植物营养与肥料学报 2012,18(5):1127-1134
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期不同施肥对土壤各粒级组分中氮含量及分配比例的影响

申小冉[1,2], 徐明岗[1], 张文菊[1*], 吕家陇[2*], 王伯仁[1], 蔡泽江[1]
(1 农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081
2 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100)

摘要: 土壤培肥过程中氮素的积累和在各级土壤颗粒中的分配对了解土壤氮素积累机制和氮素的可持续管理具有重要意义。本研究以红壤旱地长期定位试验为基础,采用离心法分离土壤颗粒,通过分析氮素在土壤不同颗粒中的含量,研究长期施肥对土壤中不同粒级土壤氮的分配的影响。结果表明,施肥二十年后,在0—20 cm 土层,施肥处理的全氮含量在1.19～1.98 g/kg 之间,施肥处理全氮含量显著高于不施肥处理(CK)。在20—40 cm 土层,土壤全氮含量分布在0.59～0.84 g/kg 之间,显著低于表层土壤氮含量;在0—20 cm 土层,与氮磷钾化肥配施处理(NPK)相比,单施或者配施有机肥的土壤与砂粒、粗粉粒、细粉粒、粘粒结合的氮含量分别提高220%、84%、46%和26%。而在20—40 cm 土层,与NPK 处理相比,有机肥的施用仅提高了与细粉粒、粘粒结合的氮含量,降低了与粗粉粒结合的氮含量;在0—20 cm 土层中,红壤氮素主要分布在粘粒中。20—40 cm 土层CK、NPK 和氮磷钾配施加秸秆还田处理(NPKS)表现为与粗粉粒结合的氮的分配比例最高,而施用有机肥的处理氮素分布仍以粘粒占比例最高。相关分析表明,土壤表层<5 μm 粒级的土壤颗粒中氮含量和作物的经济产量呈显著性正相关。长期施用有机肥可以显著提高表层土壤全氮及与各个颗粒结合氮的含量,不同处理的氮主要保存在粘粒中。而亚表层土壤中,施化肥或者秸秆还田加速了粘粒结合态氮的耗竭,配施有机肥促进了氮在粘粒中的积累,也更有利于土壤全氮的积累,是可持续的氮素管理措施。

关键词: 长期施肥; 红壤; 土壤颗粒; 氮分配
中图分类号: S1532.3; S153.6+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)05-1127-08

Effect of various long-term fertilizations on soil nitrogen concentration and distribution percentage in particle-size fractions

SHEN Xiao-ran[1,2], XU Ming-gang[1], ZHANG Wen-ju[1*], LÜ Jia-long[2*], WANG Bo-ren[1], CAI Ze-jiang[1]
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Accumulation and distribution mechanism of nitrogen in soil particle-size during soil fertility development is of great significance for sustainable agricultural management practices. Based on the long-term fertilization experiment, soil particle-size fractionation was separated by supersonic and centrifugation to explore the impact of long-term fertilization on the soil nitrogen concentration and distribution. Results showed that, after twenty years of fertilization, total nitrogen concentration (TN) under all treatments ranged from 1.19 g/kg to 1.98 g/kg in the 0-20 cm layer. Compared to the CK, TN was increased significantly under all treatments. At the 20-40 cm soil layer, TN varied from 0.59 g/kg to 0.84 g/kg for all treatments, which was obviously lower than that of the 0-20

收稿日期: 2011-12-01　　**接受日期:** 2012-06-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(40901141,40871148); 国家重点基础研究发展计划("973"计划)(2011CB100501); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2011-4)资助。
作者简介: 申小冉(1987—),女,河南新乡人,硕士研究生,主要从事土壤培肥方面的研究。E-mail: shenxiaoran041@126.com
*通讯作者 Tel: 010-82108661, E-mail: wjzhang@caas.ac.cn; E-mail: lj111@nwsuaf.edu.cn

cm surface soil; Nitrogen concentration in the sand, coarse silt, fine silt, and clay particle-size fractions for the treatments combined with manure were increased by 220%, 84%, 46%, and 26% compared to the NPK treatment with the same amount of nitrogen fertilizer in 0-20 cm soil layer. In 20-40 cm soil layer, compared to the NPK, nitrogen concentration in fine-silt and clay particles were improved, whereas nitrogen concentration declined in coarse-silt particles under the treatments combined with organic manure; Soil nitrogen mainly associated with clay particles under the 0-20 cm layer. While in the 20-40 cm layer, there was much higher proportion of nitrogen associated with coarse-silt fraction under the CK, NPK and NPKS, clay particle contained the main part of nitrogen under the treatments with organic manure. There was significant positive linear correlation between crop grain yield and soil nitrogen concentration in the < 5 μm size fractions under top soil. In 0-20 cm layer, application of organic manure can significantly increase soil nitrogen concentration in bulk soil and particle-size fractions. Soil nitrogen was mainly associated with clay particle in red upland soil for all the treatments. In the 20-40 cm soil layer, application of mineral fertilizers with and without straw incorporation has no effects on nitrogen accumulation in clay size faction. Manure application greatly promotes the nitrogen accumulation in clay size fraction, acting as a sustainable soil nitrogen management practice.

