

长期秸秆还田与施氮后土壤活性碳、氮的变化

张娟霞¹, 刘伟刚¹, 宁媛¹, 王朝辉^{1,2}, 翟丙年¹, 郑险峰¹, 孙本华¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学, 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过长期定位试验, 研究了秸秆还田和施氮后小麦生育期内土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)及可溶性有机碳(DOC)的变化, 以期为关中麦玉轮作区土壤肥力的提升以及农业的可持续发展提供科学依据。采用裂区设计, 主处理为玉米秸秆全量还田(S+N)和秸秆不还田(N), 副处理为 3 个不同施氮水平(0, 168, 252 kg/hm²)共 6 个处理。结果表明: 土壤 MBC 从小麦分蘖期至越冬期降低, 此后至拔节期升高且达到峰值, 拔节期至成熟期降低。各处理土壤 DOC 从分蘖期至拔节期增加, 拔节期达到峰值, 此后至成熟期降低; 而土壤 MBN 的动态变化在整个生育期呈现降低的趋势。秸秆还田处理的土壤 MBC 和 DOC 显著高于秸秆不还田处理, 平均分别提高 6.7% 和 9.3%; 秸秆还田后土壤 MBN 均高于秸秆不还田处理, 且在越冬期、拔节期和成熟期达显著水平; 各处理的土壤 MBC 和 MBN 随着施氮量的增加而显著降低, 还田处理的土壤 DOC 随施氮量的增加而显著增加, 平均增加 11.8%; 而秸秆不还田各处理中土壤 DOC 含量表现出先增高后降低的趋势。可见, 秸秆还田有提高土壤活性有机碳氮的作用, 而过量施用氮肥对活性碳氮的提高有抑制作用。因此, 关中平原麦玉轮作区实行秸秆还田配合施用适量氮肥是提高土壤肥力水平、实现农业可持续发展的有效措施。

关键词: 秸秆还田; 施氮量; 微生物量碳、氮; 可溶性有机碳; 矿质氮

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0212-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.033

Changes of Active Carbon and Nitrogen in Soil After Long-term Straw Returning and Nitrogen Application

ZHANG Juanxia¹, LIU Weigang¹, NING Yuan¹,

WANG Zhaohui^{1,2}, ZHAI Bingnian¹, ZHENG Xianfeng¹, SUN Benhua¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of

Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100;

2. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to provide a scientific basis for the promotion of soil fertility and the sustainable development of agriculture, a fixed site field experiment was conducted to investigate the changes of soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon after long-term (six years) straw return and urea application in a winter wheat-summer maize rotation system from Guanzhong Plain in Northwest China. The experiment was arranged in a split block design with two main treatments and three subplots, full maize straw return of previous crop (S+N) and no straw return (N) as main plots, and three chemical nitrogen treatments 0, 168 and 252 kg/hm² with four replicates as sub-plots. The results showed that with time soil MBC decreased from tillering stage to wintering stage, then increased until jointing stage and declined later. Soil DOC increased from tillering stage to jointing stage and decreased later with time, the dynamic change of soil MBN in the whole wheat growing season showed a decreased trend. Compared with no straw return treatments, straw return significantly increased the MBC and DOC content in the soil, and increased by 6.7% and 9.3% in average, respectively. MBN in straw return treatments were higher than no straw return treatments, but significantly increased only in wintering stage, jointing stage and maturity stage. With the increase of nitrogen rate, MBC and MBN significantly decreased. While with the increase of nitrogen rate, DOC significantly increased in straw return treatments, and increased by 11.8% in average, but the DOC in no straw return treatments showed an increased trend firstly and declined later. Overall, straw returning

收稿日期: 2017-12-05

资助项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-1-31); 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B04); 公益性行业(农业)科研专项(201503124-4)

第一作者: 张娟霞(1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物营养与调控研究。E-mail: zhangjuanxia2017@163.com

通信作者: 郑险峰(1968—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事旱地土壤培肥与作物施肥研究。E-mail: zxf260@sohu.com

could obviously increase soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, and the application of chemical nitrogen fertilizer promoted the decomposition of maize straw, but excessive application of chemical nitrogen fertilizer decreased the microbial biomass carbon and nitrogen, and will have negative effect on the growth of microorganism. So, straw returning with moderate nitrogen fertilizer is an effective measure to improve the soil fertility and realize the sustainable development of agriculture in the winter wheat-summer maize rotation system from Guanzhong Plain in Northwest China.

