

王小利,周志刚,郭振,等. 长期施肥下黄壤稻田土壤有机碳和全氮的演变特征[J]. 江苏农业科学,2017,45(14):195-199.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.14.053

长期施肥下黄壤稻田土壤有机碳和全氮的演变特征

王小利¹,周志刚¹,郭振¹,段建军²,张雅蓉³,李渝³,蒋天明³

(1. 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质重点实验室,贵州贵阳 550025;

3. 贵州省农业科学院/农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站,贵州贵阳 550006)

摘要:以贵州黄壤稻田 19 年长期施肥定位试验为基础,选取对照(CK)、单施氮肥(N)、单施有机肥(M)、氮磷钾肥配施(NPK)、低量有机无机肥配施(0.5 MNPK)和常量有机无机肥配施(MNPK)6 个施肥处理,通过历史土样收集、田间取样和室内分析,结合趋势拟合,研究不同施肥下黄壤稻田有机碳(SOC)和全氮(TN)的时序变化规律,阐明长期施肥下黄壤稻田土壤碳氮含量的演变特征,揭示土壤培肥和固碳供氮的关系,为合理施肥提供理论依据。结果表明,1995—2006 年各处理土壤有机碳含量和全氮含量呈下降趋势,2006—2014 年呈增长趋势,其中施用有机肥的处理(M、MNPK 和 0.5 MNPK)对土壤有机碳含量和全氮含量的提升幅度大于单施化肥处理(N、NPK)。2006—2014 年除 CK 处理外,其他处理土壤有机碳含量演变趋势均为显著的线性增加,年增长率依次为 0.62 g/kg(M)、0.61 g/kg(MNPK)、0.59 g/kg(0.5 MNPK)、0.49 g/kg(N)和 0.40 g/kg(NPK),均显著高于 CK(0.17 g/kg)。与 2006 年对比,2014 年各施肥处理土壤全氮含量均有增加,其中 M 增幅最高(81.9%),其次是 MNPK(52.9%)、NPK(45.2%)、0.5 MNPK(34.9%)和 N(18.0%)。2006—2014 年各施肥处理土壤全氮含量的演变趋势与有机碳含量大体相同,除 CK 处理和 N 处理外,其他各处理土壤全氮含量均呈显著增加趋势($P < 0.05$)。经长期施肥后,黄壤稻田各处理土壤碳氮比稳定在 12.3 左右。单施有机肥或者有机无机肥配施可以显著增加土壤有机碳和全氮的含量。长期有机肥化肥配合施用是土壤培肥的最佳选择。

关键词:黄壤稻田;长期施肥;土壤;有机碳;全氮;演变特征

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)14-0195-05

土壤有机碳对土壤的物理、化学和生物化学过程起着重要的调控作用,不仅是评价土壤肥力的重要指标,也是全球碳循环的重要组成部分^[1-2]。氮是植物必需的三大营养元素之一,土壤碳氮之间存在一定的耦合关系。长期施肥向农田土壤中输入大量的碳、氮等元素,从而维持作物产量、提高土壤肥力^[3],研究长期施肥下黄壤稻田土壤有机碳含量和全氮含量的演变特征,对于全球变化和国家安全具有重要意义^[4],同时可为我国西南地区农田土壤固碳和地力提升的技术选择提供科学依据。目前,国内外学者已通过室内模拟试

