吉林农业大学学报 2017,39(1):67~73
Journal of Jilin Agricultural University
http://xuebao.jlau.edu.cn
E-mail:jlndxb@vip.sina.com

长期施肥下黑土碳氮和土壤 pH 的空间变化*

贾立辉,朱 平,彭 畅,张秀芝,李 强,高洪军**
吉林省农业科学院,长春 130033

摘 要: 试验研究了长期不同施肥下剖面(0~100 cm)土壤有机碳、全氮、硝态氮、微生物碳氮以及土壤 pH 的空间变化。结果表明:与单施化肥相比,长期有机肥和化肥配施显著提高了 0~20 cm 表层土壤有机碳、全氮、硝态氮和微生物碳氮含量,并且土壤有机碳和微生物碳氮的增加主要集中在 0~40 cm 土层。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,等氮量有机无机肥配施(M_1NPK 和 SNPK)处理土壤有机碳含量显著高于化肥 NPK 处理($P<0.05$),同时二处理土壤全氮含量没有由于化肥氮施用量减少而下降。与不施肥 ck 相比,单施化肥显著降低了土壤微生物量碳氮含量。在 40 cm 土层以下,与 NPK 处理相比,M_2NPK、NP 和 N 处理硝态氮累积量明显增加,而 M_1NPK 和 SNPK 处理硝态氮累积量明显减少。长期不同施肥对土壤酸化的影响主要集中在 0~40 cm 土层,单施化肥处理土壤 pH 显著低于不施肥(ck)和有机无机肥配施处理($P<0.05$),其中 2012 年秸秆还田(SNPK)处理 0~20 cm 土壤 pH 比 NPK 处理高 2.17。表明有机无机肥配施不仅能提高和维持土壤碳氮水平,还能防止土壤酸化的发生,尤其施用有机肥氮替代部分化肥氮的有机无机肥配施模式是东北黑土区最有效的施肥措施之一。

关键词: 土壤肥力; 黑土; 碳; 氮; 土壤 pH; 长期施肥
中图分类号: S185; S155.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5684(2017)01-0067-07
DOI: 10.13327/j.jjlau.2016.2982
引文格式: 贾立辉,朱平,彭畅,等.长期施肥下黑土碳氮和土壤 pH 的空间变化[J].吉林农业大学学报,2017,39(1):67-73.

Spatial Distribution of Soil Carbon, Nitrogen and pH of Black Soil under Long-term Fertilization

JIA Lihui, ZHU Ping, PENG Chang, ZHANG Xiuzhi, LI Qiang, GAO Hongjun**
Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, *China*

Abstract: This research was conducted to reveal the characteristics and spatial variation of profile soil organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen and microbial C and N under long-term different fertilization treatments. The results showed the combination of manure and chemical fertilizer could significantly increase the content of surface soil organic carbon, total N, nitrate N, microbial C and N in the 0-20 cm soil layer, which mainly concentrated in 0-40 cm layer. Soil organic carbon content in the M_1NPK and SNPK treatments was significantly higher than that of chemical fertilizer treatment ($P<0.05$), and total N of the two treatments did not decrease due to the low applied amount of chemical fertilizer. Single applied chemical fertilizer obviously decreased the content of microbial C and N compared with the ck treatment. Accumulation amount of nitrate N in the M_2NPK, NP and N treatments significantly increased, that of M_1NPK and SNPK treatments obviously decreased, compared with NPK treatment below 0-40 cm soil layer. Effects of different fertilization

* 基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503136-6,201303126-4),吉林省科技发展计划项目(LFGC14312,20140203002NY)
作者简介:贾立辉,男,硕士,助理研究员,研究方向:土壤肥力与玉米高产栽培研究。
收稿日期:2015-12-14
** 通信作者

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

treatments on soil acidification mainly concentrated in the 0-40 cm soil layer. Applied chemical fertilizer treatments had lower soil pH than the ck and combination of organic and inorganic treatments, pH value of the NPK was 2.17 lower compared to the SNPK in 2012. Combination of organic and inorganic fertilizers could not only increase the content of soil C and N, but also prevent soil acidification, replacing chemical fertilizer N input with organic fertilizer N proved to be a feasible method for fertilization measures in the Black Soil Region of Northeast China.

