

施氮对陇中黄土高原旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响

张世汉¹, 武均^{1,2}, 张仁陟^{1,2,3}, 蔡立群^{1,2,3}, 齐鹏^{1,2}, 张军^{1,2,3}

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070;

2.甘肃农业大学 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070; 3.甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘 要:为探明不同施氮水平对陇中黄土高原旱作农田土壤有机碳的影响,以布设于 2013 年的施氮定位试验为研究对象,利用碘化钠重液分组法,探究了 N_0 , $N_{52.5}$, N_{105} , $N_{157.5}$ 4 种施氮水平对陇中黄土高原旱作农田土壤总有机碳(STOC)、游离态颗粒有机碳(FPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(OPOC)、矿质结合态有机碳(MOC)的影响。结果表明:在 0—20 cm 土层,不同处理下 STOC, FPOC, OPOC, MOC 含量及 FPOC/STOC, OPOC/STOC 均随土层加深而降低, MOC/STOC 随土层加深而增大。较 N_0 处理, $N_{52.5}$, N_{105} , $N_{157.5}$ 处理均可提升 STOC, FPOC, OPOC 含量以及 FPOC/STOC, OPOC/STOC, 且 N_{105} 处理下提升效应最优; N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理可显著提升 0—20 cm 各土层 MOC 含量, 且 N_{105} 处理下提升效应最优。综上所述, N_{105} 处理可有效促进土壤固碳能力、节约投入成本, 可筛选为该区春小麦栽培的合理施氮量。

关键词:固碳能力; 施氮; 土壤总有机碳; 矿质结合态有机碳

中图分类号: S158.5; S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0007-05

Effects of Different Nitrogen Addition Levels on Soil Particulate Organic Carbon in Dry Farmland of Central Gansu Province on the Loess Plateau

ZHANG Shihan¹, WU Jun^{1,2}, ZHANG Renzhi^{1,2,3}, CAI Liqun^{1,2,3}, QI Peng^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2,3}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070, China; 2.Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070, China; 3.Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-Saving, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the effects of different nitrogen addition levels on soil organic carbon in dry farmland in central Gansu Province on the Loess Plateau, based on the nitrogen addition location experiment conducted at the Rainfed Agricultural Experimental Station of Gansu Agricultural University, Dingxi City, Gansu Province, in 2013, the density fractionation method [NaI : $(1.70 \pm 0.02) \text{ g/cm}^3$] was used to explore the effects of four nitrogen addition levels (N_0 , $N_{52.5}$, N_{105} , $N_{157.5}$) on soil total organic carbon (STOC), free particulate organic carbon (FPOC), occluded particulate organic carbon (OPOC), mineral-associated organic carbon (MOC). The results showed that the contents of STOC, FPOC, OPOC, MOC, and FPOC/STOC, OPOC/STOC decreased with the increase of depth of soil layer under different treatments in the 0—20 cm soil layers, and MOC/STOC increased with the increase of depth of the soil layer; compared with the N_0 treatment, $N_{52.5}$, N_{105} and $N_{157.5}$ treatments could increase the FPOC/STOC, OPOC/STOC and the contents of STOC, FPOC, OPOC, and N_{105} treatment had the best effect on these ratios; N_{105} and $N_{157.5}$ treatments significantly increased the MOC content in 0—20 cm layer, and N_{105} treatment had the best effect on the increase of MOC content. In conclusion, N_{105} treatment can effectively promote soil carbon sequestration capacity, reduce input costs, and can be selected as the reasonable application amount of nitrogen fertilizer for spring wheat cultivation in this area.

Keywords: carbon sequestration capacity; nitrogen application; soil total organic carbon; mineral-associated organic carbon

收稿日期: 2018-12-29

修回日期: 2019-01-16

资助项目: 甘肃农业大学青年导师扶持基金(GAU-QNDS-2017-04); 国家自然科学基金(31571594, 41661049); 甘肃省自然科学基金(1606RJZA076)

第一作者: 张世汉(1992—), 男, 甘肃金塔人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。E-mail: 1016625243@qq.com

武均(1989—), 男, 甘肃敦煌人, 博士, 研究方向为保护性耕作、土壤生态学。E-mail: wujun210@126.com

通信作者: 齐鹏(1979—), 男, 甘肃武威人, 硕士生导师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: gsauqip@gsau.edu.cn