Keywords: straw returning; nitrogen application amount; microbial biomass carbon and nitrogen; dissolved organic carbon; mineral nitrogen

土壤碳氮是农业生态系统中最关键的两大元素^[1],碳氮循环在维持农田生态系统的稳定性,提高土壤生产力和改善土壤环境中扮演着重要的角色^[2]。土壤微生物量碳、氮是土壤的重要组成部分,在土壤的物质和能量转换中起着非常重要的作用,土壤微生物量碳、氮能够代表和参与调控土壤中的养循环和能量转化,是土壤养分转化过程中的一个重要的源和库^[3]。土壤可溶性有机碳不仅是土壤微生物的主要能源和物质来源,而且其本身也有一部分是来自于死亡微生物的降解,与微生物生物量的关系非常密切^[4]。陈安强等^[5]研究表明,土壤微生物量碳、可溶性有机碳和微生物量氮分别与土壤有机质和土壤全氮有显著的相关性,可见,它们是土壤肥力的重要指标。因此研究土壤中微生物量碳、氮以及可溶性有机碳具有十分重要的意义。

陕西关中平原位于黄土高原南部,以小麦—玉米轮作为主,是我国粮食主产区之一,小麦秸秆高留茬—夏玉米秸秆直接还田已成为麦玉轮作区一项常规农业措施。已有研究^[6]表明,秸秆还田配施氮肥能有效提高冬小麦的氮素利用效率和氮肥表观利用率,秸秆还田配施适量氮肥有降低冬小麦籽粒需氮量的趋势。与秸秆不还田相比,秸秆还田对冬小麦籽粒产量和收获期地上部氮、磷、钾养分吸收量的影响均表现出低氮降低、高氮增加的趋势^[7]。此外,采用尼龙网袋田间填埋与¹⁵N同位素标记秸秆相结合的方法,研究了施氮对玉米秸秆腐解的影响,以及腐解过程中秸秆碳、氮、磷、钾养分的释放情况^[8],但尚未涉及秸秆还田与施氮对土壤微生物量碳、氮以及可溶性有机碳等土壤活性碳、氮的影响,秸秆还田与施氮后活性碳、氮的变化尚不清楚。因此,本试验通过研究秸秆还田后冬小麦生育期内土壤微生物量碳、氮以及可溶性有机碳的变化,以揭示秸秆还田与施肥后土壤的质量变化情况,旨在为关中地区土壤肥力的提升以及实现农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011年10月开始玉米秸秆还田定位试验。

在陕西省周至县终南镇王才屯村(东经108°22′04″,北纬34°07′20″)进行。试验点位于关中平原,属半湿润易旱气候,以冬小麦—夏玉米轮作为主,一年两熟,年均气温13℃,年降水量674 mm,无霜期225 d,供试土壤为褐土。供试前0—20 cm土层土壤有机质含量18.6 g/kg,全氮1.13 g/kg,硝态氮4.03 mg/kg,有效磷43.5 mg/kg,速效钾188 mg/kg,pH 7.28,容重1.21 g/cm³。

