

长期施肥对土壤有机质积累的影响

赵广帅^{1,2}, 李发东^{1*}, 李运生¹, 张妍^{1,2}, 欧阳竹¹, 田振荣¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室 禹城综合试验站, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 20 年的 NPK 施肥定位试验, 有利于深刻揭示土壤肥力特征与营养平衡规律。以位于黄淮海平原的中国科学院禹城综合试验站为例, 探讨和估算了长期定量施肥对冬小麦 (*Triticusp aestvum* L.)、夏玉米 (*Zea Mays* L.) 生长和土壤有机质 (SOM) 的影响。结果表明, 长期的 N、P 肥配施或 N、P、K 均衡施肥, 可显著增加 SOM 储量, 并且后者要优于前者; SOM 增加主要集中在 0~20 cm 深度的土层, 40~60 cm 基本不变; 生物量对 SOM 储量变化影响明显, NPK, NP 处理作物生长良好, 作物残体输入明显优于其他处理; 0~40 cm 可以代表该区用以计算土壤固碳潜力, 并且在 N、P、K 均衡施肥条件下, 0~40 cm 土层中 SOM 储量长期以来持续增加, 并未达到上限, 每年的平均固碳速率 (以 C 计) 达 182.8 kg·hm⁻², 约是全球平均水平的 1.5 倍, 全国平均水平的 1.1 倍。华北平原若按 N、P、K 均衡施肥, 农田土壤每年固碳潜力将达到 1.6~2.4 Tg·a⁻¹。

关键词: 长期试验; 施肥处理; 华北平原; 土壤有机质(SOM); 固碳潜力

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0840-08

土壤有机质(SOM)一直都是农学和土壤学研究的重点^[1-2], 目前也成为应对全球气候变化研究的热点。SOM 是所有陆地生态系统关键组成部分, 其含量和组分的变化都会深刻影响系统中各种过程^[1]。SOM 主要部分—土壤有机碳 (SOC) 是地球陆地生态系统最重要和活跃的碳库, 同时又是土壤肥力和基础地力最重要的物质基础, 它影响着耕地生产力及其稳定性。全球 SOC 库为 1 200~2 000 Gt, 大约是大气 C 库的 2 倍, 植物 C 库的 2~4 倍^[2-3], 与大气交换的 SOC 大约占陆地表层生态系统碳储量的 2/3^[4-5]。因此, 即便是 SOC 库的微小变化, 对全球的碳平衡都会产生重大影响。农田土壤是最具潜力的碳汇, 它通过吸收空气中 CO₂ 以及减少全球排放来增加土壤中 SOC^[6], 土壤中 SOC 含量增加有利于保持肥力和提高作物产量^[7]。

长期施用化肥可以增加土壤有机质含量^[8], 特别在土壤肥力水平较低的情况下施用氮、磷、钾化肥能够显著提高粮食产量, 并较大幅度提高土壤有机质含量^[9]。但有研究认为施化肥可基本维持土壤有机质水平, 而长期不施肥土壤有机质下降^[10], 更有研究表明单施化肥和不施肥只会促进土壤有机质的消耗^[11]。长期施肥对 SOM 积累的影响, 特别是对于不同地区、不同土壤类型的影响有待进一步研究。华北平原包括京津的全部、

河北省的大部以及山东、河南两省的黄河以北部分, 是中国粮食主产区, 也是商品粮的重要生产基地, 每年粮食生产量占全国总量的 26.4%^[12]。长期施肥定位试验能系统地研究土壤肥力演变和肥效变化规律, 克服气候年变化对肥效的影响, 是农业生产和农业科学的一项重要的基础研究工作^[13]。研究区位于华北平原粮食主产区, 地处黄河中下游引黄灌溉区, 具有几十年的引黄历史, 并且供试土壤为中国科学院禹城综合试验站内的盐化潮土, 在黄淮海平原同类地区有代表性^[14]。因此, 通过开展不同施肥处理对有机质影响的长期试验能够恒定不同施肥对作物生长的影响、长期养分缺乏对产量的影响和不同施肥对土壤 SOM 的长期影响, 对华北地区粮食安全、施肥管理以及增加农田系统碳储量、减少温室气体排放具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期试验在中国科学院禹城综合试验站开展。试验站位于山东省禹城市 (116°36'E, 36°57'N), 平均海拔高度 20 m, 属暖温带半湿润季风气候, 多年平均气温 13.1 °C, 年降雨量 582 mm, 雨季主要集中于 7—9 月, 地下水资源丰富, 地下水位一般在 1.5~4.0 m, 农田土壤以潮土为主, 太阳辐射总量 5 225 MJ·m⁻², 日照时数 2 640 h,

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目“华北农田生态系统水、物质迁移机制及环境效应”; 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050502)

