

不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响

李燕青¹, 温延臣³, 林治安³, 赵秉强^{2*}

(1 中国农业科学院果树研究所/农业部园艺作物种质资源利用重点实验室/辽宁省落叶果树矿质营养与肥料高效利用重点实验室, 辽宁兴城 125100; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 3 中国农业科学院德州盐碱土改良实验站, 山东德州 253015)

摘要:【目的】不同类型畜禽粪便有机肥在成分和性质上存在明显差异, 本文研究了华北地区主要有有机肥与化肥以不同比例配施后, 对作物氮素吸收利用及土壤养分的影响, 以期为本地区有机肥的科学利用提供理论依据和数据支撑。【方法】在华北平原冬小麦-夏玉米种植区进行田间试验。以推荐养分施用量(每季作物 N 225 kg/hm²)为基础, 设置了 1 个常规单施化肥处理(CF), 12 个鸡粪、猪粪和牛粪氮分别与化肥氮配比处理(有机肥氮素占比 25%、50%、75%、100%), 化肥及 3 种有机肥的加倍单施处理, 同时设 1 个不施肥处理为对照, 共 18 个处理。分析了作物的氮素吸收量、氮素利用效率, 测定了 0—20、20—40 cm 土层土壤氮、磷、钾含量。【结果】常规施肥量下, 单施鸡粪、猪粪、牛粪处理的氮素收获指数(NHI)均与化肥处理相当, 平均为 79.06%; 单施牛粪处理的氮素生理利用率(NPE)为 64.42 kg/kg, 显著高于化肥处理; 而单施鸡粪、猪粪处理的 NPE 与化肥处理相当, 平均为 55.14 kg/kg。与常规施肥量相比, 加倍施用鸡粪、猪粪和化肥处理的显著降低 NHI 值和 NPE 值, 而加倍牛粪处理的 NHI 与 NPE 值没有降低。牛粪、鸡粪、猪粪与化肥配施的处理间 NHI 与 NPE 值均未表现出显著性差异, 且与单施化肥的处理相当。常规施氮量下, 单施猪粪、鸡粪处理的氮素偏生产力(PFP)和回收率(NRE)接近, 均值为分别 39.67 kg/kg 和 41.85%, 达到了单施化肥处理的水平, 而牛粪处理的氮素 PFP 以及 NRE 仅为 29.08 kg/kg 和 15.6%, 显著低于化肥、鸡粪和猪粪处理。与常规施氮量相比, 加倍施用牛粪、鸡粪、猪粪和化肥处理的氮素的 PFP 值平均降低了 49.1%, 氮肥 NRE 值平均降低了 23.2%。牛粪、鸡粪、猪粪与化肥各配施比例处理的氮素 PFP 和 NRE 值均达到了单施化肥的水平。与单施化肥相比, 单施有机肥以及有机无机配施没有明显提高土壤全氮含量, 但显著提高有效磷和速效钾含量, 单施鸡粪、猪粪处理土壤表层有效磷含量分别是单施化肥处理的 5.82 和 7.06 倍。【结论】推荐施肥量下, 鸡粪或猪粪单独施用或配施少量化肥氮, 牛粪配施 75% 左右的化肥氮可实现与化肥相当的氮素利用效率, 同时提升土壤肥力。在实际生产中应根据有机肥特性调节有机肥与化肥配施比例, 实现有机肥的科学利用。

关键词: 有机肥类型; 有机无机配施; 冬小麦; 夏玉米; 氮素利用效率; 土壤养分

Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility

LI Yan-qing¹, WEN Yan-chen³, LIN Zhi-an³, ZHAO Bing-qiang^{2*}

(1 Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Fruit Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture/Key Laboratory for Efficient Utilization of Deciduous Fruit Mineral Nutrition and Fertilizer, Liaoning Province, Xingcheng, Liaoning 125100, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3 Dezhou Experiment Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015, China)

Abstract: 【Objectives】 There are obvious differences in composition and properties among different organic manures. The objectives of this study were to discuss the effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil nutrients and provide a theoretical basis for efficiently using

收稿日期: 2018-10-22 接受日期: 2019-01-19

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP); 辽宁省重点研发计划(2017301001)。

联系方式: 李燕青 E-mail: liyanqing@caas.cn; * 通信作者 赵秉强 E-mail: zhaobingqiang@caas.cn

different organic manures by optimizing fertilization techniques. **【 Methods 】** Eighteen fertilizer treatments included in this field experiment were: one chemical fertilizer treatment (farmer's N rate, N 225 kg/hm² per season); twelve treatments of organic manures (chicken manure, pig manure and cow manure) with chemical fertilizers (ratios of manure N in the total N input were 25%, 50%, 75% and 100%); four double farmer's rate treatments of three manures(chicken manure, pig manure and cow manure) and chemical fertilizer applied singly; one without any fertilizer treatment. The effects of different fertilization systems on nitrogen uptake, nitrogen use efficiency and soil fertility of crops were studied and discussed. **【 Results 】** Under farmer's N rate (225 kg/hm²), applying chicken manure or pig manure alone had similar nitrogen harvest index (NHI) and physiological efficiency (NPE) as treatments applying chemical fertilizer alone, NHI and NPE values of treatments applying cattle manure were 79.06% kg/kg and 64.42 kg/kg. Compared with farmer's N rate, the double rate of chicken manure, pig manure or chemical fertilizer decreased crops' NHI and NPE significantly, while the double rate of cattle manure did not decrease crops' NHI and NPE. The difference among various ratios of chicken manure and chemical fertilizer, pig manure and chemical fertilizer, cattle manure and chemical fertilizer was not significant. Under farmer's N rate (225 kg/hm²), applying chicken manure or pig manure alone had similar partial factor productivity (FPF) and recovery efficiency (NRE) as treatments applying chemical fertilizer alone. FPF average and NRE average of treatments applying chicken and pig manure were 39.66 kg/kg and 41.85% respectively, however, FPF and NRE of treatment applying cattle manure were 29.1 kg/kg and 15.6%. Compared with farmer's N rate, the double rate of cattle manure, chicken manure, pig manure or chemical fertilizer decreased crops' FPF and NRE by average of 49.1% and 23.2%, respectively. Moreover, all treatments combining cattle manure, chicken manure or pig manure with chemical fertilizer also had similar FPF and NRE as treatments applying chemical fertilizer alone. Applying organic manure alone or combining organic manure with chemical fertilizer could not increase soil total N content. High level of P and K content in organic manure resulted in more soil available K and P than treatments applying chemical fertilizer alone. Available P of treatments receiving chicken or pig manure was 5.82 or 7.06 times that of treatment receiving chemical fertilizer alone. **【 Conclusions 】** Under the recommended fertilization rate, chicken manure or pig manure should not be applied or combined with a small amount of nitrogen fertilizer, and cow manure with about 75% nitrogen fertilizer could achieve the same nitrogen use efficiency as chemical fertilizer, while improving soil fertility. In actual production, the proportion of manure and chemical fertilizer should be adjusted according to the characteristics of manure, so as to realize the scientific utilization of manure.

