

长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响

龚伟^{1,2}, 颜晓元^{1*}, 王景燕², 胡庭兴², 宫渊波²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏南京 210008;

2 四川农业大学生态林业工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要:通过对华北平原小麦-玉米轮作农田生态系统 18 年田间施肥试验, 研究了长期不同施肥处理对耕层(0—20 cm)土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮的影响。试验设化肥 NPK 不同组合(NPK, NP, NK, PK), 全部施用有机肥(OM), 一半有机肥+化肥 NPK(1/2OMN)及不施肥 CK 共 7 个处理。结果表明, 各施肥处理均能在不同程度上增加土壤腐殖质(胡敏酸、富里酸和胡敏素)及活性腐殖质(活性胡敏酸和活性富里酸)组分碳和氮含量, 提高可浸提腐殖质(胡敏酸和富里酸)及活性腐殖质组分碳和氮分配比例, 但施肥对土壤活性腐殖质组分碳和氮含量的增加率均分别高于腐殖质组分碳和氮。各处理土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量均为 OM 处理最高, 且有机肥与化肥 NPK 配施高于单施化肥各处理, 而化肥处理中 NPK 均衡施用效果最好。说明施用有机肥、有机肥与化肥 NPK 配施及化肥 NPK 均衡施用是增加土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮的关键, 活性腐殖质组分碳和氮较腐殖质组分碳和氮对施肥措施的响应更灵敏。

关键词:长期施肥; 土壤腐殖质; 活性腐殖质; 有机碳和氮组分

中图分类号: S153.6+2 S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)06-1245-08

Effects of long-term fertilization on soil humus carbon and nitrogen fractions in a wheat-maize cropping system

GONG Wei^{1,2}, YAN Xiao-yuan^{1*}, WANG Jing-yan², HU Ting-xing², GONG Yuan-bo²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The contents of soil humus (including humic acid, fulvic acid, and humin) and labile humus (including labile humic acid and fulvic acid) carbon and nitrogen fractions in 0–20 cm soil layer were studied on a long-term fertilization field under wheat-maize cropping rotation in north-central China. The long-term fertilization experiment was designed to include 7 treatments: fertilizer NPK (NPK), organic manure (OM), half organic manure with fertilizer NPK (1/2OMN), fertilizer NP (NP), fertilizer PK (PK), fertilizer NK (NK) and control (CK). After 18 years fertilization, all the manure and fertilizer treatments showed higher contents of humic acid carbon (C_{HA}) and nitrogen (N_{HA}), fulvic acid carbon (C_{FA}) and nitrogen (N_{FA}), humin carbon (C_{HM}) and nitrogen (N_{HM}), labile humic acid carbon (C_{LHA}) and nitrogen (N_{LHA}), and labile fulvic acid carbon (C_{LFA}) and nitrogen (N_{LFA}), and higher proportions of C_{HA} , C_{FA} , C_{LHA} and C_{LFA} in total organic carbon (C_T) and of N_{HA} , N_{FA} , N_{LHA} and N_{LFA} in total organic nitrogen (N_T). The increased rate of contents of soil labile humus C and N fractions were higher than that of soil humus C and N fractions, respectively. Among the fertilization treatments, treatment OM has the highest contents of soil humus and labile humus carbon and nitrogen fractions, followed by treatment 1/2OMN, and the treatments of applying chemical fertilizer alone. Balanced application of fertilizers (treatment NPK) showed higher contents of soil humus and labile humus carbon and nitrogen frac-

收稿日期: 2008-12-22

接受日期: 2009-03-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(kzcx2-yw-312, kzcx2-yw-406-2)资助。

作者简介: 龚伟(1980—)男, 四川崇州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态方面的研究工作。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: yanxy@issas.ac.cn

tions than imbalanced use of fertilizers (treatments NP , PK , and NK). It was suggested that applying organic manure or its combination with fertilizer NPK and the balanced application of fertilizer NPK could be the keys for the increase of soil C_{HA} , C_{FA} , C_{HM} , C_{LHA} , C_{LFA} , N_{HA} , N_{FA} , $N_{C_{HM}}$, N_{LHA} and N_{LFA} contents ; soil labile humus C and N fractions were more sensitive to fertilization practices than soil humus C and N fractions , respectively .

Key words : long-term fertilization ; soil humus ; labile humus ; organic carbon and nitrogen fractions