验^[5]、野外长期定位监测^[6]和区域调查分析^[7]等方法对土壤碳、氮周转和演变过程及其影响因子进行了大量研究,结果表明生态系统中氮投入的变化影响了土壤-植物系统中碳的积累、分配与循环过程。农田长期定位试验结果表明,施用有机肥或有机化肥配施能够显著提高黑土^[8-9]、灰壤土^[10-11]、红壤^[12]、太湖地区黄泥土^[13]有机碳含量和全氮含量。张磷等研究表明,氮磷钾化肥未平衡施用会使土壤全氮含量持平或有所降低^[14],单施化肥不利于土壤碳、氮积累^[15],而吕树鸣等却认为长期偏施化肥会使土壤全氮含量升高^[16]。刘畅等在我国南方红壤稻田的研究发现,贫瘠红壤长期有机无机肥配施或单施有机肥土壤有机碳、氮含量均呈增加趋势,两者之间具有较好的耦合效应;但长期单施化肥二者之间表现为非耦合效应,即土壤有机碳含量显著增加、土壤全氮含量却有降低趋势^[17]。Hyonen 等在北欧 15 个长期定位试验站的研究结果表明,增加氮投入减少了土壤有机碳的矿化,从而增加了土壤有机碳的积累^[18];而有机碳的输入又在一定程度上有利于土壤氮的积累^[19],即二者相互依存,存在耦合关系。总之,前人的众多研究主要集中在长期施肥措施对土壤有机碳、

收稿日期:2016-05-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360503、41361064);贵州大学研究生创新基金(编号:研农 2015038);贵州省农业科学院自主创新专项(编号:黔农科院自主创新专项 2014007 号);贵州省科技计划(编号:黔科合 NY 字[2012]3082 号;黔科平台[2013]4002 号)。作者简介:王小利(1979—),女,山西吕梁人,副教授,主要从事长期施肥下土壤有机碳演变特征研究。E-mail:xlwang@gzu.edu.cn。通信作者:段建军,副教授,主要从事土壤有机碳研究。E-mail:djjwxl@126.com。

[7]曾燕,邱新法,刘昌明,等. 1960—2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展,2007,18(3):311-318.

[8]魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[9]白静漪,管兆勇. 华东地区夏季不同等级降水变化特征分析[J]. 气象科学,2014,34(4):365-372.

[10]邱新法,张喜亮,曾燕,等. 1961—2005 年江苏省降水变化趋

势[J]. 气象,2008,34(5):82-88.

[11]Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. Journal of Climate, 2001,14(9):1959-1976.

[12]谭云娟,邱新法,曾燕,等. 近 50a 来中国不同流域降水的变化趋势分析[J]. 气象科学,2016,36(4):494-501.

全氮含量的影响方面,而对碳、氮耦合关系的研究报道较少,尤其是针对贵州黄壤稻田土壤,单施化肥是否能够促进土壤有机碳、全氮含量的同步增减还有待研究。因此,本研究以贵州黄壤性水稻土长期定位试验地为对象,收集1995年、1996年、2006年、2008年、2010年、2012年、2014年6个不同施肥处理的土壤样品数据,研究长期施肥条件下土壤有机碳和全氮的消长规律及耦合关系,阐明不同施肥措施对贵州黄壤稻田土壤碳、氮含量演变的影响,为评估土壤固碳潜力、提升黄壤区耕地质量提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试验地概况

长期试验地位于贵州省贵阳市小河区贵州省农业科学院内(106°07'E,26°11'N),地处黔中丘陵区,属亚热带季风气候,平均海拔1071 m,年均气温15.3℃,年均日照时数1354 h左右,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d左右,年降水量1100~1200 mm。试验地为黄壤性水稻土,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。该长期定位试验起始于1995年。采用大区对比试验,种植1季水稻,小区面积201 m²(35.7 m×5.6 m),不设重复。共有11个处理,本研究选取了其中6个不同施肥处理:(1)不施肥(CK);(2)单施氮肥(N);(3)单施有机肥(M);(4)氮磷钾肥配施(NPK);(5)低量有机无机肥配施(0.5 MNPK);(6)常量有机无机肥配施(MNPK)。化肥为尿素(含46% N)、过磷酸钙(含16% P₂O₅)、氯化钾(含60% K₂O),常规用量(NPK处理)每年施165.0 kg/hm² N、36.0 kg/hm² P₂O₅、68.5 kg/hm² K₂O,M处理施用有机肥61.1 t/hm²。所施用有机肥为牛廐肥(平均含413.8 g/kg C、2.7 g/kg N、1.3 g/kg P₂O₅、6.0 g/kg K₂O),每年按照有机肥养分含量来调节化学氮肥施用量,除MNPK处理氮肥施用量不同外,其余施氮小区的氮素施用量相同。种植制度为1年1季水稻,在水稻播种前按处理分别施用磷钾肥或配施有机肥作基肥,各处理在水稻生长期中追肥2次尿素。种植的水稻品种为金麻粘(1993—1998年)、农虎禾(1999—2001年)、香两优875(2007—2008年)、汕优联合2号(2009年)和茂优601(2010—2014年)。2002—2006年由于试验基地灌溉设施损毁,无法满足水稻种植,改种玉米。水稻于每年4月份插秧,10月中下旬收获,其他时间休闲。具