Key words: long-term fertilization; red soil; soil particles; nitrogen distribution

氮素是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素，也是人为投入到土壤中数量最多的营养元素[1]。施肥通过影响土壤氮素水平和土壤氮的供应，进而影响作物的产量[2-4]。因此，了解和掌握长期施肥对土壤氮素与组分的影响及其与作物生产之间的关系，对于掌握土壤氮素演变规律、指导田间土壤氮素管理具有重要的理论和实际意义。不同的土地利用方式[5]、耕作方式[6]和施肥方式对土壤颗粒中的氮含量有着显著的影响。大量长期定位试验表明施用有机肥能显著提高土壤的氮素水平[7]，而且长期施用有机肥、有机无机肥配施及化肥均衡施用均可以提高土壤颗粒氮及矿质结合态氮的含量[8]。在土壤氮素水平较高的东北棕壤和黑土上的长期试验结果也表明，增施有机肥后，土壤各粒级氮含量均有显著增加，而粘粒级氮占总土壤氮的比例最大[9-10]。一般而言，砂壤质土壤上颗粒氮(PON)占土壤全氮含量的30%～37%[11]。但氮素在不同大小土壤颗粒中的分布对土壤类型和管理措施的响应也存在明显差异。西北地区侵蚀性旱地黄绵土中，土壤有机碳、氮主要分布在<50 μm的粘粒和粉粒中[12]。而长期施肥研究结果表明，紫色土中氮在<53 μm粉粒和粘粒组分中分布比例最小[13]。通常认为，土壤有机氮在<2 μm的颗粒中的分布比例相对较低，在2～10 μm、10～50 μm粒级中的分布比例较高[14]。有研究结果表明，施肥34年后，土壤有机碳和氮素以粘粒部分含量最高，其次是粉粒，最小的是砂粒[15]。土壤养分和颗粒组成的关系研究发现，四川紫色土中全氮与粉粒之间呈显著的正相关关系，与砂粒之间呈显著的负相关[16]。然而也有相反的研究结果发现黑土全氮含量与粉粒之间极显著正相关，而与粘粒极显著负相关[17]。施入土壤中的肥料氮在土壤中的转化和分布是一个渐进的过程，因肥料性质的差异，肥料中氮在土壤中的分布特点也不相同。施肥后无机肥中的氮在50～100 μm和>100 μm粒级中分布的比例小于有机肥中的氮[18]。施入土壤的无机肥中的氮主要进入粘粒，而有机肥氮则有40%～50%进入2～10 μm粒级[19]。红壤是我国南方典型地带性土壤，土壤肥力贫瘠，土壤有机质和养分含量水平较低。本文利用长期定位试验平台，试图通过二十年的培肥，探讨不同施肥条件下氮素在表层和亚表层土壤颗粒中的分布特征，研究不同施肥措施下土壤氮素在不同大小颗粒组分中的分配，探讨长期施肥对土壤颗粒中氮组分的影响及其与作物生产之间的关系，以期能够深入了解土壤氮素积累机制。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自中国农业科学院红壤试验站(湖南祁阳，东经111°52′，北纬26°45′)，是我国亚热带地区具有富铝化特征的地带性土壤，成土母质为第四纪红土。该长期试验起始于1990年，试验起始时的土壤有机碳含量为7.47 g/kg、全氮1.07 g/kg、全磷0.45 g/kg、速效氮79 mg/kg、有效磷10.8 mg/kg、速效钾122 mg/kg、土壤pH值5.7；土壤矿物颗粒组成为砂粒11.9%、粗粉粒35.0%、细粉粒

10.9%、粘粒 41.0%,为壤质红壤。

1.2 试验设计

本研究包括 6 个长期施肥处理:1)不施肥(CK);2)氮、磷、钾化肥配施(NPK);3)氮、磷、钾化肥与有机肥配施(NPKM);4)氮、磷、钾化肥配施+作物秸秆还田(NPKS);5)增量氮、磷、钾化肥+增量有机肥(是处理 3)的 1.5 倍施肥量(1.5NPKM);6)单施有机肥(M)。其中处理 3)和 6)的总施氮量与处理 2)相同,即以部分或者全部的有机肥氮替代化肥氮,不考虑有机肥中的磷、钾养分。有机肥为新鲜猪粪。秸秆还田处理为每季作物秸秆的一半还田,未考虑秸秆的养分投入。肥料在整地之前全部以基肥的形式施入。小区面积 196 m^2,每个处理 2 次重复。种植方式均为小麦-玉米轮作,一年两熟,具体施肥量见表 1。