Key words: soil fertility; black soil; carbon; nitrogen; soil pH; long-term fertilization

土壤碳氮是研究土壤肥力和评价土壤质量的重要指标,土壤碳氮在培育土壤肥力、调节土壤理化性质、提供作物养分、改善土壤结构及减少环境负效应等方面具有重要作用[1-4]。土壤 pH 也是决定农田土壤肥力的重要特征参数之一,土壤 pH 的持续下降是土壤退化的重要形式,容易导致土壤环境质量和健康质量的降低,同时造成土壤保蓄能力下降[5-6]。

由于土壤长期不合理的耕作和施肥,土壤有机碳下降和氮对环境的负效应越来越严重,土壤的酸化进程也大大加快,这些已成为土壤学领域研究的热点[7-10]。目前,大多数学者研究的只是表层土壤碳氮以及土壤 pH 的变化差异[11-13],但关于长期不同施肥对黑土剖面碳氮及土壤 pH 空间变化的研究鲜有报道。因此,本试验以国家黑土肥力与肥料效益长期定位试验为研究平台,研究长期不同施肥对黑土剖面土壤碳氮和土壤 pH 的影响,旨在探讨剖面土壤有机碳、全氮、硝态氮、微生物碳氮以及土壤 pH 的空间变化特征,为建立合理施肥模式、提高黑土肥力和土壤持续生产力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

国家黑土肥力与肥料效益监测基地位于吉林省公主岭市吉林省农业科学院试验地内(东经 124°48′33.9″,北纬 43°30′23″),试验地地势平坦,海拔 220 m,年平均气温 4~5 ℃,年最高气温 34 ℃,最低气温-35 ℃,无霜期 110~140 d,有效积温 2 600~3 000 ℃,年降水量 450~650 mm,年蒸发量 1 200~1 600 mm,年日照时间 2 500~2 700 h。土壤为中层典型黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物,剖面土壤基本性质见表 1(1989 年数据)。

表 1 供试剖面土壤基本性质

Table1. Basic properties of soil at the beginning of the experiment

发生层次	土层深/cm	w(有机质)/(g·kg^{-1})	w(全氮)/(g·kg^{-1})	w(全磷)/(g·kg^{-1})	w(全钾)/(g·kg^{-1})	w(碱解氮)/(g·kg^{-1})	w(有效磷)/(g·kg^{-1})	w(速效钾)/(g·kg^{-1})	pH
Aa	0~20	22.8	1.40	1.39	22.1	114	27.0	190	7.6
A	20~40	15.2	1.30	1.35	22.3	98	15.5	181	7.5
AB	40~65	7.1	0.57	1.00	22.0	41	7.2	185	7.5
B	65~90	6.8	0.50	0.98	22.1	39	4.2	189	7.6
BC	90~120	6.3	0.38	0.91	22.2	37	4.1	187	7.6

1.2 试验设计

黑土肥力与肥效长期试验(12 区)始于 1990 年,选择其中 7 个处理进行试验研究:①ck(不施肥);②N(单施氮肥);③NP(氮磷配施);④NPK(氮磷钾配施);⑤M_1NPK(有机无机肥配施 1);⑥SNPK(秸秆还田);⑦M_2NPK(有机无机肥配施 2)。试验不设重复,小区面积 400 m^2,为了减少无重复的缺陷,在每个小区选取 3 个有代表性的点进行调查和采样,区间由 2 m 宽过道相连。

有机肥作底肥,M_1NPK 和 M_2NPK 处理有机肥施用量分别为 23 t/hm^2 和 30 t/hm^2,1/3 氮肥和磷钾肥作口肥,其余 2/3 氮肥于拔节前追施表土下 10 cm 处,在拔节追肥后 7 500 kg/hm^{2}玉米秸秆撒施在土壤表面。有机肥养分含量:0.5% N,0.4% P_2O_5,0.49% K_2O。秸秆:0.7% N,0.16% P_2O_5,0.75% K_2O。施肥量见表 2。