土壤有机碳的循环和转化与土壤肥力的演变以及全球环境变化密切相关。土壤腐殖质是全球碳平衡过程中重要的碳库,在土壤有机碳的循环和转化中起到重要作用^[1]。它是有机物质在土壤微生物的主导作用下形成的特殊类型高分子有机化合物的混合物,因而也被列入土壤生物学肥力的范畴^[2];它含有大量植物必需的营养元素,可提高植物和微生物的生理活性,促进土壤良好结构的形成,增加土壤蓄水、保水和保肥能力,改善土壤缓冲性,消除土壤中农药残毒,与作物产量之间也有密切关系^[3]。另外,可提取腐殖质能够影响土壤中重金属和持久性有机污染物的迁移和转化,并影响其毒性和生物可得性^[4]。土壤活性腐殖质是游离有机质以及与活性铁铝氧化物结合的腐殖质的总和^[5],是腐殖质中对土壤肥力起主要作用的组分之一^[6]。农业管理措施的不同可改变土壤有机物质的输入,并通过对土壤条件的改变来影响土壤有机碳的分解,从而影响土壤腐殖质的形成与转化。探索长期不同施肥条件下土壤中腐殖质的组成和含量变化对提高土壤质量和增加土壤固碳能力具有重要意义^[7]。华北平原是我国重要的粮棉产区,粮食面积和产量分别占全国的1/5以上,该区小麦和玉米合计约占粮食作物总播种面积的3/4和粮食总产量的4/5^[8]。所以这一区域农业生态系统可持续发展至关重要。先前已对这一区域长期不同施肥条件下小麦-玉米轮作系统作物产量^[9]、温室气体排放^[10]、颗粒有机碳和氮含量^[11]等进行了研究报道,但有关这一系统长期施肥对土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮影响的研究尚未见报道。鉴于此,本研究以位于河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态国家实验站为平台,研究了长期施肥条件下小麦-玉米轮作系统不同施肥措施的土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量的变化,并分析了腐殖质组分碳和氮对土壤总有机碳和氮增加的贡献,以期深入认识土壤固碳能力与施肥的关系,并制定合理的施肥措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在中国科学院封丘农业生态国家实验站(35°00'N,114°24'E)内进行。该地区属半干旱、半湿润的暖温带季风气候区,年平均降水量605 mm,主要集中于7月至9月,年蒸发量1875 mm,年平均气温为13.9℃,无霜期220 d左右。供试土壤为轻壤质黄潮土。试验开始前土壤耕层(0—20 cm)的理化性质为:有机质5.83 g/kg、全氮0.445 g/kg、全磷0.50 g/kg、全钾18.6 g/kg、有效磷1.93 mg/kg、速效钾78.8 mg/kg和pH 8.65,土壤肥力呈缺氮、磷,富钾。试验于1989年秋开始,采用小麦—玉米一年两熟种植方式,土壤耕作和作物收获均采用传统的人工方式。设7个处理:1)化学肥料氮、磷、钾(NPK);2)有机肥(OM);3)一半有机肥+化肥氮、磷、钾(1/2OMN);4)化学肥料氮、磷(NP);5)化学肥料磷、钾(PK);6)化学肥料氮、钾(NK);7)不施肥(CK),每处理重复4次。小区面积47.5 m²。完全化肥(NPK)处理,每季小麦肥料用量为尿素(N)150 kg/hm²,过磷酸钙(P₂O₅)75 kg/hm²,硫酸钾(K₂O)150 kg/hm²;每季玉米肥料用量为尿素N150 kg/hm²,过磷酸钙P₂O₅60 kg/hm²,硫酸钾K₂O150 kg/hm²。每季作物NPK、OM和1/2OMN处理施用的氮、磷、钾养分量相同,有机肥处理中磷和钾不足部分以化肥磷和钾补充;NP、PK和NK处理与NPK处理相比只少施氮、磷、钾养分中相应的某一肥料,其余相同。有机肥由粉碎的小麦秸秆、大豆饼和棉籽饼按100:40:45比例混合,经2个月的堆制发酵而成,依据有机肥中氮含量确定有机肥用量^[9]。

1.2 测定项目与方法

2007年小麦收割后,在每个试验小区内采用蛇形五点取样法取耕层土壤(0—20 cm)进行混合,土壤样品经自然风干、粉碎后,供测定土壤总有机碳(C_T)和氮(N_T)、腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量。腐殖质根据其溶解性,可分为3大类:胡敏酸(HA,只溶于碱不溶于酸),富里酸(FA,既溶于酸又溶于碱)和胡敏素(HM,酸碱都不溶)。

土壤总可提取腐殖质(包括胡敏酸和富里酸)采用0.1 mol/L焦磷酸钠和0.1 mol/L氢氧化钠浸提^[12],总活性腐殖质(包括活性胡敏酸和活性富里

酸)采用 0.1 mol/L 氢氧化钠浸提^[13]。测定过程^[12]:称取过 0.25 mm 筛的风干土 5 g,放入 250 mL 锥形瓶中,加入 100 mL 上述浸提剂,加塞,在往复式振荡器(180 r/min)上振荡 5 min,放在沸水中煮 60 min,过滤后分取部分滤液测定总可浸提腐殖质和活性腐殖质全碳和氮含量,另分取部分滤液,经酸化后,使胡敏酸沉淀,分离富里酸,再用 0.05 mol/L 氢氧化钠溶解,然后分取部分溶液测定胡敏酸碳和氮含量。

土壤总有机碳、腐殖质及活性腐殖质组分碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;土壤总有机氮、腐殖质及活性腐殖质组分氮采用半微量凯氏法测定;富里酸及活性富里酸碳和氮含量以及胡敏素碳和氮含量采用差减法求得^[12]。

不同施肥处理 2007 年土壤容重和自然含水率及历年作物平均产量参见文献[11]。

数据采用 SPSS10.0 软件进行统计和分析,不同施肥处理土壤各变量之间的显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著极差法(SSR)。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤腐殖质组分碳含量的影响