于 2010 年 5 月小麦收获后采集土样,分 0—20 cm 和 20—40 cm 两个层次进行采样,每个小区重复 3 次。土壤采集后在室内风干、磨碎。一部分过 2 mm 筛备用,在研磨过程中去除大于 2 mm 的有机物和砂砾;一部分过 0.25 mm 筛进行全量有机碳和氮素的测定。

表 1　不同处理下化肥与有机肥的施用量(kg/hm^2)

Table 1　The application rate of mineral fertilizers and organic N amendments

处理 Treatment	小麦季 Wheat season				玉米季 Corn season			
	N	P_2O_5	K_2O	有机氮 Organic N	N	P_2O_5	K_2O	有机氮 Organic N
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	90	36	36	0	210	84	84	0
NPKM	27	36	36	63	63	84	84	147
1.5NPKM	40.5	54	54	94.5	94.5	126	126	220.5
NPKS	90	36	36	4.95±2.37*	210	84	84	15.96±9.74*
M	0	0	0	90	0	0	0	210

注(Note):*秸秆还田的含氮量数据是从 1997～2008 年的平均值 The nitrogen content data of straw is the mean between 1997-2008 years.

1.3 测定方法

土壤有机碳、全氮含量采用元素分析仪(利曼公司,EA3000)测定。

土壤颗粒分级采用改进的 Anderson[20] 和武天云等[21]的分组方法:称取 10 g 过 2 mm 筛的风干土样于 250 mL 烧杯,加水 100 mL,在超声波发生器清洗槽中超声分散 30 min,然后将分散悬浮液冲洗过 53μm 筛,直至洗出液变清亮为止。过筛得到砂粒(53～2000μm)和部分植物残体。过 53μm 筛的粘粉粒根据 Stockes 定律计算每一个粒级分离的离心时间,用离心机对洗出液进行离心。通过不同的离心速度和离心时间分离得到粗粉粒(5～53 μm)、细粉粒(2～5 μm)、粘粒(<2μm)。离心过程中粗粉粒为离心管底部沉淀,直接转移至铝盒;细粉粒和粘粒为悬液,采用 0.2 mol/L $CaCl_2$ 絮凝,再离心收集。各组分转移至铝盒后,先在水浴锅上蒸干,然后置于烘箱内,60℃下 12 h 烘干。烘干后各组分磨细,用元素分析仪测氮含量。

试验结果采用 Excel 和 SPSS(11.5)软件进行统计与分析,处理间差异性检验采用 $LSD_{0.05}$ 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤全氮含量的影响

施肥 20 年后,不同施肥处理下表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)土壤全氮含量存在显著差异(图 1)。与不施肥(CK)相比,各施肥处理土壤全氮含量显著提高,增加幅度在 25%～108%之间。在亚表层,土壤全氮含量在 0.59～0.84 g/kg 之间,明显低于表层土壤的全氮含量,仅为表层全氮含量的 37%～63%。单施有机肥或有机无机肥配施能显著提高亚表层土壤的全氮含量,且有机肥的施用更有利于全氮的积累。NPK 和 NPKS 处理对亚表层的全氮含量均无明显影响。另外,由于高量的有机无机肥配施条件下,作物产量明显提高,作物带走了更多的氮,也不利于土壤亚表层氮的积累,与 CK 相比无显著差异。

2.2 长期施肥对红壤不同颗粒中氮含量的影响

从图 2 可以看出,长期不同施肥显著影响了土

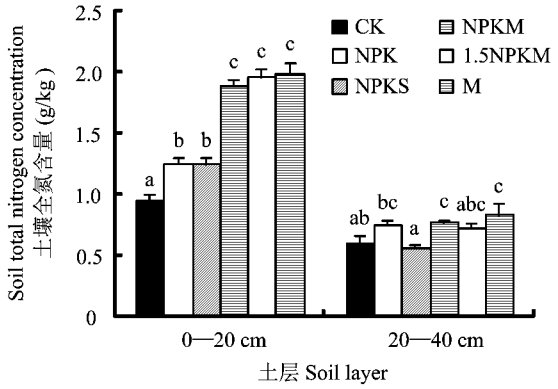

图1 施肥20年后红壤全氮含量

Fig. 1 Total nitrogen concentration under fertilizations in red soil after 20 years

[注(Note):柱上不同字母表示同一土层不同施肥处理间在5%水平下差异显著 Different letters above the bars are significantly different within a soil layer among the treatments at the 5% level.]