供试作物为玉米,种植玉米品种:1990—1993 年为丹育 13,1994—1996 年为吉单 222,1997—

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2005 年为吉单 209,2006—2014 年为郑单 958,于 4 月末播种,9 月末收获,按常规进行统一田间管理,在 10 月份对土壤进行取样分析测定。

表 2 不同处理的施肥量

Table 2. Amount of applied fertilizer of different treatments

处理	氮肥		磷肥	钾肥
	化肥氮	有机肥氮		
ck	0	0	0	0
N	165	0	0	0
NP	165	0	82.5	0
NPK	165	0	82.5	82.5
M_1NPK	50	115	82.5	82.5
SNPK	112	53	82.5	82.5
M_2NPK	165	150	82.5	82.5

注: M_1和 M_2为有机肥(猪粪),S 为玉米秸秆

1.3 测定项目与方法

0~100 cm 剖面土样采集:2012 年玉米收获后在每小区用土钻采集 0~100 cm 土层样品,0~10,10~20,20~40,40~60,60~80,80~100 cm。土样采集后立即放入-10 ℃冰箱中冷冻保存。

测定方法:土壤总有机质的测定采用常规 $K_2Cr_2O_7$ 氧化法;全氮用凯氏法;土壤硝态氮含量采用 2 mol/L KC1 浸提—紫外分光光度法测定[14]。土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸浸提法测定[15-16],土壤 pH 采用电极法测定[17]。

1.4 数据分析

试验中所获得的数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 等统计分析软件进行处理与统计分析,用 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 剖面土壤有机碳、全氮和硝态氮的变化

2.1.1 剖面土壤有机碳的变化 由图 1 可见,各处理剖面土壤有机碳含量随土层加深而呈逐渐下降趋势,表层有机碳含量较高,差异较大,底层则相反。0~10 cm 土层,有机无机肥配施 M_2NPK 处理有机碳含量最高,达到 26.04 g/kg,ck 和 N 处理最低。其中,等氮量有机无机肥配施处理(M_1NPK 和 SNPK)土壤有机碳含量显著高于化肥 N、NP 和 NPK 处理($P<0.05$);化肥 NPK 和 NP 处理土壤有机碳显著高于 N 和 ck 处理,而 ck 处理与 N 处理差异不显著;10~20 cm 土层,各处理土壤有机碳差异水平与 0~10 cm 土层一致。20~40 cm 土层,M_2NPK 处理有机碳最高,ck 和 N 处理最低。其中,有机无机肥配施 M_1NPK 和 SNPK 处理显著高于单施化肥处理,各化肥 N、NP 和 NPK 处理间土壤有机碳差异不显著。40 cm 土层下各处理间有机碳含量差异不显著。表明用有机肥和玉米秸秆替代部分化肥氮的方式可明显增加 0~40 cm 土壤有机碳含量,对维持及提高剖面土壤有机碳水平具有重要意义。

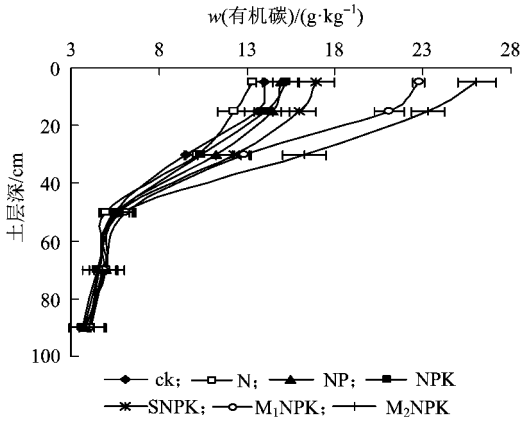

图 1 剖面土壤有机碳含量的变化

Fig.1. Changes of organic carbon content of profile soil

2.1.2 剖面土壤全氮的变化 试验结果表明,剖面土壤全氮的变化与剖面有机碳的变化规律基本一致,随土层加深,各处理土壤全氮均呈逐层锐减趋势,表层土壤全氮含量最高,底层最小(图 2)。0~10 cm 土层,有机无机肥配施 M_2NPK 处理全氮含量最高,不施肥 ck 处理最低,其中 M_1NPK 和 SNPK 处理土壤全氮含量显著高于化肥 N、NP 和 NPK 处理($P<0.05$);化肥 N、NP 和 NPK 3 个处理间土壤全氮含量差异不显著,但三处理全氮含量显著高于 ck 处理。