1.2 试验设计

试验于2016年10月18日开始。采用裂区设计,主处理为玉米秸秆还田(S+N)和不还田(N),其中秸秆还田是将玉米秸秆机械粉碎后全量还田,在小麦播种前深翻(30 cm)入土,然后撒施肥料,用旋耕机旋耕20 cm,再用带有土壤压实器的播种机播种小麦;秸秆不还田是将玉米秸秆移出田块,其他耕作措施同秸秆还田处理。副处理为3个不同氮水平,用量分别为0,168,252 kg/hm²,共6个处理。小区面积为34.5 m²,重复4次。各处理磷、钾肥用量一致,2011年为P₂O₅ 150 kg/hm²和K₂O 135 kg/hm²,2012年根据小麦播前土壤速效养分测定结果调整为P₂O₅ 100 kg/hm²和K₂O 75 kg/hm²。氮肥用尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。氮肥用量的60%和全部磷、钾肥在小麦播前作底肥1次施入,其余40%的氮肥于拔节期作为追肥施入,小麦品种为周麦26,播种量为168 kg/hm²。小麦生育期不灌水,其他管理措施与当地农户一致,小麦收获后种植夏玉米,品种为郑单958,播种量45 kg/hm²,机械播种,施氮量N 108 kg/hm²,磷肥用量为P₂O₅ 138 kg/hm²,2016年玉米秸秆还田量为9 583 kg/hm²。

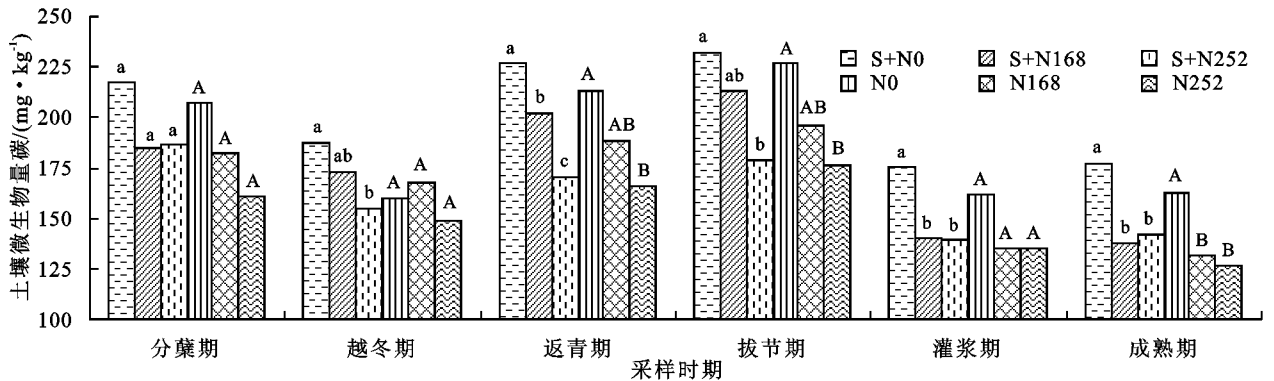
1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品采集 分别在冬小麦分蘖期(2016年11月18日)、越冬期(2016年12月23日)、返青期(2017年3月8日)、拔节期(2017年4月17日)、灌浆期(2017年5月13日)和成熟期(2017年6月1日)用五点混合法取0—20 cm土层的土样,取20 g左右鲜土用于含水量的测定。剩余鲜土分成2部分,一份过2 mm的筛用于测定土壤中微生物量碳、氮和可溶性有机碳的含量,另一份风干后过1 mm的筛用于土壤中矿质态氮含量的测定。

1.3.2 土壤样品的测定 土壤含水量采用 105 ℃ 烘干法测定;土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸,0.5 mol/L K_2SO_4 直接提取法测定^[9-10]。其中浸提液中的溶解性碳(DOC)采用岛津 TOC-VCPH 有机碳分析仪测定,由熏蒸与未熏蒸土样的 DOC 差值除以转换系数 0.45,计算得到微生物量碳(MBC),用连续流动分析仪测定浸提液中的铵态氮,由熏蒸与不熏蒸的铵态氮之差除以转换系数 0.25,计算得到微生物量氮(MBN)。矿质态氮含量用 1 mol/L 氯化钾浸提,连续流动分析仪测定硝态氮和铵态氮,两者之和即为矿质态氮。