Key words: organic fertilizer type; organic and inorganic fertilizer; winter wheat; summer maize; nitrogen use efficiency; soil fertility

据估计,我国每年至少可产生 20 亿吨以上的畜禽粪便^[1]。如果这些畜禽粪便得不到合理处置,不仅是对有机废弃物资源的一种浪费,还会因堆放产生各种环境问题。这些畜禽粪便含有大量的有机质、农作物需要的氮磷钾和各种中微量元素。因此,将畜禽粪便经过简单处理作为肥料施入土壤是实现畜禽粪便科学资源化利用的重要方向之一^[2]。

畜禽粪便有机肥类型复杂多样,其成分和养分矿化过程均有所不同,因此对作物生长和土壤肥力的影响也明显不同。陈贵等^[3]5 年的田间定位试验结果表明,猪粪有机肥和牛粪有机肥在同等施用量(重量)条件下,猪粪有机肥与化肥减量配施或单独施用

时,水稻在生长和产量形成、养分吸收利用方面与常规化肥处理相比无显著性差异;牛粪有机肥与化肥配施和单独施用时,氮磷钾生理利用效率有所提高,但水稻产量和氮磷钾累积量均有不同程度下降;与化肥相比,牛粪处理和猪粪处理的土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量均有不同程度提升,等量猪粪处理土壤全氮、有效磷、速效钾提升程度大于牛粪有机肥,但有机质含量无明显差异。吴家梅等^[4]在保证了两种有机肥(鸡粪、猪粪)处理总施入碳含量一致,且通过添加尿素控制总施氮量与单施化肥处理一致的条件下,研究发现试验前两年有机肥处理的水稻产量与单施化肥处理没有显著性

差异, 第三年有机肥处理的水稻产量则显著超过了化肥处理的产量, 但鸡粪处理和猪粪处理之间没有显著性差异。周博等^[5]利用盆栽番茄试验, 在保证有机肥等氮施入条件下研究了鸡粪、牛粪、猪粪的氮素有效性, 结果发现鸡粪的平均氮素利用率和当量矿质氮率显著高于猪粪和牛粪。从以往的研究^[6-12]来看, 单一种类有机肥与及其与化肥配施后对土壤肥力、作物生长及环境方面影响的研究颇多, 且在试验设计中有机肥的施用量多以重量计, 未考虑到其中养分元素对化学肥料的替代问题。

氮效率是评价作物品种氮素吸收和利用的重要指标, 也是评价相关施肥制度的重要依据^[13]。根据研究对象和目的, 大致可分为反映施入肥料氮效益的指标(氮肥回收率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力等)和反映土壤中氮素效益的指标(氮素籽粒生产效率、氮素干物质生产效率、氮素收获指数、氮素运转效率)^[14]。土壤肥力是农业可持续发展的基础资源, 土壤培肥是建立科学施肥制度的重要内容^[15-16]。本文以农田中常用的牛粪、鸡粪和猪粪有机肥为试验材料, 在同一定位试验中设计等养分(全氮)条件下不同类型有机肥与化肥以不同比例配施试验。研究和讨论不同类型有机肥与化肥配施后对作物氮素吸收利用以及土壤养分含量的影响, 以期从氮效率和土壤培肥角度为建立科学的施肥制度提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

本试验位于山东省中国农业科学院禹城试验基地(116°34'E、36°50'N), 属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 13.4℃, > 10℃ 积温 4441℃, 年降水量 569.6 mm, 蒸发量 2095 mm, 无霜期 206 d。试验地土壤类型为盐化潮土, 土壤质地为轻壤土, 成土母质为黄河冲积物。种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制, 供试小麦、玉米品种分别为‘济麦 22’、‘郑单 958’。试验开始前土壤表层养分含量见表 1。

1.2 试验设计

试验设置 1 个不施肥对照(CK)。常规施肥处理采用当地推荐养分量, 即: 小麦和玉米每季施 N 225 kg/hm², 小麦季施 P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm²。常规养分量下, 设 1 个 100% 化肥对照(CF), 牛粪、鸡粪、猪粪的氮素比例分别为 25%、50%、75%、100% 的 12 个处理(CM25、CM50、CM75、CM100, CHM25、CHM50、CHM75、CHM100, PM25、PM50、PM75、PM100); 在常规养分量基础上, 设 4 个加倍施肥量单一肥料处理, 分别为高量化肥(DCF)、高量鸡粪(DCHM)、高量猪粪(DPM)、高量牛粪(DCM)。全部试验共 18 个处理, 随机区组设计, 每处理重复 3 次。小区面积 29.7 m² (4.5 m × 6.6 m)。

供试氮肥用尿素(N 46%), 磷肥为磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%), 钾肥用硫酸钾(K₂O 50%)。有机肥具体肥料用量根据所用粪肥风干样品中养分分析测定结果, 以全氮含量为标准折算, 经测定本试验 2014—2015 年度施用的三种有机肥具体养分含量及性质见表 2。试验从 2014 年 10 月小麦季开始。按照全年施肥总量, 化学氮肥在冬小麦、夏玉米每季作物各 50%, 每季作物中无机氮肥 50% 做基肥, 50% 做追肥, 小麦在拔节期追施, 玉米在 8 叶期追施。磷肥、钾肥和有机肥在冬小麦播前一次性施入, 常规有机肥与高量有机肥处理不再施用磷钾肥, 其余处理磷、钾肥根据化学氮肥的比例依次施入。各处理具体肥料用量及施用时期见表 3。