土壤有机碳是维持土壤结构、提高土壤质量以及保证土壤养分循环平衡的重要指标,其微小变化都会直接影响土壤肥力高低,进而影响土地生产力^[1]。土壤碳库作为地球陆地生态系统中最大的碳库,其动态平衡与大气碳库和全球气候的变化密切相关^[2-3]。由于长期不合理的农作措施使农田土壤碳库受到严重干扰,破坏了农田土壤有机碳组分的周转,影响到农田土壤碳库的动态平衡^[3],而合理的农作措施不仅可以增加土壤碳汇,改善土壤质量,提高土壤生产力水平,还可减少农田土壤温室气体的排放。因此,农田生态系统土壤碳循环备受关注。农田土壤有机碳的周转非常缓慢,单纯的土壤有机碳含量测定并不能完全反映土壤质量变化和养分状况^[4]。土壤颗粒有机碳是由未分解或半分解的动植物和根系残体组成的,并与土壤砂粒组分结合的那部分有机碳,颗粒有机碳在土壤中周转速度较快,易受土壤农作措施的影响,对表层土壤中有有机物含量变化非常敏感,并且在土壤碳循环中起着重要作用,因此,颗粒有机碳被当作土壤有机碳库变化的敏感指标^[5-6]。氮素作为作物需求量最大的矿质元素,不仅能提升土壤肥力、增加作物产量^[7-8],还会影响微生物群落与丰度,进而影响农田土壤生态系统碳循环^[9]。

陇中黄土高原受地理位置、气候环境的影响,土壤贫瘠,生产力低下^[10]。施氮是该区提高作物产量的重要农作措施,但长期不合理施氮会改变土壤理化性质,使土壤肥力及土壤固碳能力下降^[9,11],甚至造成土壤中氮残留量或损失量显著增加,导致肥料浪费、土壤环境受污染^[8]。由于颗粒态有机碳是土壤有机碳库变化的敏感指标,探究施氮对其影响,能准确反映施氮对该区土壤肥力及土壤固碳能力的影响效应。目前,土壤有机碳的研究主要集中在土地利用方式、耕作措施、施肥等农作措施对其含量变化与周转机制的影响^[12-17]。施氮对农田土壤有机碳的影响还没有统一的定论,李小涵等^[15]研究表明,旱地土壤0—30 cm 土层有机碳含量随氮肥用量增加,呈现先增加后降低的趋势;张秀兰等^[16]研究发现,施氮对土壤有机碳含量无显著影响;王楠等^[17]研究表明,施氮水平对不同基础肥力土壤有机碳含量的影响规律不一,低肥力土壤难氧化有机碳(DOC)抵御外源氮素干扰的能力较差,施氮能加速该组分的矿化,大幅降低土壤有机碳的氧化稳定性,不利于肥力保蓄;适宜氮素用量更有利于高肥力土壤易氧化有机碳(ROC)的积累。此外,施氮对土壤有机碳的影响研究较多,但由于其周转速率缓慢,不足以完全表征土壤质量及养分状况。因此,本研究依托甘肃农业大学在定西市安定区李家堡镇

于2013年布设的施氮定位试验,结合重液分组法,通过对该试区2017年土壤总有机碳、游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿质结合态有机碳含量的测定分析,以探明不同施氮水平对土壤总有机碳、游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿质结合态有机碳的影响,并为该区春小麦栽培寻求有利于改善土壤养分状况、促进土壤固碳能力的合理施氮量。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市李家堡镇甘肃农业大学旱农综合试验站,属中温带半干旱区,平均海拔2 000 m,无霜期140 d,年均日照时数2 476.6 h,年均太阳辐射594.7 kJ/cm²,年均气温6.4℃,≥0℃积温2 933.5℃,≥10℃积温2 239.1℃;年平均降水量390.9 mm,蒸发量1 531 mm,80%保证率的降水量为365 mm,变异系数为24.3%,是典型的雨养农业区。试区农田土壤为典型的黄绵土,质地均匀,土质绵软,疏松多孔。

1.2 试验设计

试验始于2013年,种植模式为春小麦连作,供试作物为春小麦“定西40号”,共设4个氮素(尿素,N46%)梯度,N₀(0 kg/hm²,无添加),N_{52.5}(52.5 kg/hm²,低量添加),N₁₀₅(105 kg/hm²,适量添加),N_{157.5}(157.5 kg/hm²,过量添加),另外,各处理均施P₂O₅ 105 kg/hm²。采用随机区组设计,3次重复,共计12个小区,小区面积为3 m×5 m=15 m²。于每年3月播种,8月收获,播种量为187.5 kg/hm²,行距20 cm,各处理P₂O₅与氮素均于每年播种前根据各处理所需用量同磷肥一并均匀撒施于各小区后,迅速利用播种机播种[播深(7±2) cm],待肥料与土壤混合,利用耙耧将地耨平。