体施肥方案如表1所示。

表1 各处理的纯养分年施用量

处理	牛廐肥 (t/hm ²)	N (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	K ₂ O (kg/hm ²)
CK	0	0	0	0
N	0	165.0	0	0
M	61.1	165.0	34.7	304.2
NPK	0	165.0	36.0	68.5
0.5 MNPK	30.6	165.0	35.4	186.4
MNPK	61.1	330.0	70.7	372.7

1.2 土壤样品收集和测定

2014年10月水稻收获后,采集各小区0~20 cm耕层土壤样品:将各小区等分为3个样块(67 m²),每个样块均匀布点采集5点组成1个混合样,每个小区采集3个土壤样品作为3次重复。除去动、植物残体后混匀,待土壤样品风干后过孔径2 mm筛,备用。同时收集2006年、2008年、2010年、2012年水稻收获后的历史土壤样品进行分析测定。采用重铬酸钾氧化法测定有机碳含量,凯氏定氮法测定全氮含量^[20]。

1.3 数据分析

采用Excel软件和SPSS软件进行统计分析,所有土壤样品的测定结果均为3次重复的平均值。不同施肥处理之间采用最小显著差数法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 长期施肥下黄壤稻田土壤有机碳的演变特征

长期施肥(1995—2014年)下黄壤稻田土壤有机碳随时间的演变特征如图1-A所示。由图1-A可知,经历19年的长期施肥后,施用有机肥处理(M、0.5 MNPK和MNPK)土壤有机碳含量(28.30~33.18 g/kg)明显高于单施化肥处理(N和NPK,23.77~24.63 g/kg)和不施肥处理(CK,23.87 g/kg)($P < 0.01$)。与试验起始年份(1995年)相比,2014年M、MNPK、0.5 MNPK处理土壤有机碳含量分别提高了13.7%、14.5%、7.8%,而CK、N、NPK处理土壤有机碳含量依次降低了7.6%、23.2%、6.8%。1995—2006年间因水田改为旱地导致各处理土壤有机碳含量均呈下降趋势。

