥力，提高作物产量^[44]。在农业生产中，农民为了追求高产而盲目施氮，造成了肥料的浪费，作物生长发育受到胁迫，产量只降不增，造成大量 NO₃⁻ 淋溶，地下水污染，危害人类健康。本试验以施加 1/2GN、1/2MN 处理作物产量较其他施肥高。因此，在氮肥减半的情况下，施用 1/2GN、1/2MN 处理既可以保持土壤有效钾、磷稳定在一定水平上，避免过多的 NO₃⁻ 进入环境，同样能提高作物产量，说明在生产中减少化肥的投入量空间很大，最佳的施肥方式是有机肥与化肥配施，其可兼顾作物产量、生态环境及经济效益。

3.4 主成分和聚类分析在长期定位试验中的应用

化肥和有机肥对改善土壤肥力的作用已有大量研究，但多集中于单方面指标的定性，通过简单相关性分析论述单项土壤养分指标与土壤质量的关系^[45]。随着统计学的应用领域不断拓展，越来越多的学者，将土壤理化指标通过函数关系或图形来描述各因子之间的关系^[46]，但有些因子内在相互关系不易用准确的函数或者数据来描述，从而使它们提供的信息部分发生交叉和重叠而影响了数据的正确分析。主成分分析的优点是简化数据，是揭示变量间关系的一种多元统计分析方法^[47]。在土壤等级划分、资源评价及合理利用方面，主成分分析得到大量的应用^[7]。一般认为主成分分析可以弱化变量间的自相

关性所引起的误差, 形成互不相关主成分, 获得各主成分得分, 同时通过计算得到综合评价得分, 从而达到对土壤质量的精确评价^[47]。本研究把不同施肥方式下的培肥效果采用主成分与聚类分析做出定量化评价, 以期为土壤可持续利用提供理论参考。

4 结论

1) 等磷条件下, 长期单施高量农家肥、绿肥、秸秆, 或者农家肥与氮肥配施均能提高土壤有机质、碱解氮、有效磷含量, 但绿肥和秸秆减量与氮肥配施不能弥补土壤钾的耗竭。

2) 与绿肥和秸秆相比, 农家肥更有利于土壤有机质、有效磷、速效钾含量的提高, 有利于土壤磷酸酶与过氧化氢酶活性的提高, 而绿肥更加有利于土壤碱解氮、蔗糖酶活性、脲酶活性的提高。

3) 经济效益与产量聚类综合分析, 农家肥、绿肥和秸秆长期单施成本高, 产量和经济效益低, 维持土壤养分和产量的用量大。因此, 提倡适量有机肥与氮肥配施, 达到提高作物产量, 增加经济效益, 保证土壤肥力可持续发展。

参 考 文 献:

[1] 崔增团, 郭世乾. 基于GIS的河西走廊灌溉农业区耕地地力评价研究—以甘肃省肃州区耕地地力评价为例[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(1): 56–61.
Cui Z T, Guo S Q. Evaluation of farmland productivity in irrigation agricultural region of HEXI corridor in Gansu Province based on GIS technique—A case study of Suzhou County [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012, 33(1): 56–61.

[2] 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.
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, *et al.* Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 397–403.

[3] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦-夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334–340.
Pan J R, Ju X T, Liu X J, *et al.* Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat summer maize rotation in north China plain under optimization of irrigation and fertilization [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(2): 334–340.

[4] 李新旺, 门明新, 王树涛, 等. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及农田养分平衡的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 9–16.
Li X W, Men M X, Wang S T, *et al.* The effects of long term fertilization on crop yields and farmland nutrient equilibrium [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 9–16.

[5] 马忠明, 杜少平, 王平, 等. 长期定位施肥对小麦玉米间作土壤酶活性的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(4): 796–801.
Ma Z M, Du S P, Wang P, *et al.* effects of long-term located fertilization on soil enzymatic activities for wheat-maize

intercropping in irrigated desert soils [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25(4): 796–801.

[6] 陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 609–617.
Chen H, Cao C F, Zhang C L, *et al.* Principal component-cluster analysis of effects of long-term fertilization on fertility of lime concretion black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 609–617.

[7] 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.
Wen Y C, Li Y Q, Yuan L, *et al.* Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 91–99.