1.3 测定方法和数据处理

在2017年8月小麦收获后,各小区采用五点法分别采集0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 土层土样并混合均匀,带回实验室风干。土壤总有机碳(STOC)、游离态颗粒有机碳(FPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(OPOC)、矿质结合态有机碳(MOC)均采用碳氮联合分析仪测定(Multi N/C 2100s Jena, Germany),具体参考武均等^[18]对颗粒态有机碳组分的测定方法,其中,颗粒态有机碳(POC)=游离态颗粒有机碳(FPOC)+闭蓄态颗粒有机碳(OPOC)^[18]。0—20 cm 的土壤总有机碳、游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳和矿质结合态有机碳平均含量采用加权平均法计算,具体如下公式所示(以STOC为例):

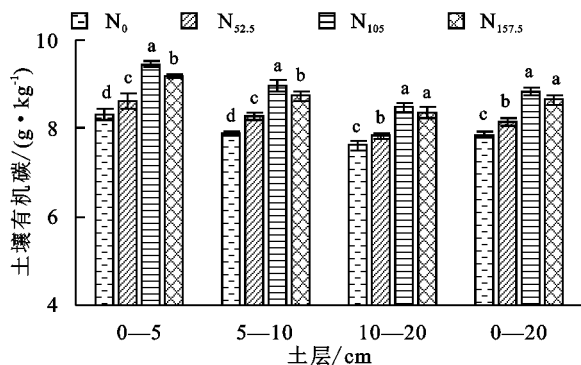
$$\text{STOC}_{0-20\text{cm}} = (\text{STOC}_{0-5\text{cm}} + \text{STOC}_{5-10\text{cm}} + \text{STOC}_{10-20\text{cm}} \times 2) / 4$$

文中数据、图表采用 Excel 2010 处理,利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对总有机碳含量的影响

由图 1 可知,不同处理下 STOC 含量均随土层的加深而降低。在 0—10 cm 各土层中,各处理下 STOC 含量均以 N_{105} 处理最高, N_0 处理最低,STOC 含量排序均为 $N_{105} > N_{157.5} > N_{52.5} > N_0$,且 $N_{52.5}$, N_{105} , $N_{157.5}$ 处理下 STOC 含量显著高于 N_0 处理 ($p \leq 5\%$),而 10—20 cm 土层, N_{105} 与 $N_{157.5}$ 处理间差异不显著。在 0—20 cm 土层,各处理土壤(加权平均,下同)STOC 含量排序为 $N_{105} \geq N_{157.5} > N_{52.5} > N_0$,且 $N_{52.5}$, N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理显著高于 N_0 处理。



注:同一土层的不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($p \leq 5\%$ 水平),下同。

图 1 不同施氮水平对各土层土壤总有机碳含量的影响

2.2 不同施氮水平对游离态颗粒有机碳含量的影响

由图 2 可知,不同处理下土壤 FPOC 含量均随土层的加深而降低。在 0—5 cm 和 10—20 cm 土层中,各处理土壤 FPOC 含量均以 N_{105} 处理最高, N_0 处理最低,土壤 FPOC 含量排序均为 $N_{105} > N_{157.5} > N_{52.5} > N_0$,且 $N_{52.5}$, N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理的土壤 FPOC 含量均显著高于 N_0 处理,而在 5—10 cm 土层, N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理显著高于 N_0 处理, $N_{52.5}$ 处理与 N_0 处理差异不显著。在 0—20 cm 土层,各处理土壤 FPOC 含量排序为 $N_{105} > N_{157.5} > N_{52.5} \geq N_0$,且 N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理显著高于 N_0 处理,而 $N_{52.5}$ 处理与 N_0 处理差异不显著。

2.3 不同施氮水平对闭蓄态颗粒有机碳含量的影响

由图 3 可知,不同处理下土壤 OPOC 含量均随土层的加深而降低。在 0—20 cm 各土层中,各处理土壤 OPOC 含量均以 N_{105} 处理最高, N_0 处理最低;土壤 OPOC 含量排序均为 $N_{105} > N_{157.5} > N_{52.5} > N_0$,且 $N_{52.5}$, N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理的土壤 FPOC 含量显著高于 N_0 处理。在 0—20 cm 土层,各处理土壤 OPOC 含量排序为 $N_{105} > N_{157.5} > N_{52.5} > N_0$,且 $N_{52.5}$, N_{105} 和