1.4 数据计算和统计分析

运用 Excel 2003 进行数据的计算及图表的制作,SPSS 19.0 软件进行统计分析,并利用 Duncan 法



注: N 表示玉米秸秆不还田; S+N 表示玉米秸秆还田; 图中不同小、大写字母分别表示秸秆还田和秸秆不还田条件下氮水平间的差异达 5% 显著水平。下同。

图 1 小麦生育期内不同处理土壤微生物量碳的变化

2.2 土壤微生物量氮的动态变化

由图 2 可知, N0 和 S+N0 处理的微生物量氮分蘖期至灌浆期降低, 在灌浆期至成熟期升高, 而其他处理的微生物量氮含量在小麦整个生育期呈现降低的趋势。秸秆还田处理的微生物量氮均高于秸秆不还田, 增加幅度为 2.8%~98.5%, 且在拔节期和成熟期达

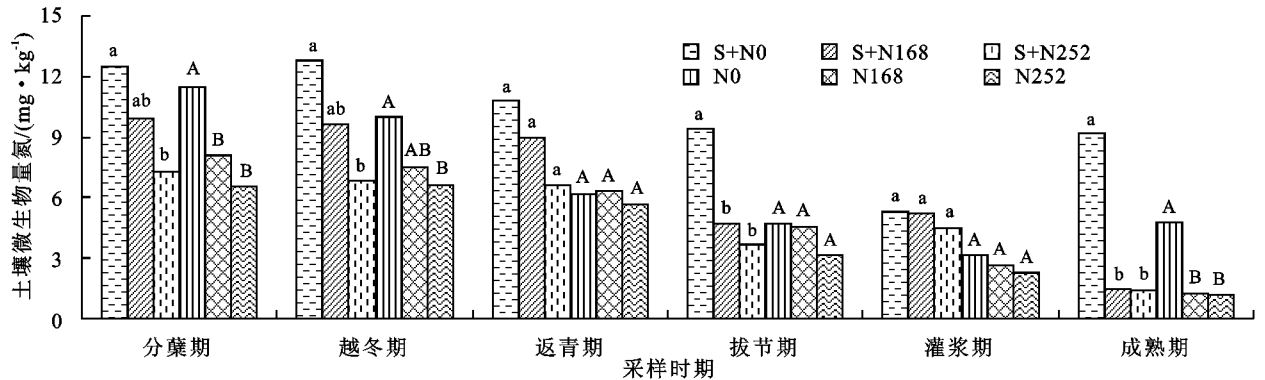


图 2 小麦生育期内不同处理土壤微生物量氮的变化

2.3 土壤可溶性有机碳的动态变化

由图 3 可知, 除 N0 处理外, 分蘖期至拔节期各处理的土壤可溶性有机碳含量增加, 在拔节期到达峰值; 拔节期至成熟期可溶性有机碳含量降低, 但灌浆期和成熟期的可溶性有机碳含量相差不大。秸秆还

进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物量碳的动态变化

由图 1 可知, 微生物量碳在小麦生育期内的动态变化, 从小麦分蘖期至越冬期降低, 此后至拔节期升高且达到峰值, 拔节期至成熟期降低, 在灌浆期和成熟期土壤微生物碳含量相差不大。秸秆还田处理的微生物量碳含量显著高于秸秆不还田处理, 平均提高 6.7%, 随着施氮量的增加还田和不还田处理的微生物量碳含量表现出降低的趋势, 还田处理除分蘖期外达显著水平 ($P < 0.05$), 降低幅度为 1%~24.9%, 不还田处理除分蘖期、越冬期和灌浆期外达显著水平 ($P < 0.05$), 降低幅度为 4.3%~28.9%。

显著水平 ($P < 0.05$)。还田和不还田处理的微生物量氮随着施氮量的增加而呈现降低的趋势, 还田处理的微生物量氮除返青期和灌浆期外, 差异达显著水平 ($P < 0.05$), 降低幅度为 2.3%~84.8%, 不还田处理除返青期、拔节期和灌浆期外达显著水平 ($P < 0.05$), 降低幅度为 3.9%~73.2%。