[8] 赵月玲, 林玉玲, 曹丽英, 等. 基于主成分分析和聚类分析的土壤养分特性研究[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 484–488.
Zhao Y L, Lin Y L, Cao L Y, *et al.* A study of soil nutrients characteristics based on principal component and cluster analysis [J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(4): 484–488.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30–107.
Bao S D. Soil agro-chemical analysis [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2000. 30–107.

[10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986. 120–276.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986. 120–276.

[11] 申建波, 张福锁. 水稻养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 23, 205, 236–263.
Shen J B, Zhang F S. Theory and practice of nutrient resources management on rice [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. 23, 205, 236–263.

[12] 雷明江, 杨玉华, 杜昌文, 等. 长期定位施肥试验中土壤可溶性有机磷的变化规律及其有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 844–849.
Lei M J, Yang Y H, Du C W, *et al.* Dynamics and availability of soil soluble organic phosphorus in a long-term fertilization experiment [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 844–849.

[13] 陈波浪, 蒋平安, 盛建东. 磷肥对棉田土壤有效磷及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 185–188.
Chen B L, Jiang P A, Sheng J D. Effect of phosphate fertilizers on soil available phosphorus and soil enzyme activities in cotton field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 185–188.

[14] 陈欣, 宇万太, 沈善敏. 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 II. 土壤有效磷及土壤无机磷组成[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 81–88.
Chen X, Yu W T, Shen S M. Changes of soil phosphorus pool under low-input phosphorus fertilization system II. Soil available phosphorus and the composition of soil inorganic phosphorus [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 81–88.

[15] 雷明江, 杨玉华, 杜昌文, 等. 长期定位施肥试验中土壤可溶性有机磷的变化规律及其有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 844–849.

- Lei M J, Yang Y H, Du C W, *et al.* Dynamics and availability of soil soluble organic phosphorus in a long-term fertilization experiment [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 844–849.
- [16] Reddy D D, Rao A S, Reddy K S, Takkar P N. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus [J]. *Field Crops Research*, 1999, 62: 181–190.
- [17] 包兴国, 邱进怀. 绿肥与氮肥配施对荒漠土磷钾平衡的研究[J]. *土壤通报*, 1996, 27(4): 177–178.
Bao X G, Qiu J H. Green manure and nitrogen fertilizer on irrigated desert soil phosphorus and potassium balance [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 177–178.
- [18] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*. 2010, 16(4): 801–808.
Wang H T, Jing J Y, Wang B, *et al.* Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 801–808.
- [19] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 施钾和秸秆还田对栗钙土区土壤养分及小麦产量的长期效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 194–198.
Tan D S, Jing J Y, Huang S W, *et al.* Study on effect of long-term application of K fertilizer and returning straw to soil on soil nutrient and wheat yield in the region of castanozem [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 194–198.
- [20] 李东坡, 武志杰, 陈利军. 长期定位培肥黑土土壤蔗糖酶活性动态变化及其影响[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2): 103–105.
Li D P, Wu Z J, Chen L J. Dynamics of invertase activity of black soil treated by a long-term located fertilization and its influence [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 103–105.
- [21] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 316–321.
Zhen Y, Gao Y S, Zhang L M, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 316–321.
- [22] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406–410.
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 406–410.
- [23] 李东坡, 武志杰, 陈利军. 土壤生物学活性对施入有机肥料的响应—I 土壤酶活性的响应[J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 463–467.
Li D P, Wu Z J, Chen L J. Response of soil biological activity to organic manure—I Soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 463–467.
- [24] 刘淑英. 不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 219–223.
Liu S Y. Effects of different fertilization on soil urease, nitrogen and their correlation in semiarid area of northwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 219–223.
- [25] 李娟. 长期不同施肥制度土壤微生物学特性及其季节变化[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2008.
Li J. Studies on soil microbial properties and their seasonal variations of different long-term fertilization regimes [D]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [26] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 300–305.
Yuan L, Yang B J, Zheng L J, *et al.* Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(4): 300–305.
- [27] 胡诚, 宋家咏, 李晶, 等. 长期定位施肥土壤有效磷与有效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 673–675.
Hu C, Song J Y, Li J, *et al.* Profile distribution of soil available phosphorus and available potassium concentrations and crop grain yields in long-term fertilization experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(4): 673–675.
- [28] 徐秋明, 黄德明, 谭宝义. 春季不同肥水管理麦田土壤养分和水分的动态变化[J]. *北京农业科学*, 1991, (1): 30–34.
Xu Q M, Huang D M, Tan B Y. The dynamic change of spring wheat of different fertilizer and water management of soil nutrients and moisture[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 1991, (1): 30–34.
- [29] 孙羲. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988. 179–237.
Sun X. *Plant nutrition and fertilizer*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1988. 179–237.
- [30] 宋永林, 李秀英, 李小平. 长期施肥对褐潮土氮、有机质动态变化的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(18): 206–209.
Song Y L, Li X Y, Li X P. Effect of long-term fertilization on N and organic matter dynamic changes in fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(18): 206–209.
- [31] Fang C, Smith P, Smith J U, Moncrieff J B. Incorporating microorganisms as decomposers into models to simulate soil organic matter decomposition[J]. *Geoderma*, 2005, 129: 139–146.
- [32] 王平, 马志明, 包兴国, 等. 长期不同施肥方式对小麦/玉米间作土壤蔗糖酶活性的影响[J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(5): 611–614.
Wang P, Ma Z M, Bao X G, *et al.* Effect of chemical fertilizer and organic fertilizer long-term application on soil invertase activity in wheat/maize intercropping system[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(5): 611–614.
- [33] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(3): 364–371.
Zhang J G, Qin J T, Yao W Q, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils[J]. *Soil*, 2010, 42(3): 364–371.
- [34] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110–1118.
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [35] 吕晓东, 马志明, 杨虎德. 民勤绿洲耕作土壤养分时空变异特征及其影响因素[J]. *干旱地区研究*, 2010, 27(4): 487–494.