壤各粒级中氮的含量。在表层土壤,与CK相比,长期施用秸秆和有机肥显著提高砂粒中的氮含量。施肥20年后,NPK和NPKS处理下的砂粒组分中氮含量相当于CK的1.4和3倍。M、NPKM和1.5NPKM处理土壤砂粒组分中氮含量相当于CK的4～5倍;NPK和NPKS处理下细粉粒组分中氮含量比CK的提高了10%～40%,而NPKM、1.5NPKM和M处理是CK的2.4～2.8倍;NPK和NPKS处理粘粒组分中氮含量比CK的高10%～25%,而NPKM、1.5NPKM和M处理粘粒组分中氮含量比CK的高50%;单施化肥只能显著提高细粉粒和粘粒组分中的氮含量,对砂粒和粗粉粒组分中氮含量没有显著影响。在土壤粗粉粒组分中施用有机肥的处理氮含量显著高于CK、NPK和NPKS处理。与NPK处理相比,施有机肥处理其砂粒、粗粉粒、细粉粒、粘粒组分中全氮含量分别提高了220%、84%、46%和26%。

长期不同施肥红壤表层颗粒组分中全氮含量因粒级大小不同而存在显著差异,长期施肥所有处理中,与粘粒组分结合的氮含量都明显高于砂粒和粉粒组分,粘粒组分氮含量在0.59～0.92 g/kg土之间。粘粒组分氮含量的平均值分别是砂粒、粗粉粒、细粉粒组分平均值的5.2、4.6、4.3倍。在CK和NPK处理中与粉粒结合的氮含量显著高于砂粒结合氮含量。而有机肥或秸秆配施化肥的处理中砂粒、粗粉粒和细粉粒结合氮的含量无显著差异。

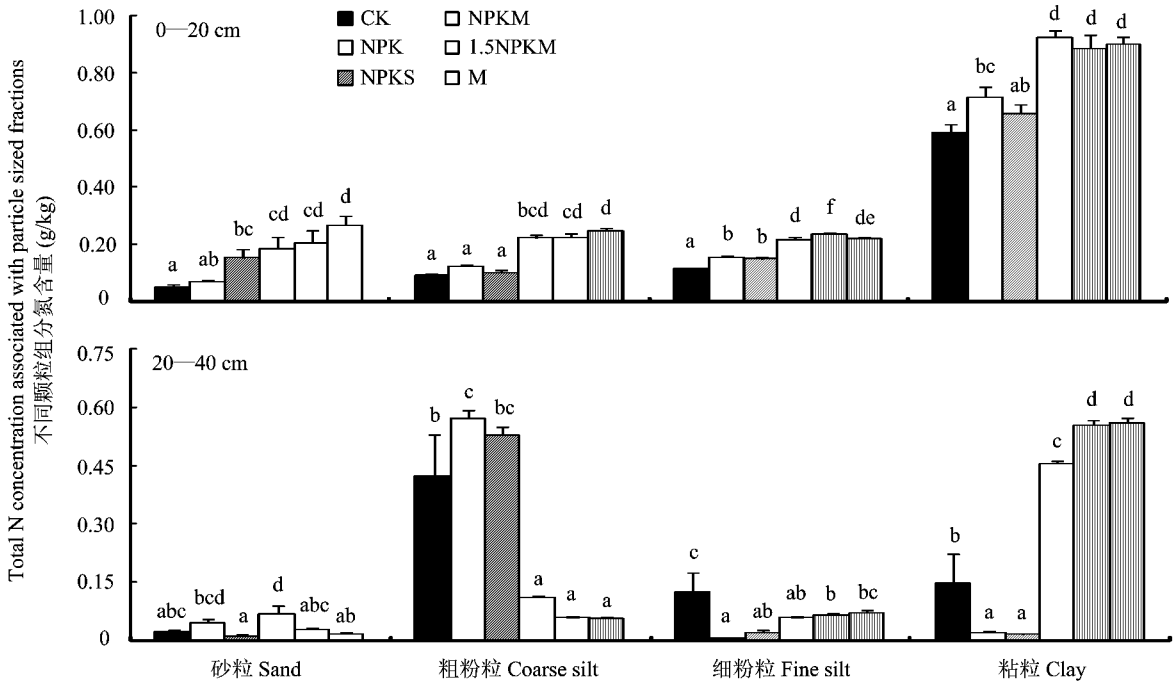

图2 施肥20年后红壤旱地表层(0—20 cm)和亚表层(20—40 cm)中不同土壤颗粒结合态氮含量

Fig. 2 The total nitrogen concentration associated with particle sized fractions soil under surface (0–20 cm) and subsoil (20–40 cm)

[注(Note):柱上不同小写字母表示同一颗粒不同施肥下在5%水平差异显著 Different small letters above the bars are significantly different at the 5% level in the same particle-size fractions soil ($P<0.05$).]