田处理的土壤可溶性有机碳含量显著高于秸秆不还田处理, 平均提高 9.3%。在秸秆还田处理中随着施氮量的增加可溶性有机碳含量增加, 并且除越冬期和灌浆期外, 各氮水平间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 增加幅度为 2.5%~30.4%; 秸秆不还田处理的可溶性有

机碳含量表现出先增高后降低的趋势,除分蘖期、返

青期和拔节期外达显著水平($P < 0.05$)。

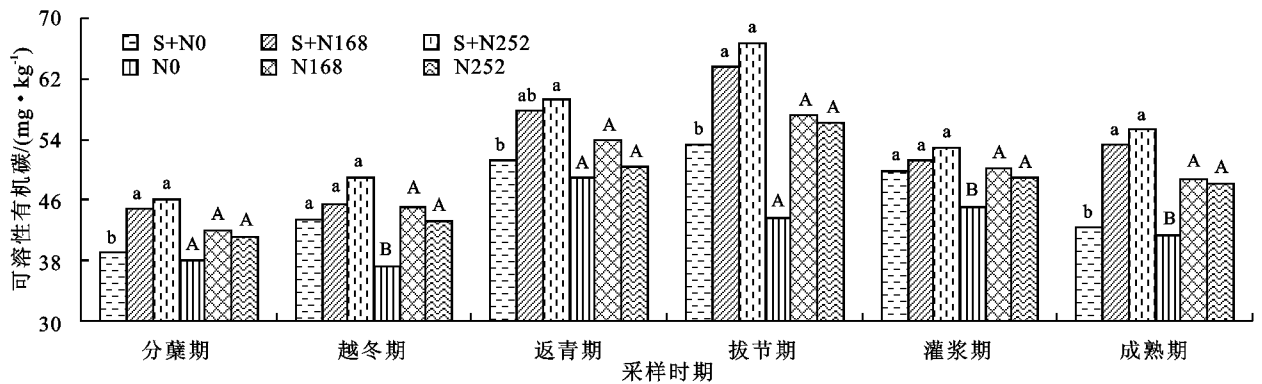


图 3 小麦生育期内不同处理土壤可溶性有机碳的变化

2.4 土壤矿质态氮的动态变化

由图 4 可知,由于 60% 氮肥做底肥在播前施入,加之在冬前分蘖期作物对氮素的吸收较少,因此,冬前分蘖期矿质态氮含量最高。分蘖期至返青期、拔节期至成熟期矿质态氮含量降低,这与小麦的吸收有关。返青期至拔节期矿质态氮含量升高是由于在此期间(3 月 28 日)进行了追肥。

在小麦各生育期内秸秆还田处理的土壤矿质态

氮始终高于秸秆不还田处理。不施肥处理的矿质态氮含量在小麦整个生育期比较稳定,维持在较低水平。在分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、灌浆期和成熟期秸秆还田处理的矿质态氮含量比秸秆不还田处理平均分别提高 8.6%, 6.4%, 15.9%, 11.5%, 12.2%, 41.7%, 且只在成熟期达到显著水平。随着施氮量的增加还田和不还田处理的矿质态氮含量增加,且还田和不还田都达到显著水平。