在 10~20 cm 土层,M_2NPK、M_1NPK 和 SNPK 三处理间土壤全氮含量差异显著;有机无机肥配施处理(M_2NPK 和 M_1NPK)土壤全氮含量显著高于其他处理($P<0.05$);SNPK 处理土壤全氮含量与 NP、NPK 处理差异不显著,但显著高于 N 和 ck 处理。20~40 cm 土层,M_2NPK 处理土壤全氮含量显著高于其他处理,N、NP、NPK、M_1 NPK 和 SNPK 处理差异不显著,但这 5 个处理土壤全氮显著高于 ck 处理;在 40 cm 土层以下,各处理全氮含量差异不显著。表明施用有机肥和秸秆可明

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

显增加或维持 0~20 cm 土壤全氮含量，对维持及提升土壤全氮水平具有重要作用。

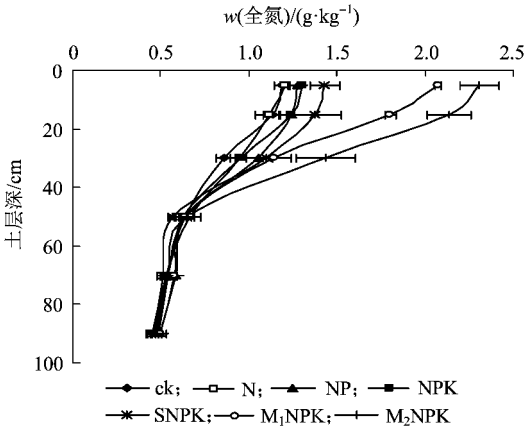

图 2 剖面土壤全氮含量的变化

Fig.2. Changes of total N content of profile soil

2.1.3 剖面土壤硝态氮的变化 玉米收获后各处理土壤剖面硝态氮分布特征(图 3)，土壤硝态氮随施氮量增加而增加，剖面土壤硝态氮累积量最高值出现在 0~20 cm 土层。随土层的加深，M_2NPK、NP 和 N 处理土壤硝态氮累积量呈先减少，之后在 40~60 cm 有所增加(形成硝态氮累积层)，再减少的趋势。总体上，40 cm 土层以下，与 NPK 处理比较，M_2NPK、NP 和 N 处理硝态氮累积量有所增加，而等氮量施肥的 M_1NPK 和 SNPK 处理硝态氮累积量有所减少，尤其秸秆还田处理在 0~100 cm 土层硝态氮累积量都明显小于化肥 NPK 处理。

0~10 cm 土层硝态氮含量表现为 M_2NPK>NP>M_1NPK>N>NPK>SNPK>ck，其中 M_2NPK 和 NP 处理硝态氮含量显著高于其他处理($P<0.05$)，秸秆还田和 ck 处理硝态氮含量最低，SNPK 与 ck 之间差异不显著，N 与 NPK 差异不显著。10~20 cm 硝态氮含量表现为 M_2NPK>M_1NPK>NP>N>NPK>SNPK>ck，其中 M_2NPK 和 M_1NPK 处理硝态氮含量显著高于其他处理。20~40 cm土层硝态氮含量表现为 M_2NPK>NP>N>M_1NPK>NPK>SNPK>ck，其中 M_2NPK 处理硝态氮含量显著高于其他处理，NP、N、M_1NPK、NPK 之间差异不显著，SNPK 与 ck 之间差异不显著。40~60 cm 土层 M_2NPK，NP 和 N 三个处理硝态氮累积量显著高于其他处理，其他处理间没有显著差异。60 cm 土层以下各处理间土壤硝态氮累积量没有显著差异。表明过量施氮和不平衡施肥会造成土壤硝态氮的大量累积，而适宜施用有机肥替代化肥可明显抑制土壤硝态氮的大量淋溶。