红壤亚表层颗粒氮含量变异较大,在 0.01 ～ 0.07 g/kg 土之间(见图 2)。砂粒 NPKS 处理结合氮含量最低,有机无机配施处理最高; 粗粉粒中 NPK 处理氮含量最高,CK、NPK 和 NPKS 处理氮含量显著高于有机肥处理(M),分别是 M 处理的 5.6、7.5 和 6.9 倍。细粉粒结合氮含量则以 CK 最高,达到 0.13 g/kg 土。配施有机肥和单施有机肥的细粉粒氮含量在 0.06 ～ 0.07 g/kg 之间,是 NPK 处理的 6 ～ 7 倍; 粘粒中氮含量在 0.02 ～ 0.56 g/kg 土之间,化肥配施有机肥处理的氮含量显著高于 NPK 和 NPKS,约是 NPK 和 NPKS 处理的 23 ～ 28 倍。

在亚表层,长期不同施肥对红壤颗粒分布的影响与表层存在一定的差异。CK、NPK 和 NPKS 处理下的粗粉粒氮含量显著高于其他组分,而其他三组分砂粒、细粉粒和粘粒之间则没有显著差异。不同的是在 NPKM、1.5NPKM 和 M 处理能显著提高亚表层与粘粒结合氮的含量。

2.3　红壤不同大小颗粒中的氮分配比例

长期施肥对土壤全氮在表层和亚表层的分配存在明显差异(表 2)。红壤表层氮在粘粒中的分配比例最高,平均达到 61.76%,可见粘粒是表层氮素赋存的主要组分。其中,CK 处理的粘粒分配比例显著高于化肥配施秸秆或者有机肥处理的,说明配施有机肥或秸秆还田显著降低氮在粘粒组分中的分配。CK 处理砂粒氮所占比例最低为 5.5%,M 处理砂粒氮所占比例最高为 16.1%,配施有机肥或秸秆处理的砂粒氮比例显著高于 CK 和 NPK 处理。粗粉粒和细粉粒氮所占比例基本相当,均值分别为 12.87% 和 14.31%; 粗粉粒氮,NPKM 和 1.5NPKM 处理显著高于 CK、NPK 和 NPKS; 细粉粒氮所占比例在 13 ～ 15% 之间,且不同处理之间无显著差异。在化肥配施秸秆和有机肥的处理中砂粒和粉粒全氮分配比例之间无显著差异,而在 CK 和 NPK 处理中氮在粉粒上分配比例相当于砂粒的 2 ～ 2.5 倍左右。

长期不同施肥下,亚表层不同处理的氮在不同颗粒上的分配存在有明显差异。CK、NPK 和 NPKS 处理的氮素在粗粉粒中的分配比例最高。而施用有机肥后,氮仍以在粘粒中的分配比例最高; 与 CK 相比,发生严重酸化的 NPK、NPKS 处理其亚表层氮素在粘粒中的分配由 20.1% 降低到 3.1% 和 2.8%,而在粗粉粒中的分配比例由 59.5% 上升到 89.0% 和 91.6%。相反的是有机肥处理的氮素在粘粒中分配比例上升,在粗粉粒中下降。说明施化肥或者秸秆还田加速了粘粒结合态氮的耗竭,配施有机肥促进了氮在粘粒中的积累。

表 2　长期施肥下全氮在红壤表层和亚表层颗粒中的分配比例(%)

Table 2　Proportion of total N associated with particle sized fractions under various long-term fertilization treatments in surface soil and subsoil layers