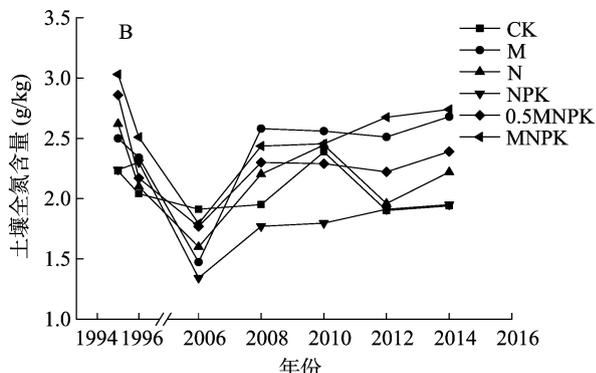
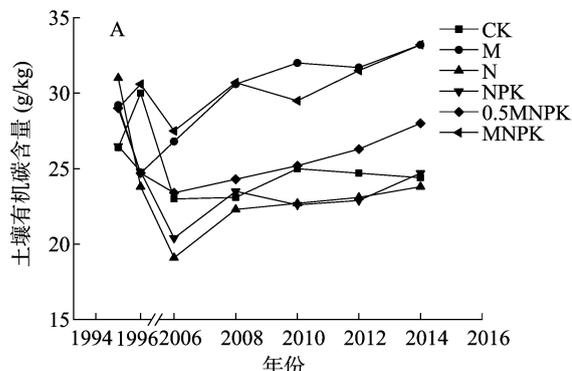
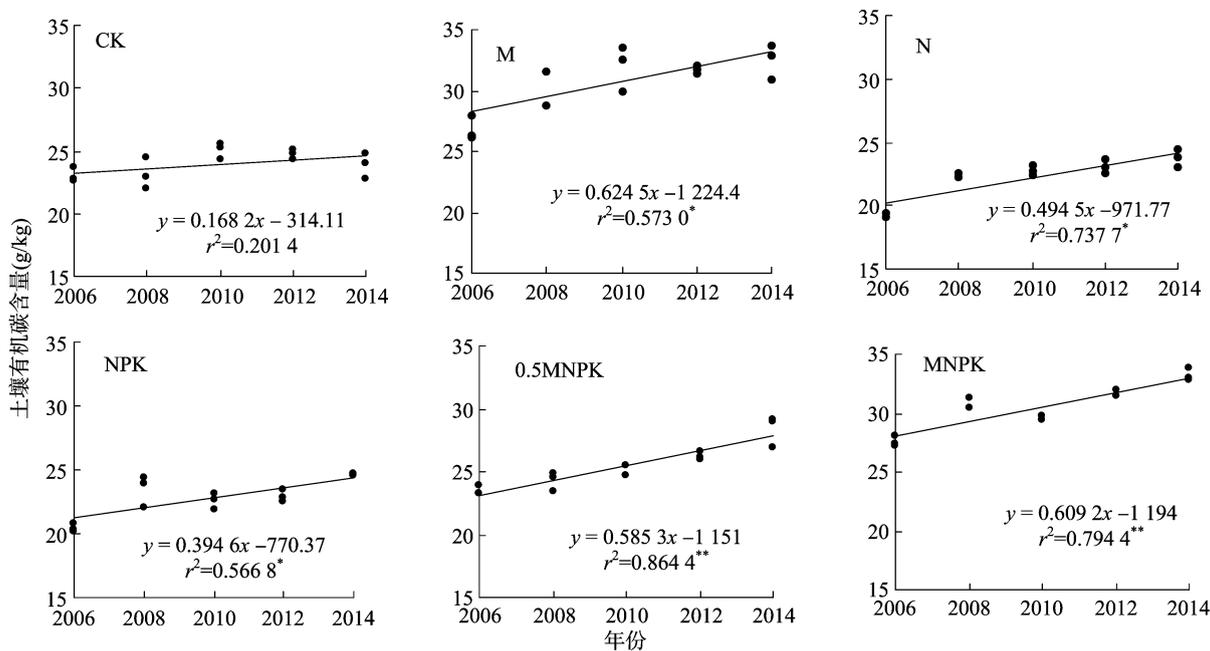


图1 长期施肥下黄壤稻田有机碳和全氮含量的变化趋势(1995—2014年)

图2显示了2006—2014年黄壤稻田土壤总有机碳含量(y ,g/kg)随时间(x ,年份)的演变特征及拟合的线性回归方程和参数。由图2可以看出,除CK处理外,其他施肥处理的

土壤总有机碳含量与施肥时间均呈极显著的线性正相关关系($P < 0.01$)。CK处理下土壤有机碳含量较2006年(23.01 g/kg)增加了3.7%;化肥处理(N和NPK)下土壤有



r^2 为回归方程的决定系数；*表示 $P < 0.05$ ，**表示 $P < 0.01$ ；下同
图2 长期施肥下黄壤稻田2006—2014年期间土壤有机碳含量的增长趋势($n=15$)

机碳含量的年增长速率分别为0.49、0.39 g/kg,年增长幅度分别为23.9%、20.6%；有机肥处理(0.5 MNPk、M和MNPk)下土壤有机碳含量的年增长速率较高(0.59~0.62 g/kg),增幅为20.6%~21.3%。说明长期施用有机肥能够显著地增加土壤有机碳含量。