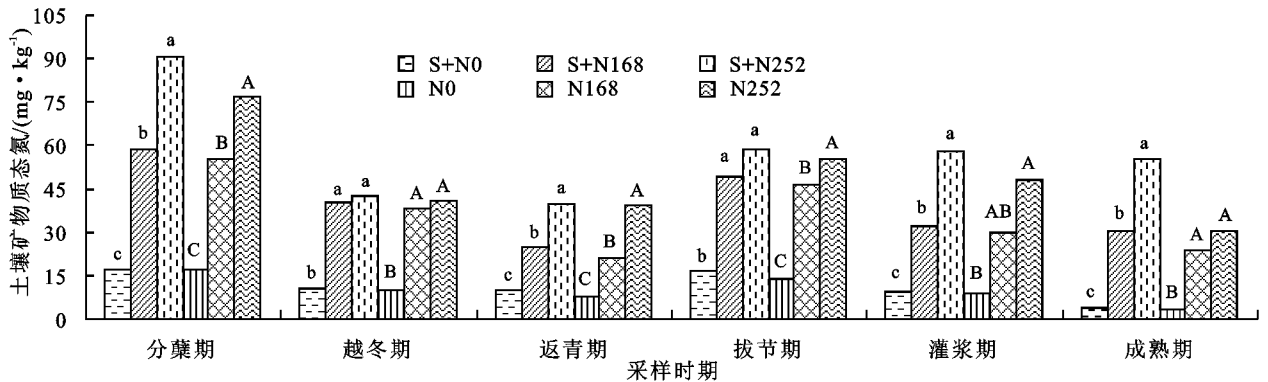


图 4 小麦生育期内不同处理矿质态氮含量的变化

3 讨论

3.1 小麦生育期内的 MBC 和 MBN 的动态变化

土壤微生物量碳含量在分蘖期至越冬期降低,此后至拔节期升高,并且在拔节期达到峰值,拔节期至成熟期表现出降低的趋势。因为在分蘖期至越冬期冬季低温、土壤冰冻,低温限制了土壤微生物的活动和生长繁殖,故而通过同化作用转入微生物体内的碳减少^[11],而在越冬期至拔节期,水热条件逐渐变好,这给土壤微生物的生长繁殖营造了适宜的环境;同时,此期土壤矿质态氮含量和可溶性有机碳含量也升高,这给微生物提供了丰富的碳源和氮源。拔节期至成熟期微生物量碳含量降低,一方面是由于在此期间可供微生物利用的 DOC 含量减少,另一方面是由于夏季温度较高,土壤水分蒸发量较大、土壤干旱所致,这与吴海燕等^[12]、Xie 等^[13]和梁斌^[14]的研究结果相似。

土壤新矿化的无机氮有 55%~89% 来自土壤微生物量氮, Singh 等^[15]认为在植物迅速生长阶段,氮的矿化作用加强,土壤微生物量氮含量降低,这说明在微生物

体内固定的氮是植物所需氮源的重要来源。韩晓日等^[16]盆栽试验研究发现,在作物生长过程中土壤微生物量氮的减少量与该时期内土壤矿质态氮的增加量呈极显著相关。梁斌^[14]研究也发现,微生物量氮与土壤中的矿质态氮含量间存在此消彼长的关系。本研究中,在小麦分蘖期至返青期各处理的矿质态氮含量下降明显,而微生物量氮变化不大,说明在这段时间内植物生长主要靠对矿质态氮的吸收。在返青期至拔节期矿质态含量增加,是因为 3 月 28 日追施了氮肥;拔节期至成熟期矿质态氮含量下降,但是下降幅度小于微生物量氮,说明在这段时间内植物既吸收利用矿质态氮又吸收微生物释放出的氮。由此可见,土壤中矿质态氮含量较高时(分蘖期至返青期),植物优先利用矿质态氮,而土壤中矿质态氮含量较低时(拔节期至成熟期),微生物固持的氮会释放出来供作物利用。在灌浆期至成熟期 N0 和 SN0 处理的微生物量氮升高,原因可能是在整个小麦生育期 N0 和 SN0 处理的矿质态氮含量很低,这 2 个处理的小麦早熟,灌浆期至