作者简介: 赵广帅 (1987 年生), 男, 硕士, 主要从事农业生态、水文研究。E-mail: zhaogsh@126.com

通信作者: 李发东 (1972 年生), 男, 研究员, 博士, 主要从事生态水文与水环境研究。E-mail: lifadong@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2012-04-16

≥0℃积温为4951℃,≥10℃积温为4441℃,无霜期200d,光热资源丰富,雨热同期,利于农业生产。

1.2 试验设计与研究内容

供试土壤为中国科学院禹城综合试验站养分平衡试验场,试验场建于1990年初,共修建20个水泥养分池(池底不封闭),每池面积为6m×5m,池壁深60cm,并设有保护行。池内的土壤为原状土,未经扰动。在每个池中放置中子水分测管,生长季内每隔5d用中子水分仪测定土壤水分含量,养分池具体如图1。供试土壤为轻度盐化潮土,发育于冲积黄土母质上,在禹城和黄淮海平原地区有一定的代表性。在正式开展试验以前,种植红麻进行匀地约6个月。

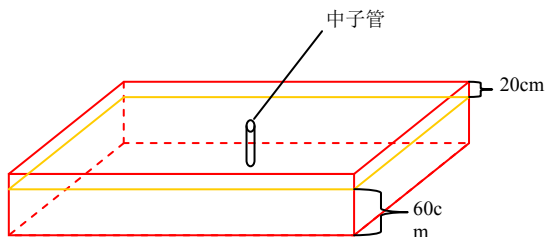


图1 养分池示意图
Fig.1 Sketch map of nutrient plot

试验设4个施肥处理,即NK(只施用氮、钾肥),NP(只施用氮、磷肥),PK(只施用磷、钾肥),NPK(氮、磷、钾均衡施肥),1个对照处理CK(不施肥),每个处理重复4次,所施肥料全部为化肥,不同试验处理的同一养分元素用量均保持一致。实施设计如图2,具体施肥量和施肥种类见表1。

南	4: PK	1: CK	3: NP	5: NPK	北
	5: NPK	2: NK	5: NPK	3: NP	
	1: CK	5: NPK	1: CK	2: NK	
	3: NP	4: PK	4: PK	1: CK	
	2: NK	3: NP	2: NK	4: PK	
公路					

图2 禹城站养分平衡场试验设计平面图
Fig.2 Design of nutrient balance site in Yucheng station

表1 施用化肥情况
Table 1 Chemical fertilizer

品种	施肥方式	施肥时间	m(过磷酸钙)/kg	m(尿素)/kg	m(硫酸钾)/kg
冬小麦	底肥	播种期	3.45	0.5	
		返青期		0.2	
		拔节期		0.7	1.25
		孕穗期		0.25	
夏玉米	一次性施入	喇叭口期	0.976	1.643	1.788

尿素含N46%,过磷酸钙含P₂O₅18%,硫酸钾含K₂O50%

自1990年10月6日开始播种冬小麦(*Triticusp aestvum* L.),以后作物均为冬小麦-夏玉米(*Zea Mays* L.)轮作。作物品种:玉米为农大108;冬小麦1990—2006年为兰考906;2007—2008年为衡529;2009至今为济麦22。其中,冬小麦每季浇3次水(冬水,拔节,孕穗)。所有处理秸秆不还田,其他常规耕作与大田相同。

1.3 田间取样、测定方法及计算方法

长期试验开始后,每年取土样2次,分别为6月份冬小麦收获后、10月份玉米收获后小麦播种前。取样深度为0~20、20~40、40~60cm,每一深度采3点混合样品。在每一季小麦收割后,采集籽粒、茎叶,每一季玉米收割后,采集籽粒、茎叶、穗轴、根。所有土壤样品和植物样品经风干、过筛后按常规分析^[15]和计算方法^[16]分别进行土壤有机质以及作物产量的测定。SOM测定时,先将土样风干,过0.25mm筛孔,然后采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定。

本研究中总SOM的计算方法:

为了避免各处理间土壤容重的差异,每个30m²试验小区0~60cm土壤总的SOM储量采用等质量土壤SOM储量方法来估算^[17],其计算公式^[1]如下:

$$Td = \sum_{i=1}^k \rho_i P_i D_i S / 1000$$

式中,Td为总SOM量(kg),k为采样层数,ρ_i为土壤容重(g·cm⁻³),P_i为SOM含量(g·g⁻¹),D_i为土壤深度(cm),S为小区面积(cm²)。

Mann-Kendall(MK)非参数检验:

MK检验主要用于时间序列数据变化趋势的检验^[18-19],本文主要用于检验不同处理各土层SOM变化趋势。检验提出两个假设,假设H₀表示数据集数据样本独立同分布,没有趋势存在,假设H₁则表示数据集中存在一个单调的趋势,具体检验公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

其中, $S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_i);$

$$\text{Sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & X_j > X_i; \\ 0 & X_j = X_i; \\ -1 & X_j < X_i \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18}$$