2.2 长期施肥下黄壤稻田土壤全氮的演变特征

1995—2014年黄壤稻田长期施肥试验土壤全氮演变特征如图1-B所示,总体上与土壤有机碳规律相似。由图1-B可知,经历19年的长期施肥后,施用有机肥处理(M、0.5 MNPk和MNPk)土壤全氮含量(2.39~2.74 g/kg)明显高于

单施化肥处理(N和NPK,1.89~1.95 g/kg)和不施肥处理(CK,1.94 g/kg)($P < 0.01$)。与1995年相比,2014年M处理和0.5 MNPk处理土壤全氮含量分别增加7.2%、11.7%,而其他处理均有不同程度下降。其中,1995—2006年各处理土壤全氮含量都呈明显下降趋势。

由图3可以看出,2006—2014年期间,除CK处理和N处理外,其他各施肥处理土壤全氮含量随时间均呈显著增加趋势($P < 0.05$)。CK处理下土壤全氮含量较2006年(1.91 g/kg)增加了1.7%；化肥处理(N和NPK)下土壤全氮含量的年增长速率分别为0.02、0.07 g/kg,年增长幅度分别

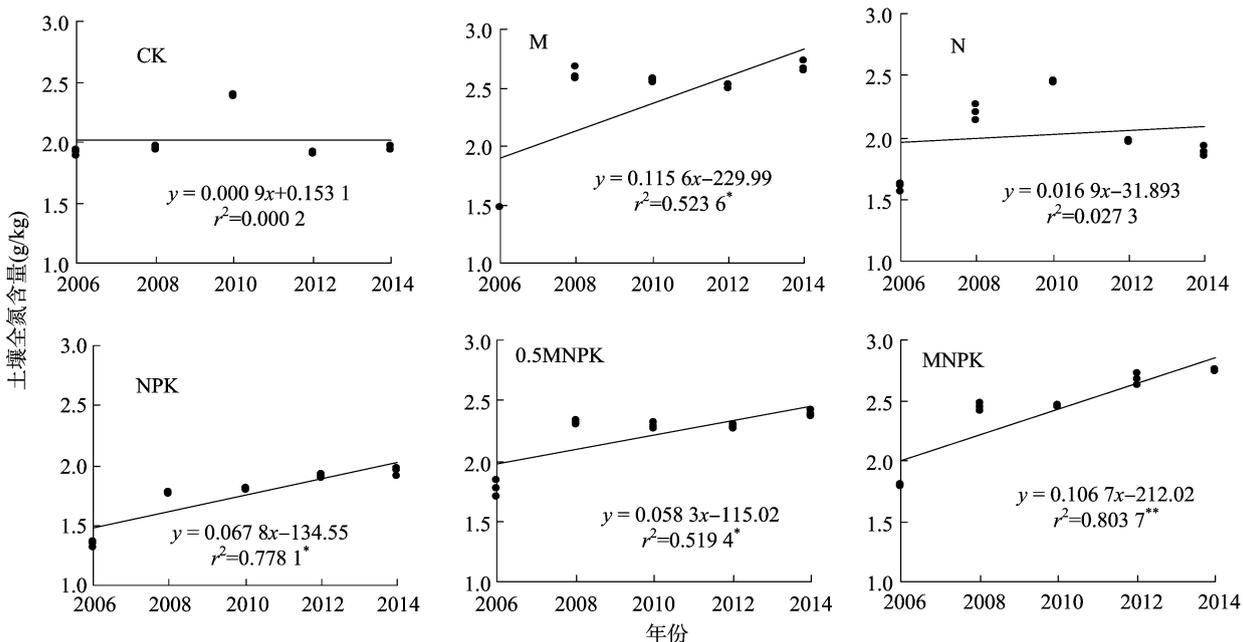


图3 长期施肥下黄壤稻田2006—2014年期间土壤全氮含量的增长趋势($n=15$)