$N_{157.5}$ 处理均显著高于 N_0 处理。

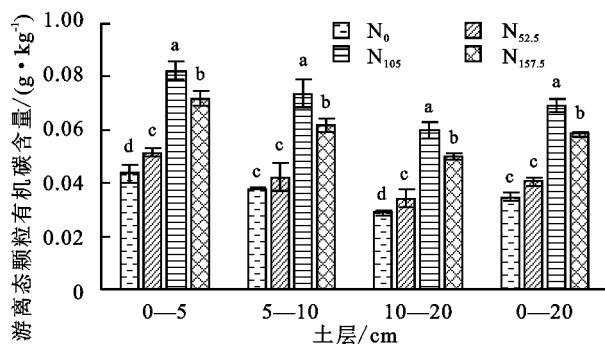


图 2 不同施氮水平对各土层土壤游离态颗粒有机碳含量的影响

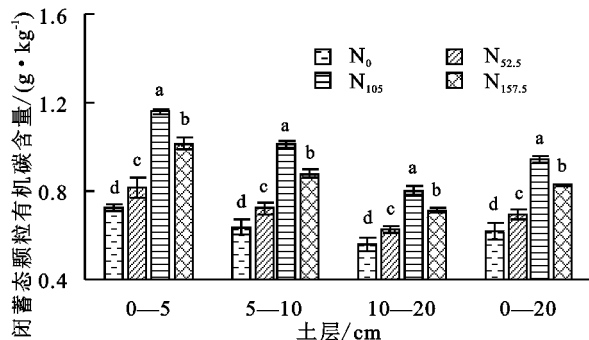


图 3 不同施氮水平对各土层土壤闭蓄态颗粒有机碳含量的影响

2.4 不同施氮水平对矿质结合态有机碳含量的影响

由图 4 可知,不同处理下土壤 MOC 含量均随土层的加深而降低。在 0—10 cm 各土层中,各处理下土壤 MOC 含量均以 N_{105} 处理最高, N_0 处理最低,土壤 MOC 含量排序均为 $N_{105} \geq N_{157.5} > N_{52.5} \geq N_0$,且 N_{105} , $N_{157.5}$ 处理下土壤 MOC 含量显著高于 N_0 处理;而在 10—20 cm 土层中, $N_{52.5}$, N_{105} , $N_{157.5}$ 处理下土壤 MOC 含量均显著高于 N_0 处理。在 0—20 cm 土层,各处理土壤 MOC 含量排序为 $N_{105} \geq N_{157.5} > N_{52.5} \geq N_0$,且 N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理显著高于 N_0 处理,而 $N_{52.5}$ 处理与 N_0 处理差异不显著。

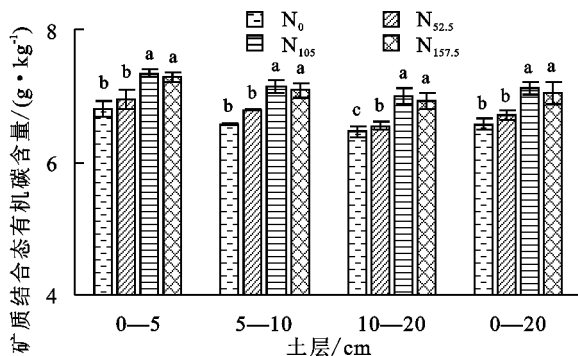


图 4 不同施氮水平对各土层土壤矿质结合态有机碳含量的影响

2.5 不同施氮水平对不同土壤有机碳组分分布的影响

由图 5 可知,不同处理下的 STOC 含量均以 MOC 为主,且 MOC/STOC 范围为 77.71%~84.77%;而 POC 含量仅占 STOC 含量的 11.09%~20.99%,其中 FPOC/STOC 范围为 3.77%~8.72%,OPOC/STOC 范围为 7.32%~12.27%。各处理下 FPOC/STOC 和 OPOC/STOC 均随土

层的加深而减小, MOC/STOC 与之相反。在 0—20 cm 各土层中, FPOC/STOC 和 OPOC/STOC 在 N_{105} 处理下最高, N_0 处理下最低, 而 MOC/STOC 与之相反。