土层 Soil layer	颗粒 Particle	处理 Treatment					
		CK	NPK	NPKS	NPKM	1.5NPKM	M
表层	砂粒 Sand	5.5 ±1.2 a	6.3 ±0.3 ab	14.0 ±2.6 cd	11.9 ±2.4 bcd	13.0 ±2.3 cd	16.1 ±1.7 d
Surface	粗粉粒 Coarse silt	11.0 ±0.8 ab	11.8 ±0.1abc	9.7 ±0.3 a	14.4 ±0.8 cd	14.6 ±0.1d	15.1 ±0.3 d
(0—20 cm)	细粉粒 Fine silt	13.6 ±0.9 a	14.6 ±0.8 ab	14.2 ±0.6 ab	14.7 ±0.7 ab	15.4 ±0.4 ab	13.7 ±0.4 a
	粘粒 Clay	70.0 ±0.8 d	67.3 ±0.8 cd	62.2 ±2.7 bc	59.6 ±1.3 ab	57.1 ±2.1 ab	55.2 ±1.5 a
亚表层	砂粒 Sand	3.2 ±0.4 ab	7.1 ±1.3 cd	2.2 ±0.1 a	9.8 ±2.4 d	4.0 ±0.5 abc	2.5 ±0.3 a
Subsoil	粗粉粒 Coarse silt	59.5 ±15.5 b	89.0 ±1.5 c	91.6 ±1.2 c	16.0 ±0.3 a	8.6 ±0.1 a	8.1 ±0.3 a
(20—40 cm)	细粉粒 Fine silt	17.2 ±6.2 d	0.8 ±0.1 a	3.4 ±1.0 ab	8.6 ±0.3 bc	9.4 ±0.2 bc	10.0 ±0.7 bc
	粘粒 Clay	20.1 ±9.7 b	3.1 ±0.4 a	2.8 ±0.1 a	65.7 ±1.9 c	78.1 ±0.4 d	79.4 ±0.6 d

注(Note): 同一行数值后不同字母表示不同处理相同颗粒氮在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in same row are significantly different at the 5% level ($P<0.05$).

2.4　长期施肥下作物产量与颗粒氮含量之间的关系

红壤旱地施肥 20 年,不同处理的平均经济产量与不同大小颗粒中氮含量之间的相关分析表明,表层土壤与细粉粒和粘粒组分结合的氮含量与作物经济产量具有显著正线性相关关系(表 3)。而年均作

物经济产量与表层土壤的砂粒和粗粉粒氮组分含量无相关性,且亚表层各级颗粒组分的氮含量与作物经济产量没有相关性,表明只有土壤表层 <5 μm 粒级的土壤氮组分含量对作物的经济产量有着显著的影响。

表3 不同颗粒氮含量与作物年均经济产量(玉米+小麦)之间的相关性

Table 3 The correlation coefficient between total N associated with particle sized fractions soil and yield (corn + wheat)

土层 Soil layer	粒级 Particle	相关系数(n=6) r	土层 Soil layer	粒级 Particle	相关系数(n=6) r
表层 Surface (0—20 cm)	砂粒 Sand	0.71	亚表层 Subsoil (20—40 cm)	砂粒 Sand	0.34
	粗粉粒 Coarse silt	0.73		粗粉粒 Coarse silt	-0.60
	细粉粒 Fine silt	0.88**		细粉粒 Fine silt	-0.42
	粘粒 Clay	0.82*		粘粒 Clay	0.59

注(Note): ** 表示线性关系极显著相关 Showed extremely significant correlations between total N associated with particle sized fractions soil and yield ($P<0.01$), * 表示线性关系显著相关 Showed significant correlations ($P<0.05$).

3 讨论

本研究结果表明,在表层土壤,与砂粒、粉粒和粘粒结合的氮在长期等量施氮条件下对有机肥的响应最为敏感,有机肥对各个粒级的氮积累都有显著的促进作用。在轻壤质黄潮土和肥沃的泥灰土上的长期定位试验中也得到了相似的结论[8,15]。长期施用有机肥通过自身有机物的输入和间接的提高农作物残茬还田量来增加土壤有机碳和氮,其中有机肥中难降解物质和未完全降解的植物残留物主要在砂粒中积累,而小粒级中有机碳和氮则多数是输入有机质矿化后积累所得[22]。

本研究表明配施有机肥或秸秆还田处理显著提高了表层土壤氮在砂粒中的分配比例,而显著降低了土壤氮素在粘粒中的分配比例,对介于5～2 μm粒级氮的分配比例无显著影响,这与已有的研究结果基本一致[23]。一般认为,无机氮进入土壤后,首先被吸附于较细的粒级中,随着时间的推移,这些氮可在微生物或作物根系作用下以生物体或生物死亡残体的形式存在于较粗的粒级中。而有机肥中的氮则在微生物的作用下,一部分转化为无机氮进入较小粒级中,而未分解部分则仍残留于较粗粒级中,有机肥的施入促进了砂粒氮的含量。已报道的相似的结果为无机肥氮在 >100 μm 粒级中的分配比例小于有机肥[18]。不同的发现是在土壤亚表层,与施有机肥的处理相比,施化肥及秸秆还田(NPK 和 NPKS)显著提高了与粗粉粒结合氮的含量,加速了粉粘粒氮的耗竭,其原因可能与 NPK 及 NPKS 处理的土壤产生酸化,导致亚表层土壤团聚体结构破坏有关。