式中： X_i 和 X_j 为样本数据值， n 为数据集合长度， t_i 为结长等于 i 的结的个数。如果 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ ，假设 H_0 即被接受，反之，假设 H_1 被接受，其中， $Z_{1-\alpha/2}$ 是标准正态偏差， α 为检验的置信水平。 Z 值为正反映上升趋势，为负则反映下降趋势。同时，用Kendall倾斜度 β ，即单位时间内的变化量，以此来量化单调趋势。 β 可以表示为：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_i - X_j}{i - j} \right), \forall j < i$$

式中， $1 < j < i < n$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥处理 SOM 总量的长期变化

从每个 30 m²小区 0~60 cm 土层总 SOM 储量来看，长期不同施肥处理之间存在显著差异（见图 3）。1990—2009 年间，CK 处理 SOM 储量基本保持稳定，波动范围 150~230 kg，多年平均为 193 kg；NK 处理 SOM 储量略微下降并趋于稳定，而 PK 处理 SOM 储量略微上升；NP、NPK 处理

多年来 SOM 储量呈明显增加趋势，且未达到上限，波动范围 156~251、152~246 kg，多年均值 205、211 kg，较 CK 处理分别增加 6%、9%。同时，从长期观测的作物生长状况来看，不同施肥处理中 NP、NPK 处理作物生长状况良好（见表 2），其中 NPK 处理要略好于 NP 处理，二者远好于其他处理；PK 处理作物生长状况较差，但略好于

表 2 2010 年作物产量统计

Table 2 Statistics of crop yield in 2010

品种	处理	小区面积/m ²	取样	m(亩产)/kg	m(秸秆量)/g
小麦	CK	30	6m ²	27.5	596.5
	NK	30	6 m ²	33.0	747.4
	NP	30	6 m ²	387.6	3931.0
	PK	30	6 m ²	73.1	1048.2
	NPK	30	6 m ²	441.8	5843.1
玉米	CK	30	2 行	2.0	2287.5
	NK	30	2 行	0	1468.8
	NP	30	2 行	129.2	2362.5
	PK	30	2 行	96.6	2256.3
	NPK	30	2 行	394.0	4825.0

表中 0 值表明作物倒伏，无产量

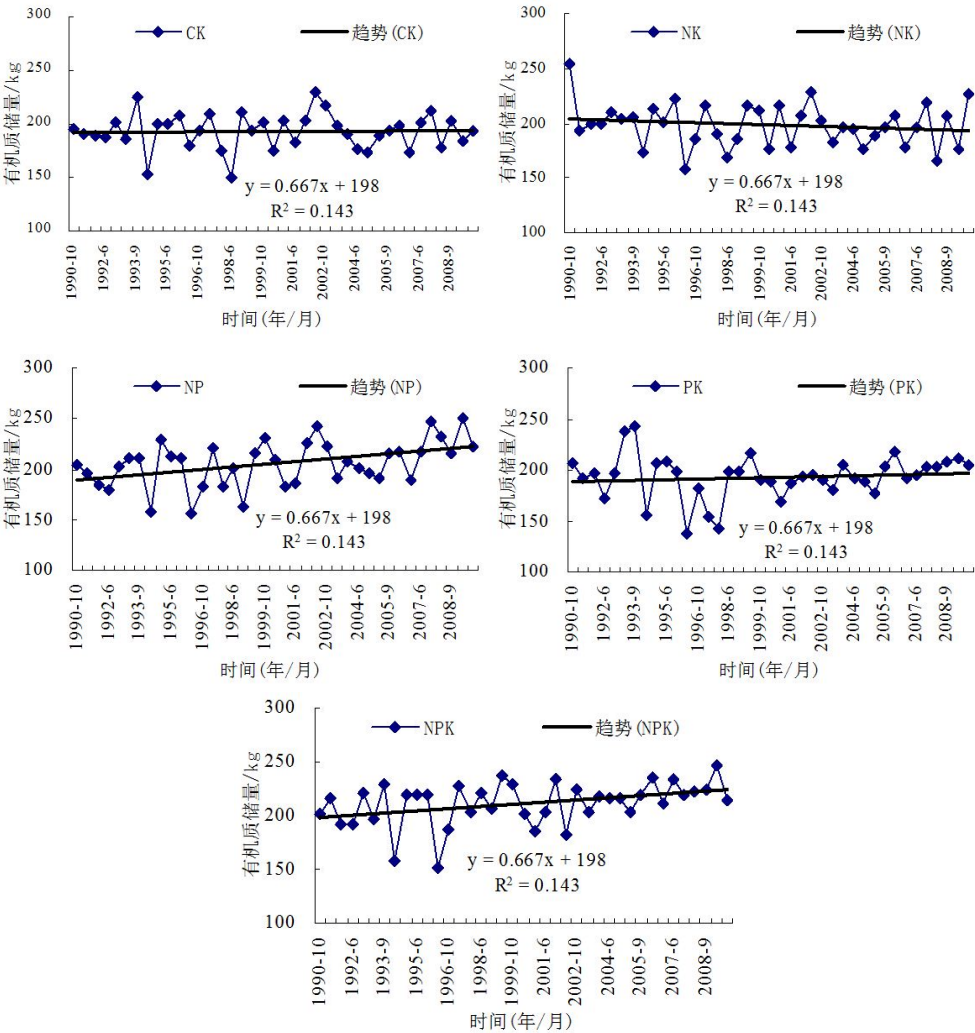


图 3 各施肥处理 0~60 cm 土层总 SOM 储量变化

Fig.3 The changes of SOM content under different fertilization treatments in 0-60 cm soil depth