1.3 样品采集及测定

2015 年 10 月份玉米收获后于各小区内“S”形分别取 0—20 cm, 20—40 cm 层次 8 个点的土样混匀后, 风干, 磨碎过筛后按照常规方法测定土壤全氮、有效磷、速效钾含量。小麦玉米收获时, 在小区中间取有代表性的一行计算生物量产量, 调查构成因素。籽粒及秸秆样品粉碎后, 按照常规方法测定其氮、磷、钾含量。

1.4 数据处理及分析

氮素收获指数(NHI, %)=籽粒吸氮量/地上部吸

表 1 试验地基础土样养分含量

Table 1 Basic soil nutrients of the experiment soil

土层深度(cm) Soil layer	有机质(g/kg) Organic matter	全氮(g/kg) Total nitrogen	有效磷(mg/kg) Olsen-P	速效钾(mg/kg) Available K	pH
0—20	12.64	0.73	14.20	78.59	8.69
20—40	7.35	0.43	4.23	57.63	8.50

表 2 鸡粪、猪粪、牛粪养分含量

Table 2 Nutrition contents of chicken manure, pig manure and cow manure

有机肥 Manure	养分含量 Nutrient content (% , DW)				有机碳 (%) Organic C	C/N	含水量 (%) Moisture
	全氮 Total N	有效氮 Available N	全磷 Total P	全钾 Total K			
牛粪 Cow manure	1.55	0.02	0.96	1.98	20.0	12.9	70.0
鸡粪 Chicken manure	1.73	0.04	2.65	2.40	16.1	9.31	30.0
猪粪 Pig manure	2.72	0.05	3.95	1.96	22.5	8.27	70.0

表 3 各处理养分量 (kg/hm²)

Table 3 Details of nutrient input in each treatment

处理 Treatment	小麦季 Wheat season				玉米季 Maize season		
	有机肥氮 Manure N	化肥 Chemical fertilizer			化肥 Chemical fertilizer		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	追施氮 Top-dressing N	基施氮 Basal N	追施氮 Top-dressing N
CK	0	0	0	0	0	0	
CF	0	112.5	150	150	112.5	112.5	
CHM100	450	0	0	0	0	0	
PM100	450	0	0	0	0	0	
CM100	450	0	0	0	0	0	
CHM25	112	84.4	112	112	84.4	84.4	
CHM50	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	
CHM75	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	
PM25	112	84.4	112	112	84.4	84.4	
PM50	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	
PM75	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	
CM25	112	84.4	112	112	84.4	84.4	
CM50	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	
CM75	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	
DCF	0	225	300	300	225	225	
DCHM	900	0	0	0	0	0	
DPM	900	0	0	0	0	0	
DCM	900	0	0	0	0	0	

注 (Note) : CF—单施化肥 Chemical fertilizer; CM—牛粪 Cow manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure. 处理中的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in each treatment code represent the percentage of manure N in the total N input of the treatment.

氮量×100。

氮素生理利用率 (NPE, kg/kg)=籽粒产量/地上部吸氮量。

氮素生产力 (PFP, kg/kg)=籽粒产量/施氮量。

氮素回收率 (NRE, %)=(施氮处理吸氮量-未施氮处理吸氮量)/施氮量×100^[17]。

数据经 Excel 整理后作图, 并对数据进行方差分析, LSD 法多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同类型有机肥与化肥配施对作物吸氮量的影响

由图 1 可知, 施氮量为 450 kg/hm² 时, 施用猪粪处理的小麦和玉米地上部总吸氮量最高, 与施用鸡粪和化肥的处理差异达到了显著性水平, 施用牛粪处理的作物总吸氮量最低。施氮量为 225 kg/hm² 时, 施用鸡粪、猪粪的处理与化肥处理的作物总吸氮量没有显著性差异, 三者均显著高于施用牛粪处理。与常规施氮量相比, 高量施用化肥和牛粪没有显著提高小麦、玉米地上部总吸氮量, 而高量施用猪粪和鸡粪处理的地上部总吸氮量显著高于常规用量的猪粪和鸡粪处理。施氮量为 225 kg/hm² 时, 鸡粪和化肥配施的三个处理间、猪粪和化肥配施的三个处理间均未显示出显著性差异, 且与单施化肥的处理作物总吸氮量相当; 牛粪与化肥配施的三个处理中, 随着化肥比例的增加作物吸氮量呈增加趋势, 处理 CM25 和 CM50 的作物总吸氮量基本达到了单施化肥处理的总吸氮量水平。

2.2 不同有机肥化肥配施对作物氮素利用效率的影响

氮素收获指数 (NHI) 定义为成熟期籽粒中氮的累积量与植株氮累积量的比值, 反映了氮素在籽粒中氮素的分配比例。由表 4 可知, 施氮量为 450 kg/hm² 时, 猪粪处理 NHI 最低, 其次是施用鸡粪和化肥的处理, 牛粪处理的 NHI 最高, 显著高于施用猪粪和化肥的处理。施氮量为 225 kg/hm² 时, 施用牛

粪、鸡粪、猪粪处理的 NHI 与施用化肥处理的 NHI 没有表现出显著性差异。与常规施氮量相比, 高量施用牛粪、鸡粪处理的 NHI 没有明显降低, 而高量施用猪粪和化肥处理均降低了作物 NHI。施氮量为 225 kg/hm² 时, 各有机肥化肥的三个配施处理间 NHI 均未显示出显著性差异, 且与单施化肥处理也都没有表现出显著性差异。