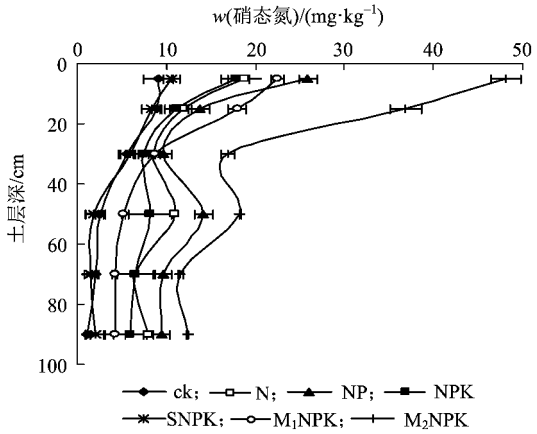

图 3 剖面土壤硝态氮含量的变化

Fig.3. Changes of nitrate N content of profile soil

2.2 剖面土壤微生物碳氮的变化

由图 4 可见，在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中，NP 处理土壤微生物碳(SMB-C)显著低于其他处理($P<0.05$)。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中，有机无机肥配施处理 M_2NPK、M_1NPK 和 SNPK 土壤微生物碳显著高于不施肥 ck 和单施化肥处理，而 ck 处理 10~20 cm 土层微生物碳显著高于单施化肥处理。在 20~40 cm 土层中，有机无机肥配施处理 M_2NPK 和 SNPK 处理显著高于 M_1NPK 和 NPK 处理；而 M_1NPK 和 NPK 处理又显著高于 NP、N 和 ck 处理；NP、N 和 ck 处理间土壤微生物碳没有显著差异。各处理微生物碳依次顺序为有机无机肥配施>秸秆还田>不施肥>单施化肥。与不施肥(ck)相比，有机肥与化肥配合施用显著提高了土壤微生物碳，单施化肥显著降低了土壤微生物碳。

在 0~10 cm 土层中，SNPK 和 M_2NPK 处理土壤微生物氮最高，NP 处理土壤微氮最低；其中，有机无机肥配施处理 M_1NPK 和 SNPK 土壤微生物氮显著高于不施肥(ck)处理($P<0.05$)，而不施肥 ck 显著高于单施化肥处理。在 10~20 cm 土层中，有机无机肥配施 M_1NPK 和 SNPK 处理土壤微生物氮显著高于 ck 处理；不施肥 ck 显著高于单施化肥处理；各处理微生物氮依次顺序为 SNPK>M_2NPK>M_1NPK>ck>N>NPK>NP。在 20~40 cm 土层中，各处理微生物氮依次顺序为 SNPK>M_2NPK>M_1NPK>ck>N>NP>NPK，其中 ck 处理土壤微生物氮与单施化肥处理间没有显著差异。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