NK、CK 处理。

以上的观测表明：禹城地区轻度盐化潮土作物良好生长对 N、P 元素依赖较大，对 K 元素依赖较小，作物凋落物是 SOM 重要输入源，N、P 肥配施特别是 N、P、K 均衡施肥可保证作物良好生长，增加 SOM 的积累；P、K 肥或 N、K 肥配施对 SOM 的积累影响较小，NK 处理 SOM 含量略微下降，而 PK 处理 SOM 含量略微上升，原因在于一方面 NK 处理初始含量要比其他 4 个处理高，最初的 SOM 分解量要大于输入量，另一方面施用磷肥能促进作物根系发育，提高作物对土壤深层累积硝态氮的利用和作物品质^[18-20]，这一点从多年来作物倒伏情况也可以得到验证（NK 处理作物比 PK 处理更容易倒伏），PK 处理作物根系要比 NK 处理发达；不使用任何化学肥料的情况下，土壤中 SOM 能够长期维持在较低平衡，说明营养元素缺乏导致作物生长不良，进而减少作物

凋落物输入，但营养元素缺乏也导致土壤中微生物分解力降低^[21-22]，减少 SOM 分解，二者达到一个平衡，NK 后期阶段趋于稳定也进一步验证了这一点。

此外，长期观测中波动较大值可能原因是该地区降水集中，有些情况下无法及时排水导致各处理小区漫溢或出现作物倒伏情况，出现测量值的偏差，但对总体变化趋势影响不大。

2.2 同一施肥处理不同深度对 SOM 含量的贡献率

从同一施肥处理不同取样深度来看，各层土壤 SOM 含量与取样深度呈负相关。由图4和表3可见，5个处理0~20 cm土层SOM含量明显高于20~40 cm土层，且SOM增加较明显，20~40 cm土层SOM含量要高于40~60 cm，但都有一定的下降趋势，40~60 cm SOM含量基本不变。