氮素生理利用率 (NPE) 是籽粒产量与植株氮累积量的比值, 也被称作氮素籽粒生产效率, 反映了作物吸收的氮用于形成产量的能力。由表 4 可知, 施氮为 450 kg/hm² 时, 猪粪处理的 NPE 最低, 其次是施用鸡粪和化肥的处理, 牛粪处理的 NPE 最高, 显著高于施用鸡粪、猪粪和化肥的处理。施氮量为 225 kg/hm² 时, 鸡粪、猪粪处理的 NPE 与化肥处理没有显著性差异, 施用牛粪处理的 NPE 显著高于施用鸡粪、猪粪、化肥的处理。与常规施氮量相比, 高量施用鸡粪和猪粪均显著降低了 NPE, 而高量施用化肥和牛粪处理的氮素生理利用率均没有显著降低。施氮量为 225 kg/hm² 时, 牛粪和化肥配施的三个处理间、鸡粪和化肥配施的三个处理间、猪粪和化肥配施的三个处理间 NPE 均未显示出显著性差异, 且与单施化肥的处理没有显著性差异。

氮素偏生产力 (PFP) 定义为作物产量与氮肥施用量的比值, 反映的是单位施氮量所生产的作物籽粒产量。由表 4 可知, 施氮量为 450 kg/hm² 时, 施用鸡粪、猪粪和化肥处理的氮肥偏生产力略高于施用牛粪的处理, 但未表现出显著性差异。施氮量为 225 kg/hm² 时, 施用鸡粪、猪粪、化肥处理的氮肥偏生

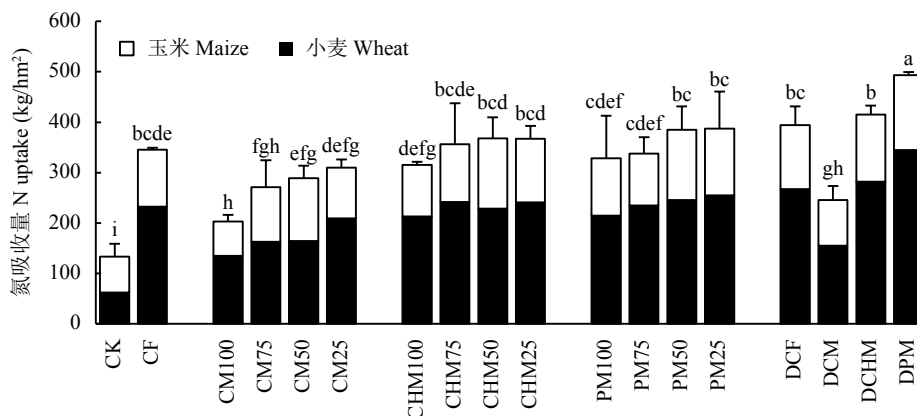


图 1 不同处理小麦和玉米吸氮总量

Fig. 1 Total N uptake of wheat and maize in each treatment

[注 (Note): CF—单施化肥 Chemical fertilizer; CM—牛粪 Cow manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure. 处理中的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in each treatment code represent the percentage of manure N in the total N input of the treatment. 方柱上不同小写字母表示处理间差异在 5% 水平显著 Different lowercase letters above the bars mean significant difference among treatments at the 5% level.]

表 4 不同处理氮素利用效率
Table 4 Nitrogen use efficiencies of different treatments

处理 Treatment	氮素收获指数 NHI (%)	氮素生理效率 NPE (kg/kg)	氮素偏生产力 PFP (kg/kg)	氮素回收率 NRE (%)
CK	74.08 ± 2.97 b	67.75 ± 5.99 a		
CF	79.36 ± 0.99 ab	52.19 ± 1.69 defg	40.09 ± 1.66 ab	47.19 ± 0.81 abc
CM100	78.60 ± 2.81 ab	64.42 ± 4.33 ab	29.08 ± 2.63 c	15.55 ± 2.87 fg
CM75	78.57 ± 1.46 ab	59.67 ± 8.05 abcde	35.31 ± 2.43 bc	30.64 ± 11.95 de
CM50	77.09 ± 2.60 ab	60.66 ± 4.92 abcd	37.04 ± 3.68 ab	34.57 ± 5.53 cde
CM25	79.77 ± 4.16 ab	59.12 ± 2.76 abcdef	40.72 ± 3.78 ab	39.19 ± 3.61 bcde
CHM100	78.78 ± 3.83 ab	56.70 ± 3.77 bcdef	39.65 ± 2.00 ab	40.40 ± 1.50 bcde
CHM75	78.52 ± 5.08 ab	53.37 ± 8.80 cdefg	41.21 ± 3.48 ab	49.59 ± 18.04 abc
CHM50	79.43 ± 4.01 ab	53.29 ± 5.60 cdefg	43.23 ± 1.17 a	52.17 ± 9.36 ab
CHM25	79.12 ± 0.90 ab	52.23 ± 6.53 defg	42.43 ± 2.84 a	52.05 ± 5.66 ab
PM100	79.50 ± 1.16 ab	56.54 ± 12.23 bcdef	39.68 ± 1.89 ab	43.31 ± 18.89 abcde
PM75	77.05 ± 0.90 ab	54.47 ± 5.14 cdefg	40.60 ± 0.45 ab	45.40 ± 7.34 abcd
PM50	74.81 ± 6.33 b	50.93 ± 6.71 efg	43.10 ± 1.44 a	55.94 ± 10.41 a
PM25	81.10 ± 3.93 a	49.80 ± 7.20 fg	42.13 ± 2.26 a	56.50 ± 16.32 a
DCF	73.80 ± 3.76 c	46.82 ± 1.85 gh	20.46 ± 1.13 d	29.33 ± 4.15 ef
DCM	77.94 ± 4.92 ab	62.41 ± 1.40 abc	18.49 ± 3.05 d	12.31 ± 3.10 g
DCHM	73.96 ± 3.56 bc	45.85 ± 1.94 gh	21.15 ± 0.65 d	31.36 ± 1.94 de
DPM	67.98 ± 5.34 c	39.22 ± 2.90 h	21.51 ± 1.43 d	40.06 ± 0.65 bcde

注 (Note): CF—单施化肥 Chemical fertilizer; CM—牛粪 Cow manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure. 处理中的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in each treatment code represent the percentage of manure N in the total N input of the treatment. NHI—Nitrogen harvest index; NPE—Nitrogen physiological efficiency; PFP—Partial fertilizer productivity; NRE—Nitrogen recovery efficiency; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column mean significant difference among treatments at the 5% level.