总之，与不施肥（ck）相比，有机肥与化肥配合施用显著提高了土壤微生物氮含量，单施化肥显著降低了土壤微生物氮含量。

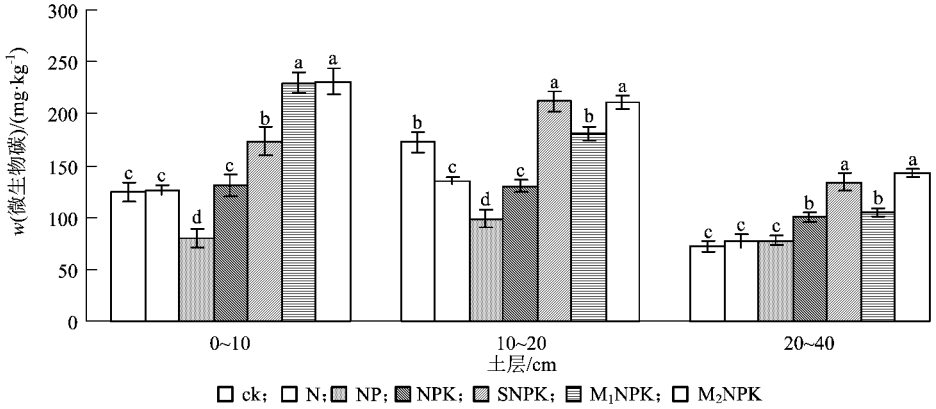

图 4　长期不同施肥下土壤微生物碳的变化

Fig.4. Changes of SMB-C under long-term different fertilization treatments

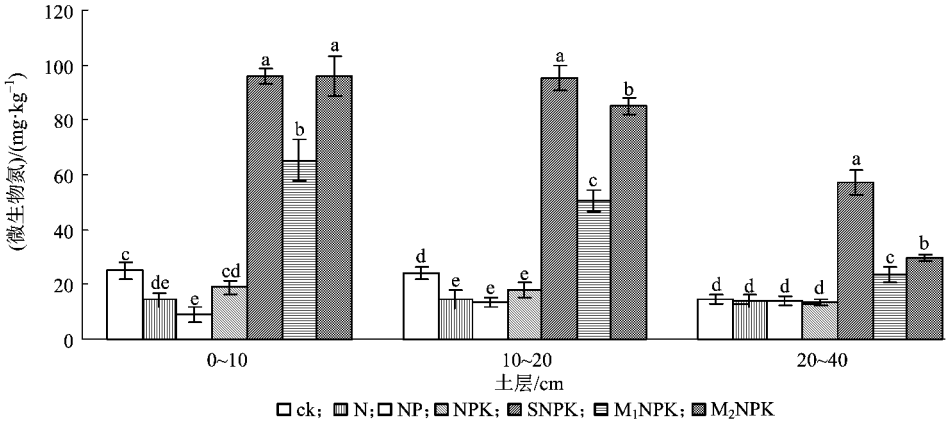

图 5　长期不同施肥下土壤微生物氮的变化

Fig.5. Changes of SMB-N under long-term different fertilization treatments

2.3　土壤 pH 的变化

由表 3 可知，2012 年各处理剖面土壤 pH 随土层加深而逐渐增加，表层 pH 较低，差异较大，底层则无差异。在 0～10，10～20，20～40 cm 土层，不施肥（ck）和有机无机配施处理土壤 pH 都显著高于单施化肥处理（N、NP 和 NPK），并且单施化肥处理土壤 pH 显著低于 1989 年初始值；在 40～60 cm 土层，M_2NPK 和 SNPK 处理土壤 pH 显著高于单施化肥处理，但 M_2NPK、SNPK、M_1NPK 和 ck 4 处理间土壤 pH 差异不显著；在60 cm 土层以下，各处理土壤 pH 差异不显著。表明长期不同施肥对土壤酸化的影响主要集中在 0～40 cm土层。

在 0～20 cm 土层，与初始值（1989 年）比较，2012 年单施化肥（N、NP 和 NPK）处理土壤 pH 平均下降了约 1.8；ck、M_1 NPK、M_2 NPK 和 SNPK 4 个处理土壤 pH 基本稳定，其中秸秆还田处理土壤 pH 最高，SNPK 处理（2012 年）土壤 pH 比 NPK 处理高 2.17。在 2005—2007 年，土壤 pH 也表现了同样的变化规律，只是下降幅度较小，单施化肥土壤 pH 较初始值平均下降了约 1.3。表明单施化肥可明显导致土壤酸化，有机无机肥配施具有防止土壤酸化的作用，尤其秸秆还田抑制土壤酸化效果更为显著。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 2012 年不同施肥方式下土壤 pH 的变化

Table 3. Changes of soil pH under different fertilization treatments

处理	土层深/cm						2005—2007 年平均值
	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
ck	7.33[b]	7.23[b]	7.43[b]	7.71[ab]	7.82[a]	7.98[a]	7.64
N	5.72[c]	5.98[c]	6.60[c]	7.44[b]	7.48[a]	7.66[a]	6.61
NP	5.41[c]	5.82[c]	6.59[c]	7.36[b]	7.57[a]	7.75[a]	6.04
NPK	5.66[c]	5.78[c]	6.52[c]	7.26[b]	7.40[a]	7.74[a]	6.19
SNPK	7.88[a]	7.91[a]	8.00[a]	8.15[a]	8.15[a]	8.12[a]	7.80
M_1NPK	6.97[b]	7.05[b]	7.40[b]	7.66[ab]	7.79[a]	7.84[a]	7.20
M_2NPK	7.28[b]	7.33[ab]	7.78[ab]	8.09[a]	8.12[a]	8.06[a]	7.48