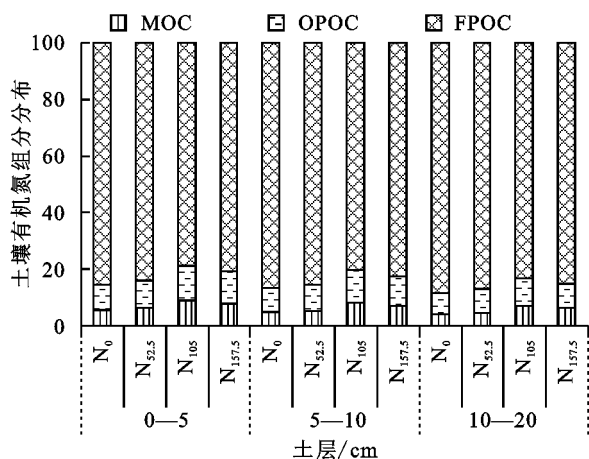


图 5 不同施氮水平对各土层土壤有机碳组分分布特征

3 讨论

3.1 不同施氮水平对总有机碳含量的影响

农田生态系统土壤有机碳含量的高低主要取决于土壤有机碳输入与降解之间的平衡^[19]。施氮能提高作物生物量^[20], 有利于 STOC 的积累, 同时施氮可提高微生物活性^[21], 促进微生物对 STOC 的分解, 二者之间的平衡受土壤肥力基础、土壤质地、水热条件等因素的影响, 因此, 施氮对 STOC 的影响尚无统一论^[10, 15-17]。本研究结果表明, 在 0—20 cm 各土层, 不同施氮处理下 STOC 含量均随土层深度的增加而降低。这主要是因为随着施氮量增加, 作物凋零及根茬、根系残留物随之增多^[20], 从而增加了 STOC 含量; 随着土层加深作物凋零物及根茬、根系残留物减少, STOC 含量随之减少; 施氮导致根系表层化, 大量的根系分泌物集中于表层土壤^[21], 导致土壤下层 STOC 含量较低。本研究发现, 随着施氮量的增加, STOC 含量呈现先增加后降低的趋势, 在 N_{105} 处理下 STOC 含量最高, 施氮量继续增加, STOC 含量反而降低, 这与李小涵等^[15]的研究结果吻合。这可能是由于氮素进入土壤后, 只有被水溶解成离子后才能被作物吸收利用, 而过量的氮素投入会消耗过多的水分, 导致土壤含水率下降, 降低作物对氮素的利用效率^[21-22], 作物凋零物及根茬、根系残留物随之减少; 过量施氮不利于土壤团聚体形成、降低土壤碳氮比值, 使土壤结构逆向发展, 进而抑制了 STOC 的保持^[20]; 施氮使土壤有机碳矿化速率加快, 随着施氮量的增加, 有机碳累计矿化量有增加的趋势^[23], 故过量施氮不利于 STOC 的固持。因此, 氮素对 STOC 的影响可能存在一个阈值, 施氮超过这个阈值对 STOC 含量的提升不明显或者有明显的抑制作用。

3.2 不同施氮水平对颗粒态有机碳含量的影响

本研究结果表明, 不同施氮处理下土壤 FPOC 含量与 OPOC 含量均随土层加深而降低, 这与 STOC 的含量的变化趋势一致, 表层 STOC 含量较高, 促进了团聚体的形成, 尤其是 OPOC 被团聚体包裹而受到物理保护^[24-25], 减小了与微生物接触的可能, 减缓了微生物对土壤 OPOC 的分解速率^[26], 有利于土壤 OPOC 的积累。在 0—20 cm 各土层, 较之 N_0 处理, $N_{52.5}$, N_{105} 和 $N_{157.5}$ 处理均可显著提升土壤 FPOC 和 OPOC 含量, 且 N_{105} 处理下对土壤 FPOC 和 OPOC 含量提升效应最优, 随着施氮量继续增加, 土壤 FPOC 和 OPOC 含量反而降低。这可能是由于施氮可增加作物根系分泌物与微生物分泌物^[27], 这些分泌物与土壤颗粒结合可以增加团聚体的稳定性^[28], 增加了团聚体对土壤 OPOC 的保护作用, 有利于土壤 OPOC 的保持; 而过量施氮, 不利于土壤形成良好的团粒结构^[20], 使土壤 OPOC 缺乏物理保护, 容易被微生物利用而损失。此外, 施氮能增加土壤 OPOC/STOC 和 FPOC/STOC, 且 OPOC/STOC 高于 FPOC/STOC, 这可能与受团聚体的保护程度有关^[18]。