土壤腐殖质的组成状况是衡量其品质的重要指标。土壤腐殖质中最活跃的是胡敏酸(HA),它较富里酸(FA)的酸度小,呈微酸性,但它的阳离子交换量较高,对土壤结构的形成起着重要作用^[14]。FA 作为腐殖质中分子量较小、活性较大、氧化程度较高的组分,它既是形成 HA 的一级物质,又是 HA 分解的一级产物,在 HA 的积累和更新中起着重要的作用^[15]。胡敏素(HM)是有机碳和氮的重要组成部分,在碳截获、土壤结构、养分保持、氮素循环、生物地球化学循环等方面都占有重要地位^[16]。由表 1 可知,不同处理的土壤胡敏酸碳(C_{HA})、富里酸碳(C_{FA})和胡敏素碳(C_{HM})含量差异显著。与 CK 处理相比,OM 和 1/2OMN 处理 C_{HA} 含量分别增加 194.7%和 116.0%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 65.6%、50.4%、35.1%和 13.0%;OM 和 1/2OMN 处理 C_{FA} 含量分别增加 162.1%和 94.2%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 50.5%、36.9%、26.2%和 8.7%;OM 和 1/2OMN 处理 C_{HM} 含量分别增加 80.4%和 47.5%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 18.4%、15.8%、12.7%和 3.2%。有机肥处理下 C_{HA} 、 C_{FA} 和 C_{HM} 含量增加幅度较大,且显著高于无机

肥处理;NPK 处理 C_{HA} 和 C_{FA} 含量显著高于 PK 和 NK 处理,而各无机肥处理间 C_{HM} 含量并无显著差异。

土壤活性腐殖质是参与土壤碳、氮循环最活跃的部分腐殖质^[17]。不同施肥处理活性胡敏酸碳(C_{LHA})和活性富里酸碳(C_{LFA})含量差异显著(表 1)。与 CK 处理相比,OM 和 1/2OMN 处理 C_{LHA} 含量分别增加 295.9%和 164.9%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 98.6%、73.0%、43.2%和 14.9%;OM 和 1/2OMN 处理 C_{LFA} 含量分别增加 218.2%和 122.7%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 65.2%、51.5%、31.8%和 10.6%。有机肥处理 C_{LHA} 和 C_{LFA} 含量也显著高于无机肥处理;NPK 处理 C_{LHA} 含量显著高于 PK 和 NK 处理,而 NPK、NP 和 PK 处理 C_{LFA} 含量间无显著差异。

土壤腐殖质组成中胡敏酸碳(C_{HA})与富里酸碳(C_{FA})之比值(C_{HA}/C_{FA})可以表征土壤腐殖质组成的性质^[18],是评价土壤腐殖质优劣的重要指标,比值越大,品质越好^[19]。表 1 还看出,各处理土壤腐殖质中 C_{HA}/C_{FA} 为 1.27~1.44,活性胡敏酸碳与活性富里酸碳比值(C_{LHA}/C_{LFA})为 1.14~1.41。不同处理土壤 C_{HA}/C_{FA} 和 C_{LHA}/C_{LFA} 均以不施肥处理最低,有机肥处理总体上高于无机肥处理;不同处理土壤 C_{LHA}/C_{LFA} 差异显著,而不同处理土壤 C_{HA}/C_{FA} 差异不显著。说明施肥有利于土壤腐殖质品质的提高,且活性腐殖质中活性胡敏酸碳与活性富里酸碳比值对施肥措施的响应更为灵敏。

2.2 施肥对土壤腐殖质组分氮含量的影响

不同处理下土壤胡敏酸氮(N_{HA})、富里酸氮(N_{FA})和胡敏素氮(N_{HM})含量差异显著(表 2)。与 CK 处理下相比,OM 和 1/2OMN 处理 N_{HA} 含量分别增加 160.9%和 100.6%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 53.4%、42.0%、29.3%和 8.6%;OM 和 1/2OMN 处理 N_{FA} 含量分别增加 120.8%和 70.8%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 35.4%、27.1%、20.8%和 6.2%;OM 和 1/2OMN 处理 N_{HM} 含量分别增加 74.4%和 42.3%,NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 16.7%、13.1%、10.1%和 3.0%。不同处理下腐殖质组分氮变化规律与腐殖质组分碳相似,有机肥处理下 N_{HA} 、 N_{FA} 和 N_{HM} 含量增加幅度较大,且显著高于无机肥处理;NPK 处理下 N_{HA} 含量显著高于 PK 和 NK 处理,而各无机肥处理间 N_{FA} 和 N_{HM} 含量并无显著差异。

表 1 施肥对土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳的影响

Table 1 Effects of fertilization on soil humus C and labile humus C fractions

处理 Treatment	C_T (g/kg)	腐殖质组分碳 Humus C fractions							活性腐殖质组分碳 Labile humus C fractions				
		C_{HA} (g/kg)	C_{FA} (g/kg)	C_{HM} (g/kg)	C_{HA}/C_{FA} (%)	C_{HA}/C_T (%)	C_{FA}/C_T (%)	C_{HM}/C_T (%)	C_{LHA} (g/kg)	C_{LFA} (g/kg)	C_{LHA}/C_{LFA} (%)	C_{LHA}/C_T (%)	C_{LFA}/C_T (%)
NPK	5.59 c	2.17 c	1.55 c	1.87 c	1.40 a	38.8 abc	27.7 a	33.5 de	1.47 c	1.09 c	1.34 ab	26.4 b	19.6 ab
NP	5.21 cd	1.97 cd	1.41 cd	1.83 c	1.40 a	37.9 bc	27.1 a	35.0 cd	1.28 cd	1.00 c	1.28 ab	24.6 bc	19.3 ab
1/2OMN	7.16 b	2.83 b	2.00 b	2.33 b	1.43 a	39.6 ab	28.0 a	32.4 e	1.96 b	1.47 b	1.34 ab	27.5 ab	20.6 ab
OM	9.41 a	3.86 a	2.70 a	2.85 a	1.44 a	41.1 a	28.6 a	30.2 f	2.93 a	2.10 a	1.41 a	31.2 a	22.4 a
PK	4.85 de	1.77 d	1.30 de	1.78 c	1.36 a	36.5 cd	26.9 a	36.7 bc	1.06 de	0.87 cd	1.23 ab	21.8 cd	17.9 b
NK	4.23 ef	1.48 e	1.12 ef	1.63 c	1.32 a	34.9 de	26.6 a	38.5 ab	0.85 ef	0.73 d	1.17 b	20.2 d	17.5 b
CK	3.92 f	1.31 e	1.03 f	1.58 c	1.27 a	33.5 e	26.4 a	40.1 a	0.74 f	0.66 d	1.14 b	19.0 d	16.9 b