注：同列数据上标不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平

3 讨 论

本研究表明，长期有机肥和化肥配施处理（M_1NPK、M_2NPK 和 SNPK）显著提高了表层 0~20 cm 土壤有机碳和全氮含量，并且土壤有机碳和全氮的增加主要集中在 0~40 cm 土层，这与许多学者研究结果一致[18-19]。胡诚等研究表明[20]，化肥有机肥配施处理在 0~20 cm 及 20~40 cm 土层土壤有机碳含量显著高于单施化肥和不施肥处理，40 cm 土层以下各处理没有显著差异。乔云发等研究发现[21]，与 ck 处理相比，施用有机肥 MNPK 处理增加了黑土 0~60 cm 剖面土壤的碳氮含量，而施化肥 NPK 处理，仅增加了 0~20 cm 耕层土壤碳氮含量。王伯仁在红壤上研究表明[22]，与单施化肥比较，有机无机肥配施处理显著提高了红壤 0~20 cm 土层全氮含量，20 cm 土层以下各处理全氮含量无显著差异。本研究也发现，在 20~40 cm 土层，高量有机肥（M_2NPK）处理土壤全氮含量显著高于其他处理，而等氮量施肥（M_1NPK、SNPK 和 NPK）3 个处理间土壤全氮含量差异不显著。表明长期有机肥与化肥配施显著增加了土壤氮的输入，也增加了作物残茬和根向深层土壤的输入[13,23]。

许多学者研究表明[24-26]，合理的平衡施肥及适宜的有机无机肥配施可以明显降低深层土壤硝态氮的累积，从而降低了硝态氮淋溶的风险。本研究也发现，与 NPK 处理比较，M_2NPK、NP 和 N 处理深层土壤硝态氮累积量有所增加，而等氮量施肥的 M_1NPK 和 SNPK 处理土壤硝态氮累积量有所减少，尤其秸秆还田（SNPK）处理在 0~100 cm土层硝态氮累积量都明显小于化肥 NPK 处理。表明过量施氮和不平衡施肥会造成土壤硝态氮的大量累积，而适宜施用有机肥替代化肥方式（如 SNPK 和 M_1NPK）可明显抑制土壤硝态氮大量淋溶。

本试验发现，有机无机肥配施处理显著提高了 0~40 cm 土层土壤微生物碳氮含量，单施化肥处理显著降低了土壤微生物碳氮含量，这与许多试验研究结果[27-28]相似。孙凤霞对本试验点的研究也表明[29]，黑土表层土壤微生物碳表现为秸秆还田>化肥农家肥配施>不施肥>单施化肥。化肥与有机肥配合施用给土壤补充了大量有机碳源，促进了土壤微生物的活动和繁殖旺盛，从而使土壤微生物碳氮增加[30-31]；长期单施化肥使土壤 pH 下降，土壤团聚体受到破坏，微生物自下而上环境变劣，很可能是土壤微生物碳氮降低的原因之一[28,32]。

汪吉东等[33]研究表明，长期连施化肥会导致土壤 pH 和土壤酸缓冲能力的下降，而化肥和有机肥的配合施用土壤 pH 会高于单施化肥处理。蔡泽江等[34]研究也发现，连施 18 年化学氮肥红壤 pH 显著下降，其中以单施氮肥降幅最大，pH 降低了 1.5。张喜林等[35]研究表明，连施 27 年氮肥后黑土土壤 pH 下降了 1.5。本研究也发现，与试验初比较，不施肥（ck）处理耕层土壤 pH 无明显变化；连施 23 年化肥处理耕层土壤酸化明显，其中 N、NP 和 NPK 区土壤 pH 约下降 1.8；有机无机配施处理耕层土壤 pH 没有下降，其中 2012 年秸秆还田（SNPK）处理 0~20 cm 土层 pH 比 NPK 处理高 2.17。表明单施化肥可明显导致黑土土壤酸化，有机无机配施具有抑制土壤酸化的作用。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 乔云发,苗淑杰,韩晓增.长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J]. 土壤通报, 2008, 39 (3): 545-548.