CK处理0~20 cm土层SOM质量分数变化范围在0.718%~1.161%之间，平均质量分数为0.949%，

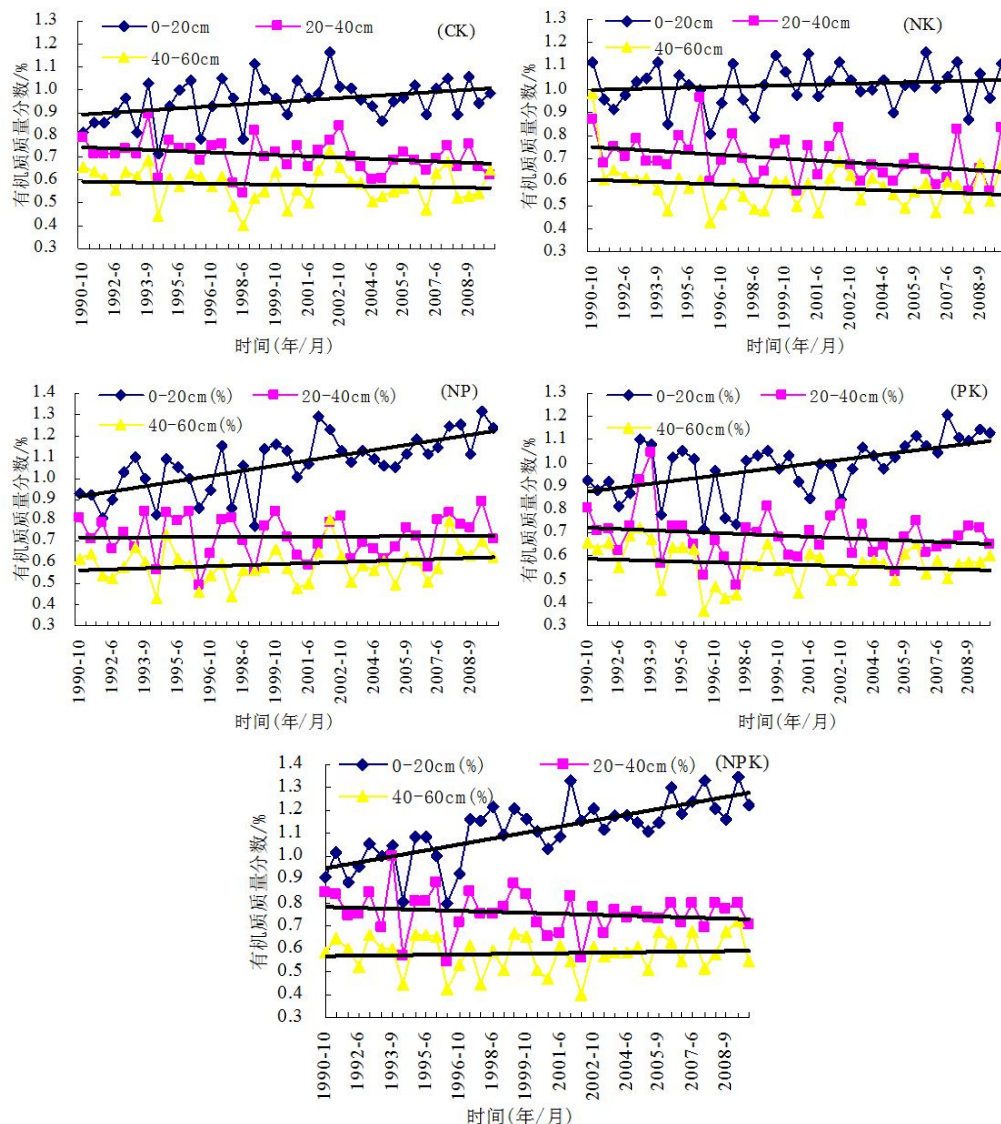


图4 同一施肥处理不同深度 SOM 质量分数

Fig.4 The content of SOM in different depths

表 3 不同处理各层数据基本统计和 MK 检验结果
Table 3 The results of statistic and MK test for different treatments

处理	土层深度/cm	w(变化范围)/%	w(均值)/%	MK 检验 Z	倾斜度 β /%
CK	0~20	0.718~1.161	0.949	1.960*	0.003
	20~40	0.545~0.890	0.709	-1.851	-0.002
	40~60	0.403~0.732	0.58	-1.089	-0.001
NK	0~20	0.805~1.162	1.016	0.895	0.002
	20~40	0.560~0.960	0.7	-2.383*	-0.003
	40~60	0.425~0.980	0.58	-1.113	-8.8235e~004
NP	0~20	0.770~1.318	1.066	4.319*	0.008
	20~40	0.495~0.885	0.723	-0.048	-4.1667e~005
	40~60	0.435~0.802	0.592	1.161	0.001
PK	0~20	0.715~1.210	0.986	3.617*	0.006
	20~40	0.478~1.050	0.688	-0.629	-9.3103e~004
	40~60	0.365~0.720	0.566	-1.210	-0.002
NPK	0~20	0.795~1.345	1.113	5.103*	0.008
	20~40	0.545~1.000	0.757	-1.307	-0.002
	40~60	0.397~0.717	0.578	0.484	4.7059e~004

表中加*的 Z 值, 为通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的 Z 值

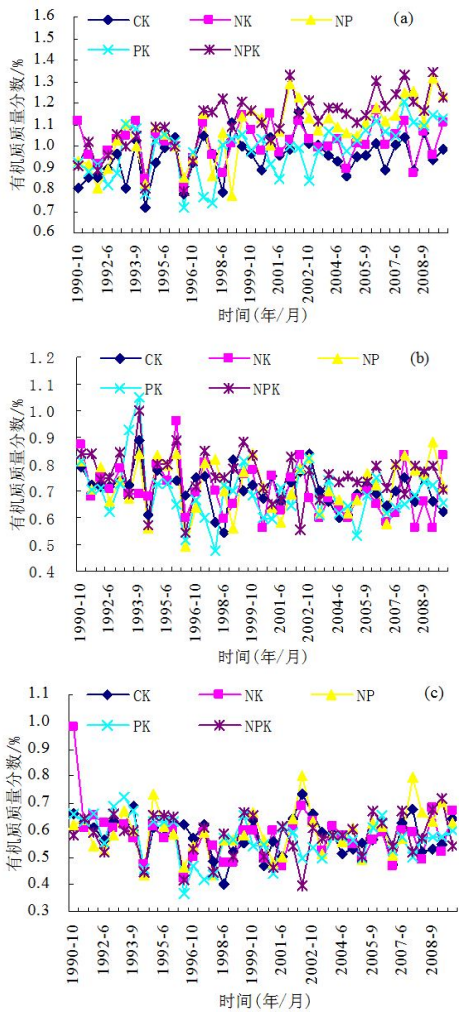
增加明显, 对整个 0~60 cm 土层 SOM 质量分数贡献率为 42%; 20~40 cm 变化范围 0.545%~0.890%, 均值为 0.709%, 有所下降, 贡献率为 33%; 40~60 cm 变化范围 0.403%~0.732%, 均值 0.58%, 变化微弱, 贡献率为 25%。然而, 王改兰等^[20]研究认为长期 CK 处理 0~20 cm 土层 SOM 含量下降, 20~40 cm 土层略为下降; 王旭东等^[10]也认为不施用任何肥料, 仅依靠作物根茬残留碳的循环, 不能维持试验前土壤有机质水平。研究结果的不同在于供试土壤初始 SOM 质量分数差异很大。王改兰研究中的 SOM 初始值为 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 13 年后为 $4.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 王旭东初始值为 $13.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 21 年后为 $13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而本实验初始值为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 20 年后上升为 $11.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明初始值的高低影响 SOM 的变化趋势, 不施肥条件下 SOM 平衡质量分数在 $11 \sim 13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 但在土壤过于贫瘠、作物生长极其困难情况下, SOM 含量会进一步降低。孙瑞莲等^[21]对褐潮土肥料定位试验研究表明不施用任何化肥, 12 年后 0~20 cm 土层有机质质量分数为 $13.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 也验证了这一点, 未来的研究应该注意 SOM 初始值的差异。