- Lü X D, Ma Z M, Yang H D. Temporal-spatial characteristics and impact factors in soil nutrients of arable soil in Minqin oasis[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(4): 487–494.
- [36] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 93–98.
Huang S M, Guo D D, Zhang S Q. Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of Olsen-P in Fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 93–98.
- [37] 邱凤琼, 丁庆堂. 有机物对土壤磷素和微量元素的影响[J]. *土壤通报*, 1986, 17(7): 73–76.
Qiu F Q, Ding Q T. Effect of organic matter on soil Pand trace elements [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986, 17(7): 73–76.
- [38] 颜慧, 钟文辉, 李忠佩, 蔡祖聪. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 71–75.
Yan H, Zhong W H, Li Z P, Cai Z C. Effects of long-term fertilization on phospholipids fatty acids and enzyme activities in paddy red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 71–75.
- [39] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525–533.
Song Z Z, Li X H, Li J, *et al.* Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 525–533.
- [40] 罗奇祥, 李祖章, 刘光荣. 江西省肥料施用状况与肥效演变规律[J]. *江西农业学报*, 2004, 16(3): 48–54.
Luo Q X, Li Z Z, Liu G R. Situation of fertilizer application and change of fertilizer efficiency in Jiangxi Province [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2004, 16(3): 48–54.
- [41] 陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 609–617.
Chen H, Cao C F, Zhang C L, *et al.* Principal component-cluster analysis of effects of long-team fertilization on fertility of lime concretion black soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 609–617.
- [42] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1):144–152.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 144–152.
- [43] 汪军, 王德建, 张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J].*中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 265–270.
Wang J, Wang D J, Zhang G. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 265–270.
- [44] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 236–241.
Ma J Y, Li K J, Cao C Y, *et al.* Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluvo-aquic soil fertility and crop yield [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 236–241.
- [45] 周斌, 王周琼. 长期定位施肥对灰漠土养分的影响及评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 35–39.
Zhou B, Wang Z Q. Effects of long-term located fertilization on soil nutrient in the farmland ecosystems of grey desert soil oases [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4): 35–39.
- [46] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒地群落生物量及植被土壤养分效应[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1674–1683.
Du F, Liang Z S, Xu X X, *et al.* The community biomass of abandoned farm land and its effects on soil nutrition in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1674–1683.
- [47] 夏建国, 李廷轩, 邓良基. 主成分分析法在耕地质量评价中的应用[J]. *西南农业学报*, 2000, 19(2): 51–55.
Xia J G, Li T X, Deng L J. The application of the principal component analysis method in quality evaluation of cultivated land [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 19(2): 51–55.