[2] 隋跃宇,张必义,焦晓光,等.长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 190-192, 200.

[3] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 787-796.

[4] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions[J]. Soil Till Research, 2003, 70: 1-18.

[5] Ye X M, Hao J M, Duan L, et al. Acidification sensitivity and critical loads of acid deposition for surface waters in China[J]. Science of the Total Environment, 2002, 289: 189-203.

[6] Duan L, Huang Y M, Hao J M, et al. Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification[J]. Science of the Total Environment, 2004, 330: 187-198.

[7] 武继红.土壤氮素的变化特征研究[J]. 土壤肥料, 2001 (2): 14-17.

[8] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.施肥措施对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机质积累的影响[J].植物营养与肥料学报, 2009, 15(6):1333-1338.

[9] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388.

[10] 许中坚,刘广深,俞佳栋.氮循环的人为干扰与土壤酸化[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2):74-78.

[11] 曹莹菲,刘庆芳,刘克,等.长期不同施肥对塿土碳氮含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 187-190.

[12] 孟红旗,刘景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013,50(6):1109-1116.

[13] 李新爱,童成立,蒋平,等.长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 298-303.

[14] 宋歌,孙波,教剑英.测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 288-293.

[15] Brookes P C, Landman A, Pruden G,et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in s oil[J].Soil Biol Biochem, 1985, 17(6): 837-842.

[16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biol Biochem, 1987, 19(6): 703-707.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.

[18] 赵广帅,李发东,李运生,等.长期施肥对土壤有机质积累的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 840-847.

[19] 李晨华,唐立松.长期施肥对绿洲农田土壤剖面有机碳及其组分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 637-644.

[20] 胡诚,乔艳,李双来,等. 长期不同施肥方式下土壤有机碳的垂直分布及碳储量[J]. 中国生态农业学报,2010,18 (4):689-692.

[21] 乔云发,韩晓增,赵兰坡. 长期定位施肥对黑土碳氮储量的影响[J].农业系统科学与综合研究, 2011,27(4):480-484.

[22] 王伯仁,李冬初,蔡泽江,等.长期不同施肥对红壤碳氮储量的影响[J]. 土壤通报,2011,42(4):808-811.

[23] Kanchikerimath M, Singh D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semi-arid region of India[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 86: 155-162.

[24] 党廷辉,郭胜利,樊军,等.长期施肥条件下黄土旱塬土壤 NO_3-N 的淋溶分布规律[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (8):1265-1268.

[25] 黄晶,王伯仁,刘宏斌,等. 长期施肥对红壤旱地剖面硝态氮累积的影响[J]. 湖南农业科学, 2010(1): 60-62, 65.

[26] 张慧霞,周怀平,杨振兴,等. 长期施肥对旱地土壤剖面硝态氮分布和累积的影响[J]. 山西农业科学,2014,42(5): 465-469.

[27] 徐永刚,宇万太,马强,等. 长期不同施肥制度对潮棕壤微生物生物量碳、氮及细菌群落结构的影响[J].应用生态学报,2010, 21(8): 2078-2085.

[28] 于树,汪景宽,王鑫,等.不同施肥处理的土壤肥力指标及微生物碳、氮在玉米生育期内的动态变化[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 137-140.

[29] 孙凤霞.长期施肥对中国 3 种典型土壤微生物量碳氮和微生物碳源利用率的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.

[30] 赵满兴,周建斌,陈竹君,等.有机肥中可溶性有机碳、氮含量及其特性[J]. 生态学报,2007,27(1): 397-403.

[31] 朱丽霞,章家恩,刘文高.根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. 生态环境, 2003, 12(1):102-105.

[32] 姚政,赵京音,蒋晓华.施用不同有机物后土壤微生物量的动态变化[J]. 上海农业学报,1997, 3(1):47-48.

[33] 汪吉东,戚冰洁,张永春,等.长期施肥对砂壤质石灰性潮土土壤酸碱缓冲体系的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1031-1036.

[34] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71-78.

[35] 张喜林,周宝库,孙磊,等.长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1221-1223.

(责任编辑: 王希)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net