产力均显著高于施用牛粪处理。与常规施氮量相比, 高量施用牛粪、鸡粪、猪粪和化肥均显著降低了氮肥的偏生产力。施氮量为 225 kg/hm² 时, 牛粪配施化肥的三个处理间、鸡粪配施化肥的三个处理间、猪粪配施化肥的三个处理间均未表现出显著性差异, 且与单施化肥处理的 PFP 相当。单施鸡粪和猪粪处理的 PFP 平均为 39.67 kg/kg。

氮素回收率 (NRE) 定义为施氮区地上部氮素累积量与不施氮区地上部氮素累积量之差占施氮总量的百分比。由表 4 可知, 施氮量为 450 kg/hm² 时, 施用鸡粪、猪粪处理的氮素回收率高于施用化肥的处理, 但未表现出显著性差异, 三者均显著高于施用牛粪的处理。施氮量为 225 kg/hm² 时, 施用鸡粪、猪粪处理的氮素回收率略低于施用化肥的处理, 但未表现出显著性差异, 三者均显著高于施用牛粪的处理。与常规施氮量相比, 高量施用牛粪、

鸡粪、猪粪和化肥均明显降低了氮素的回收率。施氮量为 225 kg/hm² 时, 牛粪与化肥配施的三个处理间、鸡粪配施化肥的三个处理间、猪粪配施化肥的三个处理间氮素回收率均未表现出显著性差异, 且随化肥比例的增加氮肥利用率有升高的趋势。其中猪粪与化肥配施的三个处理、鸡粪与化肥配施的三个处理均与单施化肥的氮素回收率相当, 牛粪与化肥配施的三个处理中只有处理 CM25 和 CM50 的氮素回收率基本和单施化肥处理的相当。单施鸡粪和猪粪处理的 NRE 平均为 41.85%。

2.3 不同有机肥与化肥配施对土壤肥力因素的影响

化肥或有机肥单施、有机无机配施均可不同程度地提高土壤中全氮的含量 (表 5)。与常规施肥量相比, 高量施用化肥、牛粪、鸡粪和猪粪并未显著提高土壤中全氮的含量。限于试验年限较短, 施氮量

表 5 各处理 0—20 cm、20—40cm 土壤全氮、有效磷、速效钾含量

Table 5 Total N and available P and K contents in 0—20 cm and 20—40 cm deep of soils under different fertilizer treatments

处理 Treatment	全氮 Total N (g/kg)		有效磷 Available P (mg/kg)		速效钾 Available K (mg/kg)	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
CK	0.65 ± 0.05 bedef	0.38 ± 0.03 bc	16.52 ± 3.78 h	4.50 ± 0.43 g	82.37 ± 0.01 e	75.6 ± 7.61 ab
CF	0.78 ± 0.07 abcd	0.40 ± 0.03 bc	13.78 ± 4.35 h	4.55 ± 1.34 g	90.64 ± 2.86 de	73.94 ± 4.98 abc
CM100	0.82 ± 0.21 abc	0.48 ± 0.05 abc	22.32 ± 4.71 fgh	5.66 ± 1.97 fg	108.83 ± 15.16 cd	70.61 ± 5.75 bcd
CM75	0.66 ± 0.11 bcdef	0.40 ± 0.05 abc	23.59 ± 6.14 fgh	6.87 ± 1.57 cdefg	101.96 ± 0.44 cde	70.61 ± 7.61 bcd
CM50	0.84 ± 0.06 ab	0.46 ± 0.09 abc	21.06 ± 6.46 gh	5.08 ± 1.94 g	98.91 ± 7.58 cde	70.61 ± 2.88 bcd
CM25	0.54 ± 0.14 f	0.45 ± 0.13 abc	16.25 ± 5.19 h	5.70 ± 1.24 efg	93.94 ± 2.86 de	67.29 ± 7.61 cd
CM100~25	0.71 ± 0.12 A	0.45 ± 0.07 A	24.14 ± 6.23 C	5.99 ± 1.72 A	109.24 ± 19.78 A	69.78 ± 5.62 A
CHM100	0.65 ± 0.08 cdef	0.41 ± 0.11 abc	80.17 ± 21.20 cd	6.2 ± 0.57 cdefg	120.41 ± 17.43 bc	68.95 ± 0.01 bcd
CHM75	0.7 ± 0.07 bcdef	0.43 ± 0.05 abc	51.97 ± 9.12 def	8.12 ± 2.56 bcdef	90.64 ± 15.95 de	68.95 ± 0.01 bcd
CHM50	0.81 ± 0.08 abc	0.42 ± 0.13 abc	41.51 ± 19.26 efgh	5.63 ± 2.10 fg	102.21 ± 14.89 cde	68.95 ± 4.98 bcd
CHM25	0.58 ± 0.11 ef	0.42 ± 0.05 abc	23.16 ± 7.31 fgh	4.99 ± 1.40 g	97.25 ± 4.96 cde	70.61 ± 2.88 bcd
CHM100~25	0.68 ± 0.05 A	0.42 ± 0.01 A	49.2 ± 10.99 B	6.57 ± 0.95 A	102.63 ± 9.64 A	69.37 ± 1.9 A
PM100	0.75 ± 0.09 abcde	0.42 ± 0.03 abc	97.35 ± 18.12 c	8.54 ± 3.46 bcd	100.31 ± 7.51 cde	75.6 ± 5.75 ab
PM75	0.66 ± 0.08 bcdef	0.49 ± 0.05 ab	64.68 ± 15.42 de	9.89 ± 0.87 ab	100.56 ± 2.86 cde	75.6 ± 2.88 ab
PM50	0.72 ± 0.08 bcde	0.46 ± 0.05 abc	51.03 ± 17.87 defg	9.01 ± 2.54 bc	100.56 ± 12.49 cde	73.94 ± 4.98 abc
PM25	0.59 ± 0.07 ef	0.50 ± 0.03 ab	39.65 ± 21.95 efgh	6.12 ± 0.58 defg	90.64 ± 2.86 de	75.6 ± 2.88 ab
PM100~25	0.68 ± 0.05 A	0.47 ± 0.05 A	76.51 ± 9.99 A	8.39 ± 0.69 A	106.35 ± 12.05 A	75.18 ± 0.01 A
DCF	0.65 ± 0.20 bcdef	0.35 ± 0.06 c	17.35 ± 5.13 h	4.82 ± 0.74 g	96.79 ± 0.79 cde	68.95 ± 0.01 bcd
DCM	0.72 ± 0.08 bcdef	0.48 ± 0.07 ab	63.16 ± 29.79 de	7.93 ± 0.64 bcdef	158.45 ± 12.49 a	72.27 ± 5.75 bcd
DCHM	0.59 ± 0.09 def	0.44 ± 0.08 abc	132.59 ± 27.33 b	8.52 ± 2.16 bcde	141.91 ± 34.73 ab	65.63 ± 2.88 d
DPM	0.92 ± 0.15 a	0.52 ± 0.08 a	169.48 ± 42.98 a	12.25 ± 0.84 a	136.95 ± 37.46 ab	80.58 ± 7.61 a