NPK 处理 0~20 cm 土层 SOM 质量分数变化范围 0.795%~1.345%, 均值 1.113%, 增加明显, 贡献率为 45%; 20~40 cm 土层 SOM 质量分数变化范围 0.545%~1%, 均值 0.757%, 下降, 贡献率为 32%; 40~60 cm 变化范围 0.397%~0.717%, 均值 0.578%, 变化微弱, 贡献率为 22%。其他处理各层的变化情况基本介于 CK、NPK 处理之间, 各处理中 0~20 cm 含量明显高于其他 2 层, 并且增幅明显, 说明不同施肥处理 SOM 增加主要集中在 0~20 cm 土层。化肥提高土壤有机质的原因, 主要是化肥使作物生

长繁茂, 根茬、枝叶等残留量增多^[13]。宋永林等^[9]对北京褐潮土研究结果也表明在土壤肥力水平较低的情况下施用 N、P、K 肥能够显著提高粮食产量, 并较大幅度提高土壤有机质含量; 但也有研究认为单施化肥会促进土壤有机质的消耗^[11]或土壤有机质无明显增长趋势^[22], 研究结果的不同可能是各研究区气候条件、土壤状况、耕作制度等不同所致。

2.3 不同施肥处理同一深度 SOM 含量的长期变化

结合图 5 和表 3 可知, 除 NK 处理外, 其他施肥处理 0~20 cm 土层 SOM 含量呈明显上升趋势, 全部通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验, 并且 NPK、NP 处理每个小麦或玉米生长季增率为 0.008%, 明显高于 PK 处理 (0.006%) 和 CK 处理 (0.003%) 增率。然而 NK 处理 0~20 cm 土层 SOM 含量长期以来无明显变化, 以上结果说明作物生物量输入是 0~20 cm 土层 SOM 主要来源, 施肥能增加作物生物量, 从而增加对 0~20 cm 土层有机物的投入(根系、残茬、落叶、根系分泌物等输入)^[8]。CK 处理



a: 0~20 cm, b: 20~40 cm, c: 40~60 cm

图 5 不同施肥处理同一深度 SOM 质量分数

Fig.5 The content of SOM in different treatments

虽然作物生物量输入很少,但由于营养元素缺乏、微生物分解受限、作物残体降解较慢,导致表层 SOM 含量持续增加;NK 处理无明显变化原因在于施用 N 肥提供微生物活动需要的营养物质^[23],少量的作物残体输入与微生物降解之间达到基本平衡;NPK 和 PK 两组处理作物生长良好,提高了地上部分生物量,进而增加了 SOM 输入源。

20~40 cm 土层,NK 处理 SOM 含量呈明显下降趋势,通过了 $\alpha=0.05$ 显著性检验,说明少量生物量输入大部分被表层 0~20 cm 土壤截留,而施用的 N 肥很容易淋洗到 20~40 cm 土层,所以 20~40 cm 土层原有 SOM 不断被消耗。CK、NPK 处理虽未通过检验,但与其他处理相比,具有一定的降低趋势,每个小麦或玉米生长季降率达 0.002%。其中 CK 处理 20~40 cm 下降原因是少量作物残体输入大部分被上层截留,缺乏有机物输入;而 NPK 处理 20~40 cm 土层 SOM 含量略微下降的原因在于营养均衡,微生物生物量和活性增大^[24],提高了营养元素利用率和土壤中 SOM 的降解能力,这与 CK 处理恰好相反。PK、NP 处理趋势不明显,说明长期以来处于一个平衡状态。

40~60 cm 土层,各处理长期以来无明显的增加或降低趋势,平均质量分数在 0.58% 左右,说明不同施肥处理对 40~60 cm 土层 SOM 储量影响较小。因此,在进行土壤固碳潜力估算时,该区域应主要考虑 0~40 cm 固碳量变化。