成熟期小麦需要的养分逐渐减少,而微生物因此有了其生长所需的养分,所以微生物量氮含量增加^[17]。

土壤微生物量碳、氮是土壤中最活跃的有机组分^[1],能快速响应土壤管理措施的变化,被认为是土壤质量变化的早期敏感指示者。许多管理措施(施肥、灌溉和耕作)影响着它们的变化,尤其是外源有机物料输入及化学肥料的施用对土壤微生物量碳、氮的变化有显著的影响^[18]。玉米秸秆配施氮肥可以增加微生物量碳的含量^[19],张星等^[17]研究表明,秸秆还田显著提高了土壤微生物量碳、氮的含量,与 CK 处理相比,秸秆还田处理的微生物量碳、氮含量分别提高了 96.4% 和 114.3%。马晓霞等^[20]研究表明,氮磷钾配合秸秆还田微生物量碳、氮较对照处理分别提高了 54.6% 和 60.3%。Wang 等^[21]在亚热带稻田上的研究发现,秸秆还田与对照相比能显著增加早稻田中的微生物量碳的含量。在本研究中,秸秆还田处理的微生物量碳含量显著高于秸秆不还田处理,平均提高 6.7%,秸秆还田后微生物量氮均高于秸秆不还田处理,提高幅度为 2.8%~98.5%,且在越冬期、拔节期和成熟期达显著水平,表明秸秆还田促进了微生物的生长,这可能是由于秸秆作为一种有机物料还田改善了土壤的理化性质,为土壤微生物的生长繁殖营造了良好的生存环境^[22],同时秸秆还田为微生物的生长提供了丰富的碳源和氮源,极大地刺激了微生物的群落和活性^[23],促进了微生物的生长繁殖;其次秸秆分解中产生的可利用的氮及其他营养元素促进了作物的生长,增加了根的生长和根系的分泌物,因而也促进了土壤微生物的生长和繁殖,提高了微生物的生物量^[24]。随着施氮量的增加各处理的土壤微生物量碳、氮含量表现出降低的趋势,其中还田处理的微生物量碳、氮在多数时期达显著水平($P < 0.05$),不还田处理微生物量碳、氮在 3 个时期达显著水平($P < 0.05$),表明化学氮肥对土壤微生物有抑制作用。这可能是因为虽然秸秆的碳氮比较高,但是秸秆腐解只是把易分解的少量有效碳释放到土壤中,大部分结构复杂难降解的碳还存留在秸秆中,施肥稍高就会导致微生物缺乏有效碳,在缺少基本能源的情况下提高有效氮的含量是不会提高微生物数量和活性的^[25],同时,施用化肥使土壤 pH 下降,微生物的生命活动减弱,此外,土壤团聚体受到破坏,微生物自下而上环境变劣,可能也是土壤微生物量碳、氮降低的原因之一^[26]。

3.2 小麦生育期内的 DOC 的动态变化

玉米秸秆的分解有 2 个明显的阶段:一个是最初的快速分解阶段,主要分解蛋白质、果胶类和纤维素等可溶性组分,持续时间约为 15~45 d。接下来是缓慢分解阶段,主要分解木质素、单宁和蜡质等难分解的物质^[27]。在本研究中,各处理土壤可溶性有机碳含量在分蘖期至拔节期增加,其中分蘖期至越冬期增