为 18.0%、45.2%；有机肥处理(0.5 MNPK、M 和 MNPK)下土壤全氮的年增长速率较高(0.06 ~ 0.12 g/kg)，增幅为 34.9% ~ 81.9%。说明长期施用有机肥能够显著地增加土壤全氮含量。有机无机配施更有利于土壤对氮的固定和保护，即有机无机配施可以减少土壤氮特别是施入土壤的氮肥氮的损失，提高氮肥利用率。

2.3 长期施肥对黄壤稻田土壤碳氮比的影响

由表 2 可以看出，长期施肥条件下黄壤稻田土壤碳氮比介于 9.3 ~ 18.2 之间。除 2006 年之外，其余年份土壤碳氮比亦无明显变化，总体平稳。2014 年各施肥处理土壤平均碳氮

比(12.3 ± 0.3)略高于试验开始年份(1995 年, 11.3 ± 0.9)，各处理间土壤碳氮比差异不显著($P > 0.05$)。总体上，不同施肥处理对土壤碳氮比的影响不显著。这表明随着施肥耕种年限的推移，各处理土壤碳氮转化耦合关系已重新趋于稳定，即碳氮比趋于稳定。试验地 2002—2006 年种植玉米，本研究结果表明，2006 年(旱作)各施肥处理土壤碳氮比明显高于其他年份(水作)，表明土地利用方式和农田管理改变(如水旱变更)可迅速对土壤碳氮比产生影响，并迅速达到新的平衡。而一般研究认为相同区域旱地土壤碳氮比要低于水田^[21]，本研究有所不同，其原因有待于进一步研究。

表 2 长期不同施肥下黄壤稻田土壤碳氮比

处理	土壤碳氮比								平均值	标准差
	1995 年	1996 年	2006 年	2008 年	2010 年	2012 年	2014 年			
CK	11.7a	14.7a	12.0d	11.8b	10.5b	13.0a	12.3a	12.3	1.3	
M	11.7a	10.5d	18.2a	11.7b	12.5a	12.6b	12.1a	12.8	2.5	
N	11.8a	11.4c	12.0d	10.1c	9.3c	11.8cd	12.6a	11.3	1.2	
NPK	11.9a	10.8cd	15.2b	13.3a	12.5a	12.0c	12.6a	12.6	1.4	
0.5 MNPK	11.1b	11.4c	13.3c	10.5c	11.0b	11.5d	11.9a	11.5	0.9	
MNPK	9.6c	12.2b	15.4b	12.6ab	12.0a	11.8cd	12.1a	12.2	1.7	
平均值	11.3	11.8	14.3	11.7	11.3	12.1	12.3			
标准差	0.9	1.5	2.4	1.2	1.3	0.6	0.3			

注：同列数据后不同小写字母表示其差异达到 0.05 的显著水平。

3 讨论

土壤有机碳含量的演变是一个长期复杂的过程，这一过程受诸多因素的影响，其中施肥尤其是施用有机肥是调控土壤有机碳含量的重要措施之一。本研究中，经历 19 年的长期施肥(1995—2014 年)之后，施用有机肥处理(M、0.5 MNPK 和 MNPK)土壤有机碳含量明显高于单施化肥处理(N 和 NPK)和不施肥处理(CK)，且化肥处理下土壤有机碳含量的年增长速率低于有机肥处理。与试验起始年份(1995 年)相比，2014 年 M、MNPK 和 0.5 MNPK 处理土壤有机碳含量分别提高了 13.7%、14.5%、7.8%，说明长期施用有机肥能够显著增加土壤有机碳含量，这与已有的文献报道^[12-13, 22-24]是一致的。这是由于有机肥的施用可以直接转化为土壤中的有机碳，而且施肥可改善土壤的速度养分状况进而促进作物生长，从而增加进入土壤的作物归还量^[25]。有研究表明，由于长期单施化肥能够增加作物产量，地下部作物残茬也相应增加，继而导致施用化肥比无肥处理更高的 SOC 含量^[26]。本研究中，与试验起始年份(1995 年)相比，2014 年 CK、N、NPK 处理土壤有机碳含量依次降低了 7.6%、23.2%、6.8%，说明长期不施肥和单施化肥并不能够增加土壤有机碳含量或只能保持土壤有机碳含量稳定。这与国内的其他研究结果^[9, 11, 27]一致，这与试验的区域生态气候条件以及试验土壤的本底值有关，当试验前土壤有机碳含量低于最低平衡点时，施用化肥能够增加土壤有机碳含量^[28]。许咏梅研究表明，在新疆特殊的生态气候条件下，长期施用化肥使作物增产而形成的残茬碳不足以弥补荒漠土有机碳矿化造成的损失^[11]，因此表现为下降趋势^[10]。赵雨娟等研究表明，无肥、单施氮肥下东北黑土有机质含量呈下降趋势，说明对于高有机质含量的腐殖土，开垦后导致矿化增加，即使施肥也无法保持土壤有机质的水