2.4 固碳潜力的估算

0~40 cm 土层基本可以代表该区来研究不同施肥处理土壤固碳潜力的变化,因此,可以比较均衡施肥(NPK处理)条件与未施用任何化肥(CK处理)条件下固碳量的增加,进而估算农田均衡施肥条件下的长期固碳潜力,结果见图6。

二者对比表明,CK处理提升地力后,到达

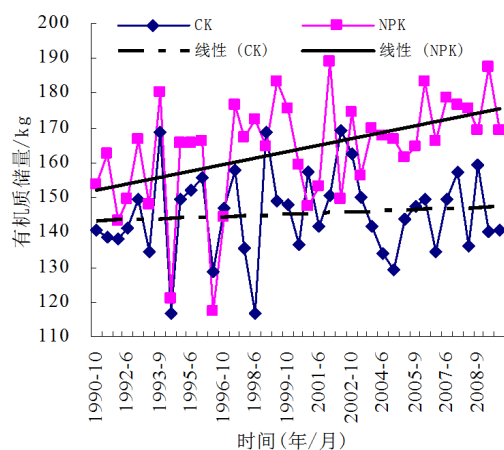


图6 CK处理和NPK处理SOM储量比较

Fig.6 The comparison of SOM between CK treatment and NPK treatment

NPK处理可以明显提高0~40 cm的SOC的储量。从20年的均值来看,SOM储量由最初的145 kg上升到164 kg,增加了13%,平均每年增加0.65%左右。同时,长期的试验中NPK处理并未出现SOM饱和,并且与CK处理比较增幅反而更加明显,因此,按长期观测到的SOM增量来估算,每年约增加316.7 kg·hm⁻² SOM,转化为SOC为182.8 kg·hm⁻² (以C计)。据1995年统计结果,华北平原耕地面积884.8万hm²,作物播种面积1313.6万hm²,若按N、P、K均衡施肥,20年来农田土壤每年大约增加1.6~2.4 Tg·a⁻¹ SOC。Lal等^[25]研究表明,在施用化肥的条件下,全球农田土壤每年的平均固碳速率(以C计)为125 kg·hm⁻²,总固碳能力可达100 Tg·a⁻¹;而逯非等^[26]研究也表明我国农田施用化肥土壤每年平均固碳速率(以C计)达168 kg·hm⁻²,固碳潜力在现状情景下为21.9 Tg·a⁻¹,并且若提高化肥施用量每年平均固碳速率(以C计)可上升至232 kg·hm⁻²,每年固碳潜力可达到30.2 Tg·a⁻¹。以上研究表明华北平原轻度盐化潮土在N、P、K均衡施肥条件下,农田具有更大的固碳潜力,其每年的平均固碳速率是全球平均水平的1.5倍,是全国平均水平的1.1倍,并且长期以来SOM储量持续增加,并未达到上限,今后上升空间很大。

3 结论

在黄淮海平原典型的轻度盐化潮土上,通过对20年来不同施肥处理下作物生长和SOM累积的长期研究,得出以下结论。

(1) 长期的N、P肥配施或N、P、K均衡施肥,可显著增加土壤中SOM储量,并且后者要优于前者。

(2) SOM增加主要集中在0~20、40~60 cm基本不变。

(3) 生物量对SOM储量变化影响明显,NPK和NP处理作物生长良好,凋落物输入明显优于其他处理。

(4) 0~40 cm可以代表该区用以计算土壤固碳潜力,并且在N、P、K均衡施肥条件下,0~40 cm土层中SOM储量长期以来持续增加,每年的平均固碳速率(以C计)达182.8 kg·hm⁻²,约是全球平均水平的1.5倍,全国平均水平的1.1倍。华北平原若按N、P、K均衡施肥改造轻度盐化潮土,农田土壤每年固碳潜力将达到1.6~2.4 Tg·a⁻¹。

致谢: 在论文创作过程中,得到中国科学院“百人计划”项目、中国科学院“碳专项”(XDA0505050202)项目提供的资助与指导,特此感谢。

参考文献:

- [1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [2] SMITH P, POWLSON D, GLENDINING M, et al. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments[J]. *Global Change Biology*, 1997, 3(1): 67-79.
- [3] LAL R. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4): 747-758.
- [4] MOONEY H A, VITOUSEK P M, MATSON P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere[J]. *Science*, 1987, 238(4829): 926-932.
- [5] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [6] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [7] HOU Ruixing, OUYANG Zhu, Li Yunsheng, et al. Effects of tillage and residue management on soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain[J]. *Soil Science Society of America*, 2012.
- [8] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 27-30.
GAO Yajun, ZHU Peili, HUANG Dongmai, et al. Long-term impact of different soil management on organic matter and total nitrogen in rice-based cropping system[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 27-30.
- [9] 宋永林, 袁锋明, 姚造华. 化肥与有机物料配施对作物产量及土壤有机质的影响[J]. *华北农学报*, 2002, 17(4): 73-76.
SONG Yonglin, YUAN Fengming, YAO Zaohua. Effect of combination of NPK chemical fertilizer and different organic materials on crop yield and soil organic matter[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(4): 73-76.
- [10] 王旭东, 张平, 吕家珑, 等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 75-81.
Wang Xudong, Zhang Yiping, Lv Jialong, et al. Effect of long-term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 75-81.
- [11] 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.
LI Xinai, TONG Chengli, JIANG Ping, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 298-303.
- [12] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 711-716.
ZHANG Yungui, LIU Hongbin, LI Zhihong, et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 711-716.
- [13] 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 Jiping, ZHANG Fudao, LIN Bao. Influences of long-term fertilizer application on soil organic matter and biological characters[J]. *Soils and Fertilizers*, 1998(3): 7-11.
- [14] 胡朝炳, 田振荣. 农田生态系统氮、磷、钾平衡试验研究: 以禹城站试验地为例[J]. *地理学报*, 1995, 50(1): 73-82.
HU Chaobing, TIAN Zhenrong. A study on the balance of nitrogen, phosphorus and potassium in agro-ecosystem-taking the experimental fields in Yucheng as an example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(1): 73-82.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Rukun. Analytical method of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 24-265.
LIU Guangsong. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1996: 24-265.
- [17] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287-1293.
LIANG Aizhen, ZHANG Xiaoping, YANG Xueming, et al. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [18] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [19] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [20] 王改兰, 段建南, 李旭霖. 长期施肥条件下土壤有机质变化特征研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(6): 589-591.
WANG Gailan, DUAN Jiannan, LI Xulin. Change of soil organic matter contents under a long-term experiment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 589-591.
- [21] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410.
SUN Ruilian, ZHAO Bingqiang, ZHU Lusheng, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 406-410.
- [22] 张爱君, 张明普. 长期施用有机和无机肥料对黄潮土有机质含量及组成的影响[J]. *江苏农业研究*, 2001, 22(3): 30-33.
ZHANG Aijun, ZHANG Mingpu. Organic and inorganic fertilization affecting the content and composition of soil organic matter—a report of long-term experimente[J]. *Jiang Su Agricultural Research*, 2001, 22(3): 30-33.
- [23] 罗明, 文启凯, 陈全家, 等. 不同用量的氮磷化肥对棉田土壤微生物区系及活性的影响[J]. *土壤通报*, 2000, 31(2): 66-69.
LUO Ming, WEN Qikai, CHEN Quanjia, et al. Influences of different nitrogen and phosphorus fertilizers on soil microflora and microbial activities in cottoned soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(2): 66-69.
- [24] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1907-1910.
SUN Ruilian, ZHU Lusheng, ZHAO Bingqiang, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1907-1910.
- [25] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester

- C and mitigate the greenhouse effect[J]. Environmental Science & Policy, 1999, 2(2): 177-185.
- [26] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2239-2250.

LU Fei, WANG Xiaoke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2239-2250.

Effects of long-term fertilization on soil organic matter accumulation

ZHAO Guangshuai^{1,2}, LI Fadong^{1*}, LI Yunsheng¹, ZHANG Yan^{1,2}, OUYANG Zhu¹, TIAN Zhenrong¹

1. Yucheng Comprehensive Experiment Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A 20-year long-term fertilization test is conducive to reveal the characteristics of soil fertility and nutrition balance law. Taking Yucheng Comprehensive Experimental Station which is located in the Huang-Huai-Hai Plain for example, this paper explores and estimates the impact of long-term quantitative fertilization on growth of winter wheat (*Triticusp aestvum* L.) and summer maize (*Zea Mays* L.) and soil organic matter(SOM) accumulation The results are shown as follows: Long-term application of nitrogen(N) combined with phosphorus(P) or balanced fertilization of N, P, potassium(K) can significantly increase SOM reserves in the soil, and the latter exerts a more pronounced effect. SOM increase is mainly concentrated in the 0-20 cm depth of soil, and 40-60cm remains basically unchanged. Biomass plays an important role in the change of SOM reserves, crop grows well with the treatments of NPK, NP, and crop residues input is superior to those with other treatments. The depth of 0-40 cm can represent soils in the region to calculate the potential for carbon sequestration, the SOM reserves in the depth of 0-40 cm is continued to increase for a long time under the condition of balanced fertilization of N, P, K, and don't reach the upper limits. Average annual carbon sequestration rate of the soil is 182.8 kgC/hm², which is approximately 1.5 times of that of the global average, 1.1 times of the national average. If North China Plain tries to transform soil with the measure of balanced fertilization of N, P, K, then the annual carbon sequestration potential of agricultural soils will reach 1.6 to 2.4 Tg·a⁻¹.

Key words: long-term test; fertilization treatments; North China Plain; SOM; carbon sequestration potential