注 (Note): CF—单施化肥 Chemical fertilizer; CM—牛粪 Cow manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure. 处理中的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例。CM100~25 代表 4 个牛粪氮比例处理; CHM100~25 代表 4 个鸡粪氮比例处理; PM100~25 代表 4 个猪粪氮比例处理; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 5% 水平差异显著; 同列数据后不同大写字母表示不同有机肥处理均值间在 5% 水平有显著性差异。The values in each treatment code represent the percentage of manure N in the total N input of the treatment. CM100~25 represent treatments of N percentage from cow manure; CHM100~25 represent treatments of N percentage from chicken manure; PM100~25 represent treatments of N percentage from pig manure; Values followed by different lowercase letters in a column mean significant difference among treatments at the 0.05 level; Values followed by different uppercase letters in a column mean significant difference among the average of three organic manure treatments at the 5% level.

为 225 kg/hm² 时, 不同有机肥各处理 0—20 cm、20—40 cm 土壤全氮含量均无显著性差异。

常规和高量施肥条件下, 在化肥处理的 0—20 cm、20—40 cm 土层有效磷含量与空白处理的有效磷含量均无显著性差异。常规施肥量条件下, 单施牛粪处理 0—20 cm 土壤有效磷含量是单施化肥处理的 1.62 倍, 单施鸡粪和猪粪处理的 0—20 cm 土壤有效磷含量显著高于牛粪和化肥处理, 分别是牛粪处理的 3.59 和 4.05 倍, 化肥处理的 5.82 和 7.06 倍; 20—40 cm 土壤单施鸡粪、牛粪和化肥处理有效磷含

量没有表现出显著性差异, 单施猪粪处理有效磷含量显著高于单施化肥和牛粪处理。高量施肥条件下, 牛粪处理 0—20 cm 土壤有效磷含量是化肥处理的 3.64 倍 ($P < 0.05$), 20—40 cm 土层差异不显著; 施用鸡粪和猪粪处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有效磷含量均显著高于化肥处理, 0—20 cm 土层有效磷含量分别是 DCF 的 9.77、7.64 倍 ($P < 0.05$)。三个牛粪与化肥配施处理中, 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有效磷含量与单施化肥处理相当; 鸡粪与化肥配施的三个处理以及猪粪与化肥配施的三个处理中,

粪肥比例较高处理的 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤有效磷含量均超过了单施化肥处理。三种粪肥处理均值间在 0—20 cm 土层有效磷含量均表现出显著性差异,猪粪处理均值最高,其次是鸡粪处理,牛粪处理均值最低;20—40 cm 土层有效磷含量没有显著性差异。

常规施肥和高量施肥条件下,化肥处理 0—20 cm、20—40 cm 土壤速效钾含量与对照无显著性差异。常规施肥条件下,单施牛粪、鸡粪、猪粪处理 0—20 cm 土壤速效钾含量分别是化肥处理的 1.20、1.32、1.11 倍,牛粪和鸡粪处理与化肥处理之间的差异显著;20—40 cm 土壤速效钾含量差异不明显。高量施肥条件下,单施牛粪、鸡粪、猪粪处理 0—20 cm 土壤速效钾含量均显著高于化肥处理,分别是化肥处理的 1.64、1.47、1.41 倍,20—40 cm 土壤速效钾含量差异不显著。有机肥与化肥配施的 9 个处理,0—20 cm、20—40 cm 土壤速效钾含量与化肥处理差异均未达显著水平。三种有机肥处理均值在 0—20 cm、20—40 cm 土壤速效钾含量也无显著性差异。

3 讨论

氮素收获指数 (NHI) 和生理利用率 (NPE) 分别反映了作物吸收氮素后在籽粒中的分配比例和作物吸收氮素后形成籽粒的能力。研究表明,在施氮量为 450 kg/hm² 时,施用牛粪处理的 NHI 和 NPE 均处于较高水平,主要原因可能是由于牛粪中氮的有效性很低,可供作物吸收的氮始终处于较低水平,进而导致施用牛粪处理的作物吸氮量处于较低水平(图 1),而较高的地上部氮素积累量往往会导致较低的氮素利用效率和氮素收获指数^[18-19]。施氮量为 225 kg/hm² 时,与施用化肥、鸡粪、猪粪的处理相比,施用牛粪处理的地上部氮素积累量仍然较低,其氮素利用效率仍处于较高的水平,可能是此施氮量条件下施用牛粪的处理提高了作物冠层利用所吸收的氮素进行干物质生产的能力。