注 (Note): C_T —土壤有机碳 Total soil organic C; C_{HA} —胡敏酸碳 Humus acid C; C_{FA} —富里酸碳 Fulvic acid C; C_{HM} —胡敏素碳 Humin C; C_{LHA} —活性胡敏酸碳 Labile humus acid C; C_{LFA} —活性富里酸碳 Labile fulvic acid C。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同 Values followed by different letters within a column mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same as other tables.

活性胡敏酸氮 (N_{LHA}) 和活性富里酸氮 (N_{LFA}) 活性大, 易于矿化, 对氮素的供应起着重要的作用^[13]。不同施肥处理 N_{LHA} 和 N_{LFA} 含量差异显著 (表 2)。与 CK 处理相比, OM 和 1/2OMN 处理 N_{LHA} 含量分别增加 173.0% 和 106.3%, NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 59.5%、44.1%、30.6% 和 12.6%; OM 和 1/2OMN 处理 N_{LFA} 含量分别增加 140.0% 和 86.7%, NPK、NP、PK 和 NK 处理分别增加 43.3%、36.7%、23.3% 和 10.0%。有机肥处理 N_{LHA} 和 N_{LFA} 含量显著

高于无机肥处理; NPK 处理 N_{LHA} 含量显著高于 PK 和 NK 处理, 而 NPK、NP 和 PK 处理间 N_{LFA} 含量无显著差异。施肥对土壤活性腐殖质组分碳 (C_{LHA} 和 C_{LFA}) 和氮 (N_{LHA} 和 N_{LFA}) 含量的增加率均分别高于腐殖质组分碳 (C_{HA} 和 C_{FA}) 和氮 (N_{HA} 和 N_{FA}), 说明活性腐殖质组分碳和氮较腐殖质组分碳和氮对施肥措施的响应更灵敏。这与土壤活性腐殖质是腐殖质中比较活跃的部分, 易受施肥措施的影响有关^[13]。

表 2 施肥对土壤腐殖质及活性腐殖质组分氮的影响

Table 2 Effects of fertilization on soil humus N and labile humus N fractions

处理 Treatment	N_T (g/kg)	腐殖质组分氮 Humus N fractions							活性腐殖质组分氮 Labile humus N fractions			
		N_{HA} (g/kg)	N_{FA} (g/kg)	N_{HM} (g/kg)	N_{HA}/N_T (%)	N_{FA}/N_T (%)	N_{HM}/N_T (%)	N_{LHA} (g/kg)	N_{LFA} (g/kg)	N_{LHA}/N_T (%)	N_{LFA}/N_T (%)	
NPK	0.528 c	0.267 c	0.065 c	0.196 c	50.7 abc	12.3 a	37.0 cd	0.177 c	0.043 c	33.6 ab	8.2 a	
NP	0.498 cd	0.247 cd	0.061 cd	0.190 c	49.6 bc	12.2 a	38.2 bcd	0.160 cd	0.041 c	32.1 abc	8.2 a	
1/2OMN	0.670 b	0.349 b	0.082 b	0.239 b	51.9 ab	12.3 a	35.5 cd	0.229 b	0.056 b	34.4 ab	8.4 a	
OM	0.853 a	0.454 a	0.106 a	0.293 a	53.4 a	12.4 a	34.2 d	0.303 a	0.072 a	35.7 a	8.4 a	
PK	0.468 d	0.225 d	0.058 cd	0.185 c	48.0 cd	12.3 a	39.6 abc	0.145 d	0.037 cd	31.1 abc	8.0 a	
NK	0.413 e	0.189 e	0.051 cd	0.173 c	45.8 de	12.4 a	41.7 ab	0.125 e	0.033 de	30.3 bc	7.9 a	
CK	0.390 e	0.174 e	0.048 d	0.168 c	44.5 e	12.2 a	43.3 a	0.111 e	0.030 e	28.4 c	7.6 a	

注 (note): N_T —土壤有机氮 Total soil organic N; N_{HA} —胡敏酸氮 Humus acid N; N_{FA} —富里酸氮 Fulvic acid N; N_{HM} —胡敏素氮 Humin N; N_{LHA} —活性胡敏酸氮 Labile humus acid N; N_{LFA} —活性富里酸氮 Labile fulvic acid N。