相关分析表明,作物的籽粒产量与土壤颗粒(砂粒,粗粉粒)结合的氮无明显相关性,而与小颗粒(细粉粒和粘粒)结合的氮呈显著相关。已有研究结果表明,粘粒中氮素较其他粒级更容易矿化[24],土壤小颗粒结合的氮对作物氮的供应起着至关重要的作用。且土壤颗粒中 <50 μm 粒级的氮素决定着土壤氮素供应能力的强弱[14]。已有研究发现,小粒级和大粒级的微团聚体在提供植物素营养方面有着不同的功能;较小的微团聚体有较好的储备能力,而较大粒级的微团聚体中则有机质易矿化,其养分的供应能力强[25-26]。黄东迈等试验结果表明,化肥氮较多地结合在碱可馏出态氮和氨基酸氮部分,有效性高而积累不多,化肥对改善土壤的供氮容量作用不大,但具有更新土壤氮素的作用[27]。当化肥与有机肥配合施用时,有机肥在土壤中的残留量相对较高,从而增加了土壤有机氮库的总量。因此有机无机肥配施是提高土壤氮库最合理的施肥措施。

4 结论

1) 单施或配施有机肥显著促进了表层 0—20 cm 和亚表层 20—40 cm 土壤全氮的积累,等氮条件下有机氮肥的施用更有利于土壤氮的积累。所有施肥处理的表层氮含量都明显高于亚表层土壤。

2)在 0—20 cm 表层土壤不同施肥处理的氮主要分布于粘粒中,有机肥的长期施用不仅可以显著提高与各个粒级土壤颗粒结合氮的含量,且显著提高了土壤氮素在砂粒、粗粉粒中的分配比例,但显

著降低了氮在粘粒中的分配比例。

3)20—40 cm 土壤亚表层中,长期施化肥或秸秆还田处理氮主要固存在粗粉粒中,而配施有机肥处理显著提高了氮素在粘粒中的分配比例。

4)0—20 cm 表层土壤 <5 μm 粒级的土壤氮组分含量与作物多年的平均产量呈显著的正相关关系,对于作物增产具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] 朱霞，韩晓增，王凤菊. 黑土区长期施肥后土壤供氮能力与氮肥利用特征的研究[J]. 农业系统科学与综合研究，2010，26(1)：59-62.
Zhu X, Han X Z, Wang F J. The characteristics of nitrogen use efficiency and soil nitrogen supplying after long-term fertilization in black soil[J]. System Sci. Compr. Stud. Agric., 2010, 26(1): 59-62.

[2] 徐阳春，沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响[J]. 土壤学报，2004，41(1)：87-92.
Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizeron supplying characteristics of nitrogen in soil and soil particle fractions[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(1): 87-92.

[3] 唐国勇，黄道友，童成立，等. 土壤氮素循环模型及其模拟研究进展[J]. 应用生态学报，2005，16(11)：2208-2212.
Tang G Y, Huang D Y, Tong C L *et al*. Research advances in soil nitrogen cycling models and their simulation[J]. Chin. J. Appl. Ecol. 2005, 16(11): 2208-2212.

[4] 胡诚，曹志平，胡菊，李双来. 长期施用生物有机肥土壤的氮矿化[J]. 生态学报，2009，29(4)：2080-2086.
Hu C, Cao Z P, Hu J, Li S L. Soil nitrogen mineralization in long-term application of biological-organic manure[J]. Acta Ecol. Sin. 2009, 29(4): 2080-2086.

[5] 王彩霞，岳西杰，葛玺祖，等. 保护性耕作对土壤微团聚体碳、氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(3)：642-649.
Wang C X, Yue X J, Ge X Z *et al*. Effects of conservational tillage measures on distributions of organic carbon and nitrogen in soil microaggregates[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 642-649.

[6] 刘晓利，何园球，李成亮. 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报，2009，46(2)：255-262.
Liu X L, He Y Q, Li C L *et al*. Distribution of soil water-stable aggregates and soil organic C, N and P in upland red soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2009, 46(2): 255-262.

[7] 陈盈，闫颖，张满利，等. 长期施肥对黑土团聚化作用及碳、氮含量的影响[J]. 土壤通报，2008，39(6)：1288-1292.
Chen Y, Yan Y, Zhang M L *et al*. Effect of long-term fertilization on aggregation and carbon and nitrogen contents in mollisol[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(6): 1288-1292.

[8] 龚伟，颜晓元，蔡祖聪，等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. 应用生态学报，2008，19(11)：2375-2381.
Gong W, Yan X Y, Cai Z C *et al*. Effects of long-term fertilization on soil particulate organic carbon and nitrogen in a wheat maize cropping system[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(11): 2375-2381.