平^[9, 27]。张淑香等研究发现，连续 30 年单施化肥，东北黑土有机质含量呈缓慢下降趋势，其他区域稳定缓慢上升^[22]。

本研究中，1995—2006 年土壤有机碳含量呈现下降趋势，2006—2014 年，各施肥处理土壤有机碳含量呈极显著线性增加趋势。这是由农田耕作制度的变更所致，2002—2006 年期间试验地由于缺水改为旱地，2007 年又重新种植水稻。旱地通透性强，有利于土壤微生物的活动，从而造成了对土壤有机质的消耗，而改为水田后，淹水缺氧条件抑制了土壤微生物的活动，进而有利于土壤有机质的积累^[13]；另一方面，改为水田后可能促进土壤的团聚作用，进而增加对土壤有机碳的保护作用，所以从 2007 年开始，有机碳含量开始呈现升高趋势。国内其他学者的研究也表明相同条件下水田土壤有机碳含量均明显高于旱地土壤^[29-30]。

不同施肥处理对稻田土壤氮素含量有一定的影响，与土壤有机碳的演变规律大体相同。在 1995—2006 年期间，土壤全氮含量由于土地利用方式的改变有所降低。但 2006—2014 年，除 CK 处理和 N 处理外，其他各施肥处理的土壤全氮含量均呈显著线性增长的趋势，由于 2007 年旱地改为水田，土壤全氮水平起点不同，当土壤全氮含量低于最低平衡点时，长期不同施肥处理土壤全氮水平都有所升高，但是随后几年土壤全氮水平达到平衡点后，长期施用化肥处理土壤氮素含量虽呈增加趋势，但年均增长速率较为缓慢，可以看出长期施用化肥对土壤氮素的积累作用不显著，因为单独施用化肥时，一部分化肥氮被作物吸收，而未被作物吸收的将通过挥发作用、硝态氮的淋洗等途径损失，只有很少一部分化肥氮残留于土壤中^[31]。而有机无机肥配施可显著提高土壤氮素的积累，这是因为有机质含量的提高有利于土壤微生物的生长，加强了氮素的矿化和硝化作用，从而促进土壤中氮的固定。

土壤碳氮比可反映土壤碳、氮的耦合关系，是评价土壤质

量水平的一个重要指标。本研究中,至2014年,各施肥处理间土壤碳氮比差异不显著,保持在12.3左右,表明碳氮比趋于稳定。说明施肥措施对表层土壤碳氮比的影响不显著,这与骆坤等的研究结果^[8,27,29]一致。2006年(旱作)土壤碳氮比明显高于其他年份(水作),而一般研究认为相同区域旱地土壤碳氮比要低于水田^[21],其原因有待于进一步研究。土壤碳氮比主要与土壤有机质的腐殖化程度有关,新鲜有机物的碳氮比往往比较高,随着腐殖化程度的提高碳氮比呈现下降趋势,张春华等研究表明,在追求高产的前提下,碳氮的合理投入是维持土壤碳氮耦合平衡的关键,有机质越高的地区,随氮素投入水平的提高,有机碳积累越困难,容易引起碳氮比的降低^[32]。因此,在提高氮素投入水平的同时,还应注重碳氮的归还水平,大力推广增施有机肥和秸秆还田,以保持土壤碳氮比的稳定提高^[33],稻田土壤是一种长期淹水状态下的熟化土,这可能是导致碳氮比值差异小的原因之一^[28]。