2.3 施肥对土壤腐殖质组分碳和氮分配比例的影响

土壤有机碳和氮组分分配比例综合了土壤有机碳和氮绝对含量与有机碳和氮组分含量, 可以排除有机碳和氮总量的差异。胡敏酸碳分配比例是衡量

腐殖质品质优劣的标志之一^[18-20]; 胡敏素是与矿物质紧密结合的腐殖物质^[16], 胡敏素碳和氮的分配比例则可以表示不同土地管理方式下土壤有机碳和氮的稳定强度; 活性腐殖质组分碳和氮分配比例可以表征腐殖质的相对活性^[17]。由表 1 可知, 除各处理

下富里酸碳分配比例差异不显著外,其它腐殖质及活性腐殖质组分碳的分配比例均差异显著。各处理下胡敏酸碳、富里酸碳、活性胡敏酸碳和活性富里酸碳的分配比例,均以 OM 处理最高,1/2OMN 处理次之,NPK 处理高于其它无机肥处理,不施肥处理最低;各处理下胡敏素碳分配比例的大小顺序恰好与其它腐殖质及活性腐殖质组分碳的分配比例相反,以不施肥处理最高,OM 处理最低。说明施肥有利于土壤腐殖质品质的改善和活性的提高。

表 2 显示,各处理下胡敏酸氮、活性胡敏酸氮和胡敏素氮的分配比例的大小变化规律与腐殖质及活性腐殖质组分碳的分配比例相同,且处理间差异显著,而各处理下富里酸氮和活性富里酸氮分配比例变幅小,且处理间差异不显著。

2.4 施肥对土壤腐殖质 C/N 的影响

由表 3 可以看出,胡敏酸、富里酸、总可浸提腐殖质、胡敏素、活性胡敏酸、活性富里酸、总活性腐殖

质 C/N 表现为:有机肥高于无机肥处理,NPK 处理总体上高于不施肥处理和其它无机肥处理。不同处理下胡敏酸、富里酸、胡敏素和总可浸提腐殖质 C/N 差异不显著,而不同处理下活性胡敏酸、活性富里酸和活性腐殖质 C/N 差异显著。这进一步说明活性腐殖质组分碳和氮较腐殖质组分碳和氮对施肥措施的响应更灵敏。各处理下胡敏酸 C/N、富里酸 C/N、胡敏素 C/N 和全土壤 C/N 间差异显著($F = 615.799$, $\text{Sig.} = 0.000$),全土壤 C/N 显著低于富里酸 C/N,而显著高于胡敏酸 C/N 和胡敏素 C/N,且胡敏酸 C/N 显著低于胡敏素 C/N;各处理下活性胡敏酸 C/N、活性富里酸 C/N 和全土壤 C/N 间差异显著($F = 238.388$, $\text{Sig.} = 0.000$),全土壤 C/N 也显著低于活性富里酸 C/N,而显著高于活性胡敏酸 C/N;各处理下土壤总可浸提腐殖质 C/N、总活性腐殖质 C/N 和全土壤 C/N 间差异不显著($F = 1.841$, $\text{Sig.} = 0.187$)。

表 3 施肥对土壤腐殖质及活性腐殖质 C/N 的影响

Table 3 Effects of fertilization on C/N ratio of soil humus and labile humus

处理 Treatment	全土壤 Bulk soil	胡敏酸 HA	富里酸 FA	总可浸提腐殖质 Total extractable humus	胡敏素 HM	活性胡敏酸 Labile humus acid	活性富里酸 Labile fulvic acid	总活性腐殖质 Total labile humus
NPK	10.7 a	8.1 a	24.3 a	11.2 a	9.7 a	8.3 abc	25.3 ab	11.6 bc
NP	10.5 a	8.0 a	23.4 a	11.1 a	9.7 a	8.1 bc	25.0 ab	11.4 bc
1/2OMN	10.7 a	8.2 a	24.7 a	11.3 a	9.8 a	8.6 ab	26.5 ab	12.0 ab
OM	11.1 a	8.5 a	25.8 a	11.7 a	10.0 a	9.7 a	29.3 a	13.5 a
PK	10.4 a	7.9 a	22.7 a	10.9 a	9.6 a	7.3 bc	23.6 c	10.5 bc
NK	10.3 a	7.8 a	21.9 a	10.8 a	9.5 a	6.8 c	22.5 c	10.1 c
CK	10.1 a	7.6 a	22.1 a	10.7 a	9.3 a	6.8 c	22.2 c	10.0 c

3 讨论

土壤腐殖质的分解和积累在很大程度上影响着土壤肥力,是评价土壤肥力水平的重要指标之一^[19]。大量研究结果表明,长期施用有机肥或有机肥与化肥配施均能较好地促进土壤腐殖质的积累^[21-22],有机培肥还有利于年轻腐殖质的积累和土壤肥力的提高,且效果随有机肥施用量的增加而增加^[23]。张夫道^[24]对长期施肥试验资料的总结发现,少数研究结果表明施用有机肥对腐殖质积累的作用与不施肥及施用化肥相同。长期施用化肥对土壤腐殖质积累作用的研究结果也不尽相同。有研究结果表明,长期施用化肥能够促进腐殖质的积累^[21];也有研究认为,长期施用化肥能基本维持土壤腐殖质平衡^[24],但会导致土壤腐殖酸“老化”,分