[9] 闫颖，解宏图，何红波，等. 有机肥对黑土不同粒级有机碳、氮的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报，2006，25(11)：330-333.
Yan Y, Xie H T, He H B *et al*. Effects of manure application on distribution of organic C and total N in bulk black soil and particle-size fractions[J]. J. Liaoning Technol. Univ., 2006, 25(11): 330-333.

[10] 闫颖，何红波，白震，等. 有机肥对棕壤不同粒级有机碳和氮的影响[J]. 土壤通报. 2008，39(4)：738-742.
Yan Y, He H B, Bai Z *et al*. Effect of manure application on the organic C and N in brown earth and particle-size fractions[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(4): 738-742.

[11] Elise'e O, Abdoulaye M, Leo S. Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertilizer on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid west Africa[J]. Soil Till. Res., 2006, 91: 57-67.

[12] 李光录，张胜利. 黄土高原南部侵蚀对不同土壤颗粒级碳氮分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2007，35(8)：147-150.
Li G L, Zhang S L. Effects of soil erosion on distribution of C and N in different particle size fractions of soil on the southern Loss Plateau[J]. J. Northwest Sci-Tech Univ. Agric. For. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 35(8): 147-150.

[13] 曹良元，张磊，蒋先军，等. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中几种氮素形态分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(4)：824-830.
Cao L Y, Zhang L, Jiang X J *et al*. Effects of long-term ridge tillage on distributions of different nitrogen forms of soil water stable aggregates[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(4): 824-830.

[14] 王岩，杨振明，沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. 土壤学报，2000，37(1)：85-94.
Wang Y, Yang Z M, Shen Q R. Distribution of C, N, P and K in different particle size fractions of soil and availability of N in each fraction[J]. Acta Pedol. Sin., 2000, 37(1): 85-94.

[15] Leinweber P, Reuter G. The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl[J]. Biol. Fert. Soils, 1992, 13: 119-124.

[16] 王洪杰，李宪文，史学正，于东升. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报，2003，17(2)：44-50.
Wang H J, Li X W, Shi X Z, Yu D S. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil

nutrient and soil granule composition [J]. J. Soil Water Conserv., 2003, 17(2): 44-50.

[17] 隋跃宇, 王振波, 焦晓光, 等. 双城市农田黑土机械组成与土壤全碳和全氮磷钾养分含量的相关性分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(1): 42-44.
Sui Y Y, Wang Z B, Jiao X G *et al*. Correlation analysis between black soil textures and total carbon, nitrogen, phosphprpus, kalium contents in Shuangcheng cropland [J]. Syetem Sci. Compr. Stud. Agric., 2007, 23(1): 42-44.

[18] 王岩, 徐阳春, 沈其荣. 有机、无机肥料^{15}N在土壤不同粒级中的分布及其生物有效性[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 410-413.
Wang Y, Xu Y C, Shen Q R. Distribution of ^{15}N from organic and inorganic fertilizers in different size fractions of soil and its availability[J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(6): 410-413.

[19] 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): 1-7.
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]. Sci. Agric. Sin., 2000, 33(5): 1-7.

[20] Anderson D W, Saggar S, Bettany J R *et al*. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter Ⅰ. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 767-772.

[21] 武天云, Jeff J, Schoenau, 等. 利用离心法进行土壤颗粒分级[J]. 应用生态学报, 2004, 15 (3): 477-481.
Wu T Y, Jeff J, Schoenau *et al*. Soil particle size fractionation with centrifugation method[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 477-481.

[22] Whalen J K, Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 1637-1647.

[23] Banger K, Kukal S S, Toor G *et al*. Impact of long-term additions of chemical fertilizers and farm yard manure on carbon and nitrogen sequestration under rice-cowpea cropping system in semi-arid tropics[J]. Plant Soil. 2009, 318: 27-35.

[24] Chichester F W. Nitrogen in soil organo-mineral sedimentation fraction[J]. Soil Sci., 1969, 107: 356-363.

[25] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25.
Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microgregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proporation in judging tility level[J]. Acta Pedol. Sin., 1994, 31(1): 18-25.

[26] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 49-53.
Chen E F, Guang L Z, Wang J K *et al*. Compositional proportion of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation [J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(1): 49-53.

[27] 黄东迈, 朱培立. 有机氮各化学组分在土壤中的转化与分配[J]. 江苏农业学报, 1986, 2(2): 17-25.
Huang D M, Zhu P L. Transformation and distribution of organic nitrogen forms in soil[J]. Jiangsu J. Agric. Sci., 1986, 2(2): 17-25.