4 结论

不同施肥处理土壤总有机碳含量和全氮含量随时间均呈显著的线性增加趋势,表明贵州黄壤性水稻土土壤有机质含量尚处于远离饱和点的低水平状态,具有较大的固碳潜力和固碳容量。单施化肥对土壤有机碳含量和全氮含量的提高作用比较小,单施有机肥或者有机无机肥配施可以显著增加土壤有机碳含量和全氮的含量。施有机肥时配施氮肥更利于土壤固碳,施氮肥时配施有机肥更有利于土壤保氮,并维持适宜的碳氮比和碳氮耦合关系。

参考文献:

[1] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Ecology managing soil carbon [J]. *Science*, 2004, 304 (5669) : 393

[2] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129 (1) : 344 - 348.

[3] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.

[4] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (4) : 384 - 393.

[5] Trinsoutrot I, Recous S, Bentz B, et al. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (3) : 918 - 926.

[6] Wright A L, Hons F M, Rouquette F M. Long - term management impacts on soil carbon and nitrogen dynamics of grazed bermudagrass pastures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36 (11) : 1809 - 1816.

[7] Huang Y, Sun W J. Changes in top soil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (15) : 1785 - 1803.

[8] 骆坤. 黑土碳氮及其组分对长期施肥的响应 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.

[9] 赵丽娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化IV. 有机碳组分的变化 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (5) : 817 - 821.

[10] 刘 骅, 佟小刚, 许咏梅, 等. 长期施肥下灰漠土有机碳组分含

量及其演变特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (4) : 794 - 800.

[11] 许咏梅. 长期不同施肥下新疆灰漠土有机碳演变特征及转化机制 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.

[12] 余喜初, 李大明, 柳开楼, 等. 长期施肥红壤稻田有机碳演变规律及影响因素 [J]. *土壤*, 2013, 45 (4) : 655 - 660.

[13] 潘根兴, 周 萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (11) : 3704 - 3710.

[14] 张 磷, 黄小红, 谢晓丽, 等. 施肥技术对土壤肥力和肥料利用率的影响 [J]. *广东农业科学*, 2005 (2) : 46 - 49.

[15] 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.

[16] 吕树鸣, 霍兴祥, 罗 皓. 长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响 [J]. *耕作与栽培*, 2004 (3) : 3 - 5.

[17] 刘 畅, 唐国勇, 童成立, 等. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19 (7) : 1489 - 1493.

[18] Hyvonen R, Persson T, Andersson S, et al. Impact of long - term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 89 (1) : 121 - 137.

[19] Heenan D P, Chan K Y, Knight P G. Long - term impact of rotation, tillage and stubble management on the loss of soil organic carbon and nitrogen from a Chromic Luvisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 76 (1) : 59 - 68.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000

[21] 许 泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22 (3) : 57 - 60.

[22] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (6) : 1389 - 1393.

[23] 骆 坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 [J]. *环境科学*, 2013, 34 (2) : 676 - 684.

[24] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4) : 831 - 836.

[25] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (19) : 3817 - 3825.

[26] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (2) : 300 - 309.

[27] 赵丽娟. 长期不同施肥方式对黑土有机碳、氮的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2005.

[28] 孔毅明. 施肥措施对稻田土壤碳、氮积累的影响 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.

[29] 徐香菇. 长期施肥下旱田与水田土壤有机碳的固存形态与特征 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015

[30] 王小利. 黄土高原和亚热带丘陵区典型生态景观单元土壤有机碳对比研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

[31] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素 [M]. 南京: 江苏科技技术出版社, 1992: 3 - 26.

[32] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征 [J]. *环境科学*, 2011, 32 (5) : 1407 - 1414.

[33] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, et al. Long - term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106 (1) : 8 - 14.