子缩合度增大,且对土壤养分有效性的转化不利^[25],还有研究表明,长期施用化肥会降低土壤腐殖质含量^[20]。本研究结果看出,长期施用有机肥、化肥及有机肥与化肥配施均能提高土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量,且有机肥处理显著高于无机肥处理,这与史吉平等^[21]的研究结果相似。出现这一现象的原因在于施肥促进作物生长,增加作物产量及根茬残留量。据估计,本试验地 NPK、NP、1/2OMN、OM、PK 和 NK 处理平均每年单位面积总有机质输入量比不施肥处理分别增加 752.8%、711.9%、1081.0%、1277.8%、91.4% 和 8.6%^[11],加之试验前土壤有机质水平极低,使施用化肥处理土壤作物残留的有机碳能够补偿土壤腐殖质损耗,并可促进腐殖质积累。由于土壤自身缺氮、磷和富钾,使 NK 和 PK 处理下磷和氮分别成为植物生长的限

制因子,从而影响其养分有效性、制约作物生长、减少有机质输入,导致NK和PK处理下土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量低于NPK和NP处理。另外,有机肥中含有丰富的营养物质也能较好地促进作物生长、增加作物产量和根茬输入量,且有机肥在腐解过程中也会释放出大量腐殖质,从而使有机肥处理下腐殖质含量显著高于无机肥处理和不施肥处理。通过相关分析发现,历年小麦和玉米平均产量与土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量均呈显著正相关($P = 0.05$)。因此,土壤腐殖质组分碳和氮含量的提高对增加作物产量和稳定农业生态系统具有重要作用。

土壤腐殖质组成中,各组分的含量和所占的比例直接关系到土壤的肥力性质^[26]。胡敏酸是土壤腐殖质中的活跃成分,其存在形态、分子组成、理化性质的变化对土壤肥力特征会产生巨大影响^[27]。同时,土壤胡敏酸与土壤中无机微粒间的结合力增强,这将有利于土壤中团聚体的形成,进而使土壤形成良好的结构^[28]。本研究表明,施肥有利于胡敏酸碳和氮及活性胡敏酸碳和氮含量及分配比例的提高。因此,施肥处理下胡敏酸增加对提高土壤肥力和改善土壤结构具有重要作用。胡敏素碳的分配比例一般在20%以上,最高可达80%^[1],而本研究中胡敏素碳分配比例相对不高(30.2%~40.1%)。关于活性腐殖质碳分配比例,李卫东等^[6]的研究为3.4%~10.5%,刘世全等^[17]的研究为17.5%~49.0%。本研究中活性腐殖质碳的分配比例与刘世全等^[17]的结果相近,为35.9%~53.6%。孙维纶等^[13]的研究表明,胡敏酸氮分配比例为8.91%~10.77%,富里酸氮分配比例为19.16%~20.50%,胡敏素氮分配比例为68.73%~71.05%,活性胡敏酸氮分配比例为3.45%~4.89%,活性富里酸氮分配比例为16.14%~17.93%。与孙维纶等^[13]的结果相比,本研究中胡敏酸氮(44.5%~53.4%)和活性胡敏酸氮(28.4%~35.7%)分配比例偏高,而富里酸氮(12.2%~12.4%)、胡敏素氮(34.2%~43.3%)和活性富里酸氮(7.6%~8.4%)分配比例偏低。这可能与不同土壤类型及不同管理措施对腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮分配比例影响不同有关。

土壤HA/FA是衡量土壤腐殖质品质优劣的标志之一。长期施用有机肥及有机肥与化肥配施能提高土壤HA/FA,且施用有机肥能使胡敏酸在结构上脂肪族侧链增加,芳化度减小,在起源上更“年轻”^[29]。施用化肥对土壤HA/FA影响的研究结果

不尽相同。有研究结果表明,长期施用化肥能够提高土壤HA/FA^[3];也有研究认为,长期施用化肥会降低土壤HA/FA^[20]。由于腐殖物质含量的多少取决于形成量和分解量的相对大小^[7],而土壤环境条件决定着腐殖物质的形成是以胡敏酸为主,还是以富里酸为主^[30]。因此,造成以上结果差异的原因除了施肥措施以外,可能还与土壤环境及腐殖质的形成和分解有关。本研究结果与张翔等^[30]的结果相同,即长期施用有机肥和化肥或两者配施,都能提高土壤HA/FA,且胡敏酸含量高于富里酸,说明施肥处理土壤可浸提腐殖质中胡敏酸所占比例大,分子量大,胡敏酸结构的复杂程度增加,团粒化作用增强,土壤有机质品质朝好的方向转化。土壤HA/FA也能反映土壤的熟化程度及肥力状态,且随土壤肥力的提高而增加^[29],也随土壤熟化度提高而增加。如高度熟化的水稻土HA/FA可达1.4左右,中度熟化者为0.5左右,初度熟化者为0.2~0.3^[31]。本研究结果表明,各处理土壤HA/FA为1.27~1.44,且有机肥处理高于无机肥处理,无机肥处理高于不施肥处理。因此,施肥条件下土壤HA/FA的提高,显示了土壤由低肥力向高肥力的演变趋势^[32],及土壤熟化度由低到高的变化规律。