氮肥利用率低是我国作物生产的突出问题,其中优化改善氮肥管理是提高氮肥利用率行之有效的措施之一。减少氮肥的损失、改善土壤氮素供应和作物氮素吸收的协同关系是氮肥管理的主要内容。一般而言,化肥氮可以迅速改善土壤氮的供应,但也有易损失的缺陷;有机肥中的氮素释放缓慢,不易损失,但也很难提供足够的氮素供作物吸收利用。研究表明,在等氮磷钾条件下,合理的有机无机配施可以显著提高作物氮肥利用率。李菊梅等^[20]的

研究发现,等 NPK 条件下有机无机各半配合施用水稻的氮肥利用率为 34.9%,显著高于化肥处理(33.2%)和有机肥处理(28.0%)。罗佳等^[21]研究了三种堆肥原料的有机无机复合肥处理的氮肥利用率,等氮磷钾条件下氮肥的回收效率、农学利用效率、生理效率和偏生产力均显著高于化肥处理。本研究发现,鸡粪和猪粪不论以何种比例与化肥配施,氮肥偏生产力和氮肥利用率均与单施化肥相当;低量牛粪与化肥配施的处理 CM25 和 CM50 的氮肥偏生产力和利用率基本和单施化肥处理相当,高量配施处理(CM75)的氮肥利用率显著低于单施化肥。此试验结果与陈贵等^[3]的研究结果有相似之处。这主要是由于相对于牛粪,鸡粪和猪粪在作物生长过程中具有较快的分解速率。另外,孟琳等^[22]的研究表明,氮的用量在 240 kg/hm² 以内,并且有机肥料氮占总氮量的 10%~20% 时,有机无机配施处理的氮素回收率、农学效率和氮素积累率均比单施化肥处理高或持平;周江明^[23]试验表明,有机肥比例为 20% 时,水稻氮素积累量达到高峰,氮素的回收利用量最高。因此,有机肥中氮素的有效性和有机肥料氮占总氮量的比例是决定有机无机配施是否可以提高作物氮肥利用率的重要因素。研究认为,有机无机之所以能在等氮磷钾条件下提高氮肥利用率的原因主要是合理的有机无机配施不仅改善了土壤的理化性质^[24],更重要的是改善了土壤的 C/N;合理的碳氮比能刺激土壤微生物的繁殖和活动^[25],相对于单施化肥的处理,有机无机配施为土壤微生物提供了额外的能源物质(有机碳),在施肥初期可利用微生物的增殖将过多的无机氮固定在微生物体内,从而避免了无机肥的无效损失;随着作物生长,需肥量增加,土壤中供微生物利用的能量和物质减少,微生物会大量死亡,释放出体内的氮素供作物吸收利用^[25-29]。单施有机肥由于有机氮释放缓慢,可能会导致早期土壤碳氮比过高,引起作物生长早期与微生物争氮的现象,从而影响氮素的供应。合理的有机无机配施可以实现土壤肥料供肥性与作物需肥时期的协调一致,在作物整个生育期内实现了养分的均衡稳定的供给,从而提高了氮肥的利用率^[30]。

不同有机肥物质组成及其转化过程中的合成产物不同,导致其对土壤的培肥效果也有所不同^[31]。艾天成等^[32]认为秸秆在改良土壤密度、硬度等土壤结构方面有显著效果,而饼肥、猪粪能提高土壤有机质含量。陈贵等^[3]研究表明牛粪处理和猪粪处理的土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量均有不同程度提升,等量猪粪处理土壤全氮、有效磷、速效钾提

升程度大于牛粪有机肥, 但有机质含量无明显差异。魏宇轩等^[33]研究了不同种类有机肥对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响, 发现化肥分别配施等量(重量)牛粪、鸡粪、猪粪和堆肥后, 堆肥处理土壤有机碳及 > 0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量均高于其它有机肥处理, 但牛粪、鸡粪和猪粪处理三者之间没有显著性差异。本试验中三种有机肥与化肥施用量是按照等氮量设计, 单施牛粪、鸡粪、猪粪的处理施入氮量一致。与猪粪和鸡粪相比, 牛粪中 N 的矿化释放更为缓慢因此更易保存在土壤中。由于本结果为田间试验第一年, 试验中误差因素导致土壤全氮含量在各有机肥单施处理之间的规律不明显。

李书田等^[34]的研究表明, 鸡粪、猪粪、牛粪中的磷含量 (P_2O_5) 分别比上世纪 90 年代增加 65.7%、93.7% 和 52.0%, 钾含量 (K_2O) 分别比上世纪 90 年代增加 139%、54.8% 和 71.9%。本文中单施化肥处理的 P_2O_5 和 K_2O 的投入量均为每年 150 kg/hm², 换算为 P 和 K 分别为 65.5 和 125 kg/hm²。等氮量条件下单施牛粪、鸡粪和猪粪处理带入 P 的量分别为 324、691 和 719 kg/hm², 分别是化肥处理的 4.9、10.6 和 11.0 倍; 带入 K 的量分别为 667、626 和 356 kg/hm², 分别是化肥处理的 5.3、5.0、2.9 倍。本试验中, 施用鸡粪第一年末, 0—20 cm 土壤有效磷和速效钾含量分别达到了 80.2 mg/kg 和 120mg/kg; 施用猪粪分别达到了 97.4 mg/kg 和 100 mg/kg, 施用牛粪土壤速效钾含量也达到了 109 mg/kg。推荐施肥条件下, 化肥处理 0—20 cm 土壤有效磷和速效钾含量分别为 13.8 mg/kg 和 90.6 mg/kg。施用鸡粪和猪粪处理使得土壤有效磷和速效钾含量均大量增加, 牛粪处理的速效钾含量也大量增加, 因此长期施用必然导致土壤中磷、钾的富集和累积。土壤中钾富集带来的负面效应较小, 而磷富集带来的问题需引起注意。因此, 在有机无机配施过程中应该避免或减少磷、钾化肥的施用, 减少资源浪费和环境风险^[35]。

4 结论

1) 推荐养分施用量下, 猪粪、鸡粪单独施用或与化肥配施对作物吸氮量、氮效率基本没有影响, 牛粪单独施用或与少量化肥 (25%) 配施降低了作物的吸氮量、氮素偏生产力和氮素回收率, 但提高了作物氮素生理利用率。