3.3 不同施氮水平对矿质结合态有机碳含量的影响

本研究结果表明, 不同处理下土壤 MOC 含量均随土层的加深而降低, 这与 STOC, FPOC 和 OPOC 的变化趋势一致。在 0—20 cm 各土层, N_{105} 与 $N_{152.5}$ 处理均可显著提升土壤 MOC 含量, 而 $N_{52.5}$ 处理对其提升效应不显著。这可能是适量施氮与过量施氮使根系分泌物与微生物分泌物增多, 这些分泌物可直接与土壤黏粒相结合^[29-30], 有利于土壤 MOC 的积累; 此外, 氮素的添加能减缓土壤氮素限制, 导致微生物可利用的基质增加而活性提高^[21], 增加了微生物对有机物的分解作用^[31]。在不同处理下 MOC/STOC 随土壤加深而增大, 与 POC/STOC 变化趋势相反, 这可能是由于土壤上层有机物量高于下层, 导致土壤活性有机碳比例较高^[18]。在 0—20 cm 各土层, 各处理下 MOC/STOC 均高于 POC/STOC, 这表明该区土壤 MOC 为 SOC 的主要形态。

4 结论

施氮可不同程度提升土壤总有机碳、游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳和矿质结合态颗粒有机碳含量, 且以 N_{105} 处理提升效应最优。不同处理下, 矿质结合态有机氮占总有机碳的比例高于颗粒态有机碳占总有机碳的比例, 表明该地区土壤有机碳库组成中, 土壤矿质结合态有机碳占绝对优势。 N_{105} 处理可显著增大土壤游离态颗粒有机碳和闭蓄态颗粒有机碳占总有机碳的比例, 而降低矿质结合态有机碳占总有机碳的比例。综上所述, 施氮可提升土壤固碳能

力,且 N_{105} 处理最优,暂可筛选为该地区春小麦栽培的合理施氮量。施氮对颗粒态有机氮组分含量的影响可能存在一个阈值,而本研究对该阈值界定证据不足,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Mosier A R. Soil processes and global change[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 221-229.
- [2] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 282-289.
- [3] 张旭博, 孙楠, 徐明岗, 等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(23): 4648-4657.
- [4] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(2): 460-466.
- [5] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [6] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Soil structure and carbon cycling[J]. *Soil Research*, 1994, 32(5): 1043-1068.
- [7] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 54-63.
- [8] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783-795.
- [9] Beauregard M S, Hamel C, Atul-Nayyar, et al. Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not am fungal community in alfalfa[J]. *Microbial Ecology*, 2010, 59(2): 379-389.
- [10] Huang G B, Zhang R Z, Li G D, et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems[J]. *Field Crops Research*, 2014, 107(1): 43-55.
- [11] 周晶, 姜昕, 马鸣超, 等. 长期施氮对土壤肥力及土壤微生物的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 8-13.
- [12] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 276-284.
- [13] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 长期不同施肥对潮土有机碳储量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1): 233-238.
- [14] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 22-29.
- [15] 李小涵, 李富翠, 刘金山, 等. 长期施氮引起的黄土高原旱地土壤不同形态碳变化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2795-2803.
- [16] 张秀兰, 王方超, 方向民, 等. 亚热带杉木林土壤有机碳及其活性组分对氮磷添加的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 449-455.
- [17] 王楠, 王帅, 高强, 等. 氮素水平对不同肥力土壤微生物学特性影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 148-151.
- [18] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 728-736.
- [19] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565-3574.
- [20] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [21] 苏洁琼, 李新荣, 鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 664-670.
- [22] Shan H, Zhang W J, Yu X C, et al. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1): 44-50.
- [23] 陈玉真, 王峰, 尤志明, 等. 不同施氮量对茶园土壤有机碳矿化特征的影响[J]. *福建农业学报*, 2014, 29(11): 1092-1097.
- [24] Cookson W R, Abaye D A, Marschner P, et al. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(9): 1726-1737.
- [25] Golchin A, Oades J, Skjemstad J, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy[J]. *Soil Research*, 1994, 32(2): 285-309.
- [26] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 104-111.
- [27] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 808-814.
- [28] Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition: an important source for carbon turnover in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 165(4): 397-407.
- [29] Jungk Albrecht. Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164(2): 121-129.
- [30] 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*, 2012, 46(2): 300-309.
- [31] 马瑞萍, 戴相林, 刘国一. 施氮对西藏农田土壤有机碳及酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(18): 126-131.