C/N是土壤肥力的一个重要指标,在一定程度上可以反映出土壤有机质中C、N组成的变化,且土壤有机质组分中C/N比值的差异还能说明土壤有机质降解和腐殖化程度的差异^[29]。孙维纶等^[13]的研究结果表明,富里酸C/N和活性富里酸C/N分别小于胡敏酸C/N和活性胡敏酸C/N。本研究结果恰好与之相反,即富里酸C/N和活性富里酸C/N分别高于胡敏酸C/N和活性胡敏酸C/N。出现这一差异的原因,可能与不同腐殖质组分的分解程度有关。由于富里酸既是形成胡敏酸的一级物质,又是胡敏酸分解的一级产物^[15],且施入的有机物料首先是形成非结构物质,其大部分迅速转化为富里酸,而后转化为胡敏酸^[33]。由此推测,来源于有机物料腐解的富里酸会保留有机物料的高C/N特性,而胡敏酸经微生物分解形成的富里酸会使C/N降低并趋近于全土壤C/N。本研究中,全土壤C/N显著低于富里酸C/N,而显著高于胡敏酸C/N和胡敏素C/N,胡敏酸C/N显著高于胡敏素C/N。这进一步说明了不同腐殖质组分是属于有机物料不同分解阶段的产物。有研究表明,长期施肥条件下腐殖质和土壤有机氮的变化同步进行,腐殖质C/N很少改变^[34]。本研究结果也发现,各处理土壤总可提取腐殖质

C/N、总活性腐殖质 C/N 和全土壤 C/N 之间差异不显著。

4 结论

18 年长期施肥后,与不施肥处理相比,化肥 N、P、K 两者或三者之间配施均可提高土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量,以 N、P、K 均衡施用效果最好, NP 次之, PK 和 NK 较差;与施用化肥相比,有机肥及有机肥与化肥 N、P、K 配施对提高土壤腐殖质及活性腐殖质组分碳和氮含量,以及提高土壤可浸提腐殖质(包括胡敏酸和富里酸)及活性腐殖质(包括活性胡敏酸和活性富里酸)组分碳和氮分配比例效果更好,并以完全施用有机肥效果最佳。因此,施用有机肥、有机肥与化肥 N、P、K 配施及化肥 NPK 均衡施用对增加土壤腐殖质组分含量、提高土壤肥力、增强土壤“固碳”功能和促进农业可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈兰,唐晓红,魏朝富. 土壤腐殖质结构的光谱学研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 233-239.
Chen L, Tang X H, Wei C F. Spectroscopies of soil humic substances: a review[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(8): 233-239.
- [2] 钱成,彭岳林,贾钧彦,等. 青藏高原退化土壤的生物学肥力及其变化特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1185-1190.
Qian C, Peng Y L, Jia J Y *et al.* Biological fertility and its dynamics of degraded soil in Tibet Plateau[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(7): 1185-1190.
- [3] 于淑芳,杨力,张玉兰,等. 长期施肥对土壤腐殖质组成的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 165-167.
Yu S F, Yang L, Zhang Y L *et al.* Influence of long-term fertilization on humus composition of soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(3): 165-167.
- [4] Xing B. Sorption of naphthalene and phenanthrene by soil humic acids[J]. Environ. Poll., 2001, 111: 303-309.
- [5] 吴龙华,高子勤. 腐殖质对白浆土中 Fe、Mn、Al 形态转化及磷生物有效性的影响[J]. 土壤学报, 2001, 33(1): 81-88.
Wu L H, Gao Z Q. Effect of change in humus composition on oxides of Fe, Mn, Al and phosphorus in albic soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 33(1): 81-88.
- [6] 李卫东,张明亮,逢焕成,等. 中国暖温带黑粘土的腐殖质特性及其与土壤发生的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 433-438.
Li W D, Zhang M L, Peng H C *et al.* Characteristics of humic substances and their relationships with genesis of black clay soils in warm temperate zone of China[J]. Acta Pedol. Sin., 1996, 33(4): 433-438.
- [7] 窦森,于水强,张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 458-466.
Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition[J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(3): 458-466.
- [8] 何书金,姜德华. 华北平原粮棉生产发展变化与市场机制转换[J]. 地理科学进展, 1997, 16(2): 55-61.
He S J, Jiang D H. The fluctuation and the marketing mechanism of grain and cotton production in the North Plain of China[J]. Prog. Geogr., 1997, 16(2): 55-61.
- [9] 钦绳武,顾益初,朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 367-375.
Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 1998, 35(3): 367-375.
- [10] Ding W, Meng L, Yin Y *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39: 669-679.
- [11] 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.
- [12] 中国标准出版社. 中国林业标准汇编(营造林卷 I) M. 北京: 中国标准出版社, 1998.
Standards Press of China. The collection of china forestry standardization (Afforestation volume I) M. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [13] 孙维纶,王立德,金维生,等. 秸秆直接还田对苏州地区溇育型水稻土腐殖质组成的影响[J]. 土壤通报, 1994, 25(4): 172-174.
Sun W G, Wang L D, Jing W S *et al.* Effects of straw return on humus composition of hydromorphic paddy soil[J]. Chin. J. Soil Sci., 1994, 25(4): 172-174.
- [14] 王先华,胡应高,方小宁. 不同培肥措施对黔东南几种土类土壤腐殖质的影响[J]. 铜仁职业技术学院学报(自然科学版), 2007, 5(3): 5-8.
Wang X H, Hu Y G, Fang X N. The influence on the cultivation fertilizer measure differently to several kinds of soil typies soil humus in east Guizhou province[J]. J. Tongren Vocat. Techn. Coll. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 5(3): 5-8.
- [15] 韩志卿,张电学,陈洪斌,等. 长期定位施肥小麦-玉米轮作制度下土壤有机质质量演变规律[J]. 河北职业技术师范学院学报, 2003, 17(4): 10-14.
Han Z Q, Zhang D X, Chen H B *et al.* The evolvement rule of soil's organic matter quality under the condition of long-term and oriented fertilization of wheat-corn rotation system[J]. J. Hebei Vocat. Techn. Teach. Coll., 2003, 17(4): 10-14.
- [16] 窦森,肖彦春,张晋京. 土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 934-940.
Dou S, Xiao Y C, Zhang J J. Quantities and structural characteristics of various fractions soil humin[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43