2) 牛粪、猪粪、鸡粪单施或与化肥配施没有明显提高土壤全氮含量。但单施猪粪和鸡粪处理土壤速效钾、有效磷含量及单施牛粪处理的土壤速效钾含量均明显超过了单施化肥。

3) 在实际生产中, 鸡粪或猪粪单施或配施少量氮肥, 牛粪配施约 75% 左右氮肥, 可以保证作物养分需求和土壤肥力的提升。

参 考 文 献:

- [1] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171–179.
Geng W, Hu L, Cui J Y, *et al.* Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 171–179.
- [2] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2016.
Li Y Q. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [3] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59–65.
Chen G, Zhang H M, Shen Y Q, *et al.* Application effects of swine and cow manures on rice yield, nutrient uptakes and use efficiencies and soil fertility[J]. Soils, 2018, 50(1): 59–65.
- [4] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 162–169.
Wu J M, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 162–169.
- [5] 周博, 周建斌. 不同种类有机肥氮素有效性研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 118–123.
Zhou B, Zhou J B. Nitrogen availability of different types of organic manure[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(2): 118–123.
- [6] 沈善敏. 国外的长期肥料试验 (二)[J]. 土壤通报, 1984, (3): 134–138.
Shen S M. Long term fertilizer experiment in foreign country (II) [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, (3): 134–138.
- [7] 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.
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, *et al.* Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2809–2819.
- [8] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306–311.
Zhao H, Yuan P M, Lv Y Z, *et al.* Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. Soils, 2011, 43(2): 306–311.
- [9] 陈茜, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同施肥处理对设施土壤团聚体内颗粒有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2009, 41(2): 258–263.
Chen Q, Liang C H, Du L Y, *et al.* Effects of different fertilization treatments on organic carbon contents of inter-aggregate particulate in greenhouse soil[J]. Soils, 2009, 41(2): 258–263.
- [10] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(4): 613–623.
- [11] 张平究, 李恋卿, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土表土微生物碳氮量及基因多样性变化[J]. 生态学报, 2005, 24(12): 2818–2824.

- Zhang P J, Li L Q, Pan G X, *et al.* Influence of long-term fertilizer management on topsoil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Tai Lake region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 24(12): 2818–2824.
- [12] 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.
- [13] 孙文彦. 氮肥类型和用量对不同基因型小麦玉米产量及水氮利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2013.
Sun W Y. Effects of types and rates of nitrogen fertilizers on yield of different wheat and maize varieties and corresponding water and nitrogen use efficiencies[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [14] 魏冬. 不同氮水平下水稻氮素利用率及相关性状的遗传基础研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2012.
Wei D. Genetic dissection of nitrogen use efficiency and related traits in rice at different nitrogen levels[D]. Wuhan, Hubei: PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2012.
- [15] 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.
Zhao B Q. Fertilization systems and land use sustainability[M]. Beijing: Science Press, 2012. 451–455.
- [16] 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.
Huang D F, Wang L M, Li W H, *et al.* Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 127–135.
- [17] 陆晓松, 于东升, 徐志超, 等. 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 488–495.
Lu X S, Yu D S, Xu Z C, *et al.* Study on comprehensive quantitative relationship of soil fertility quality and nitrogen application rate with wheat nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 488–495.
- [18] Ehdaie B, Waines J G. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat[J]. *Field Crops Research*, 2001, 73(1): 47–61.
- [19] Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, *et al.* Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 1998, 9(1): 11–20.
- [20] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田 NH_3 挥发和水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 51–56.
Li J M, Xu M G, Qin D Z, *et al.* Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(1): 51–56.
- [21] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 97–106.
Luo J, Jiang X F, Meng L, *et al.* Effects of chemical fertilizer and different composts on growth of oilseed rape and soil nitrogen supply[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 97–106.
- [22] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 532–542.
Meng L, Zhang X L, Jiang X F, *et al.* Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532–542.
- [23] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量, 品质及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 18(1): 234–240.
Zhou J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2011, 18(1): 234–240.
- [24] Li J T, Zhang B. Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 568–579.
- [25] Liang B, Yang X, Murphy D V, *et al.* Fate of ^{15}N -labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 977–986.
- [26] 韩晓日, 郭鹏程. 土壤微生物对施入肥料氮的固持及其动态研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(3): 412–418.
Han X R, Guo P C. Immobilization of fertilizer nitrogen by soil microbes and its changes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 412–418.
- [27] Kaewpradit W, Toomsan B, Cadisch G, *et al.* Mixing groundnut residues and rice straw to improve rice yield and N use efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2009, 110(2): 130–138.
- [28] Goyal S, Chander K, Mundra M C, *et al.* Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(2): 196–200.
- [29] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用[J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 136–142.
Li S Q, Li S X. Effects of organic materials on maintaining soil microbial biomass nitrogen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 136–142.
- [30] 商跃凤. 有机无机复混肥对水稻氮素利用率的影响[J]. *西南农业大学学报*, 2001, 23(3): 264–266.
Shang Y F. Influence of organic-inorganic compound fertilizers on nitrogen recovery in paddy rice[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2001, 23(3): 264–266.
- [31] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C, N, P 含量与分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 65–71.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle sizes[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5): 65–71.
- [32] 艾天成, 李方敏. 不同有机肥对土地平整后土壤肥力及水稻生育的影响[J]. *湖北农学院学报*, 2002, 22(3): 206–209.
Ai T C, Li F M. The effect of different organic fertilizers on soil fertility of the recovered land and the growth of rice[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2002, 22(3): 206–209.
- [33] 魏宇轩, 蔡红光, 张秀芝, 等. 不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 258–263.
Wei Y X, Cai H G, Zhang X Z, *et al.* Effects of different organic manures application on organic carbon and humus composition of aggregate fractions in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 258–263.
- [34] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 179–184.
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179–184.
- [35] 李国华. 我国畜禽粪便磷组分与土壤磷养分资源管理策略[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Li G H. Phosphorus fraction in animal manure and soil phosphorus management in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.