- (6): 934-940.
- [17] 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,等. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 54-57, 67.
Liu S Q, Gao L L, Pu Y L *et al.* Analysis on status of soil organic matter and N nutrient and their influencing factors in Tibet [J]. J. Soil Water Cons., 2004, 18(6): 54-57, 67.
- [18] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 杉木人工林土壤有机质研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1947-1952.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W *et al.* An overview on studies of soil organic matter in Chinese fir plantation [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1947-1952.
- [19] 江泽普,黄绍民,韦广泼,等. 不同免耕模式对水稻产量及土壤理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 362-365.
Jiang Z P, Huang S M, Wei G P *et al.* Effects of different no-tillage modes on rice yield and properties of paddy soil [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2007, 23(12): 362-365.
- [20] 张春霞,郝明德,谢佰承. 不同化肥用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 861-864.
Zhang C X, Hao M D, Xie B C. Effect of application amounts of different chemical fertilizers on soil carbon pool [J]. Chin. J. Soil Sci., 2006, 37(5): 861-864.
- [21] 史吉平,张夫道,林葆. 长期施肥对土壤有机质及生物学特性的影响[J]. 土壤肥料, 1998(3): 7-11.
Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and biology characteristics [J]. Soil Fert., 1998, (3): 7-11.
- [22] 王薇,李絮花,章燕平,等. 长期定位施肥对盐化潮土土壤腐殖质组分的影响[J]. 山东农业科学, 2008(3): 65-67.
Wang W, Li X H, Zhang Y P *et al.* Effect of long-term located fertilization on humus compositions in salinized fluvo-aquic soil [J]. Shandong Agric. Sci., 2008, (3): 65-67.
- [23] 姚铁,李俊华,池静波,等. 不同施肥条件下土壤腐殖质的变化研究[J]. 新疆农业大学学报, 2001, 24(3): 32-38.
Yao T, Li J H, Chi J B *et al.* Research on changes of soil humus in different conditions of fertilization [J]. J. Xinjiang Agric. Univ., 2001, 24(3): 32-38.
- [24] 张夫道. 长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡 I. 对土壤腐殖质积累及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(3-4): 10-21.
Zhang F D. Dynamic and balance of soil nutrients under long-term fertilization conditions I. Effects of fertilization on accumulation of soil humus and its qualities [J]. Plant Nutr. Sci., 1995, 1(3-4): 10-21.
- [25] 吕家珑,张一平,王旭东,等. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 569-572.
Lü J L, Zhang Y P, Wang X D *et al.* Effect of long-term single application of chemical fertilizer on soil properties and crop yield [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(4): 569-572.
- [26] 陈立新,宋志韬,纪萱. 红松人工林腐殖质组成及其结合形态研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 39-44.
Chen L X, Song Z T, Ji X. Study on compositions of soil humus and their combining forms of pinus koraiensis plantations [J]. Sci. Soil Water Cons., 2007, 5(3): 39-44.
- [27] Davies G, Ghabbour E A. Humic substances: structures, properties and uses [M]. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 1998. 1113-1221.
- [28] 李楠,吴景贵,夏海丰. 傅立叶变换红外光谱法表征玉米秆茬培肥土壤胡敏酸的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 974-978.
Li N, Wu J G, Xia H F. Study on humic acids of the soil applied with corn plant residue by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 974-978.
- [29] 李海波,韩晓增,王凤,等. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 112-119.
Li H B, Han X Z, Wang F *et al.* Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density fractions on black soil as affected by land use [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(1): 112-119.
- [30] Stevenson F J. Humus chemistry [M]. Chichester, USA: John Wiley and Sons, 1982. 195-220.
- [31] 周卫军,王凯荣. 不同施肥制对红壤性水稻土有机质含量及品质的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(5): 201-202.
Zhou W J, Wang K R. Effects of different fertilization on content and quality of red paddy soil [J]. Chin. J. Soil Sci., 1998, 29(5): 201-202.
- [32] 蔡晓布,钱成,彭岳林,等. 西藏中部退化农田土壤肥力的变化特征及其重建[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 603-611.
Cai X B, Qian C, Peng Y L *et al.* Fertility and restoration of degraded soil in central Tibet [J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(4): 603-611.
- [33] 赵兰坡,王杰,刘景双,等. 不同肥力条件下黑土及其有机无机复合体的腐殖质组成[J]. 应用生态学报, 2005, 15(1): 93-99.
Zhao L P, Wang J, Liu J S *et al.* Humus composition of black soil and its organo-mineral complexes under different fertility level [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 15(1): 93-99.
- [34] 张夫道. 长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡 II. 对土壤氮的有效性和腐殖质氮组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 39-48.
Zhang F D. Dynamic and balance of soil nutrients under long-term fertilization conditions II. Effect on N availability and composition of humus N [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(1): 39-48.