加幅度较小,拔节期到达峰值,此后至成熟期降低。这可能是在分蘖期至越冬期这段时间内较低的温度抑制了微生物的活动和酶的活性,从而降低了秸秆腐解的速率,延长了秸秆分解的第 1 阶段,而拔节期至成熟期相当于秸秆分解的缓慢阶段,因此作为分解产物的可溶性有机碳含量逐渐下降。秸秆还田处理的可溶性有机碳含量显著高于秸秆不还田处理,这与汤宏等^[28]的研究结果一致。在秸秆还田处理中随着施氮量的增加可溶性有机碳含量增加,并且除越冬期和灌浆期外,各氮水平间差异达显著水平($P < 0.05$),这说明氮肥加入刺激了可溶性有机碳的释放,外源氮的供应满足了分解群体对有效氮的需求,充足的碳源和氮源的供应进一步促进了玉米秸秆的分解,土壤 DOC 作为有机物料的分解产物含量也随之升高^[29]。Chantigny^[30]研究发现,玉米地土壤 DOC 含量在施用 NH_4NO_3 后迅速降低,作物吸收土壤矿质氮使其含量降低后 DOC 含量又开始增高。Vestgarden 等^[31]也发现,林地连续 3 年施用化学氮肥使土壤 DOC 含量显著降低。在本研究中,秸秆不还田各处理中可溶性有机碳含量表现出先增加后降低的趋势,因为秸秆不还田不是绝对不还田,秸秆不还田处理根系以及地上部分残茬留在了秸秆不还田处理中。可溶性有机碳含量先增加的原因可能是:一方面 N168 处理产生的生物量显著高于 N0 处理,通过根系及地上部分残茬归还的有机物也相应高于 N0;另一方面 N0 处理中矿质态氮含量很低,作物与微生物对氮素的竞争作用明显,而 N168 处理矿质态氮含量较高,这促进了玉米秸秆的分解,从而将更多的 DOC 从玉米秸秆中释放出来。而 N252 和 N168 产生的生物量基本相等,它们以根系和残茬形式归还到土壤中的有机物料量基本相等,但是 N252 处理中的矿质态氮含量显著高于 N168,也就是土壤中的有效氮充足,而有效碳缺乏,微生物就会去分解利用土壤中的 DOC 来满足对碳的需求。因此,土壤中的 DOC 含量下降。

4 结论

(1)微生物量碳、氮和可溶性有机碳受小麦生育期内气温、土壤水分、施肥、作物吸收和秸秆腐解等多种因素的影响,呈现有规律的消长变化。在小麦生长期土壤微生物量碳含量从小麦分蘖期至越冬期降低,此后至拔节期升高且达到峰值,拔节期至成熟期降低,在灌浆期和成熟期土壤微生物量碳含量相差不大;与微生物量碳不同,各处理微生物量氮含量在小麦整个生育期呈现降低的趋势;各处理土壤可溶性有机碳含量在分蘖期至拔节期增加,拔节期到达峰值,此后至成熟期降低。

(2)长期秸秆还田能显著提高土壤中微生物量碳和可溶性有机碳的含量,平均分别提高 6.7% 和 9.3%;与秸秆不还田相比,秸秆还田后土壤微生物量氮均高于

秸秆不还田处理,提高幅度为2.8%~98.5%,且在越冬期、拔节期和成熟期达显著水平;施用化学氮肥显著降低了土壤中微生物量碳、氮的含量,与微生物量碳、氮不同,还田处理的可溶性有机碳含量随着施氮量的增加而显著增加,平均增加11.8%,而不还田处理的可溶性有机碳随施氮量的增加表现为先升高后降低的趋势。

参考文献:

- [1] Blair N, Faulkner R D, Till A R, et al. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility: Part I; Broadbalk experiment [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 91 (1/2): 30-38.
- [2] 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.
- [3] 张电学,韩志卿,李东坡,等.不同促腐条件下秸秆还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1903-1908.
- [4] 赵彤,蒋跃利,闫浩,等.黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3223-3230.
- [5] 陈安强,付斌,鲁耀,等.有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160-167.
- [6] 顾焱明,郑险峰,黄婷苗,等.秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量及氮素调控的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 48-53, 73.
- [7] 黄婷苗,郑险峰,侯仰毅,等.秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响与调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853-863.
- [8] 黄婷苗,王朝辉,侯仰毅,等.施氮对关中还田玉米秸秆腐解和养分释放特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2261-2268.
- [9] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [10] 李世清,李生秀.土壤微生物体氮测定方法的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 75-83.
- [11] 黄剑.生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D].北京:中国农业科学院, 2012.
- [12] 吴海燕,范作伟,孙甜田,等.长期定位施肥玉米生育期内微生物量碳、氮和微生物数量的动态变化[J]. *玉米科学*, 2016, 24(2): 147-154, 159.
- [13] Xie W J, Wu L F, Zhang Y P, et al. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 169: 1-6.
- [14] 梁斌.黄土区不同培肥措施对土壤微生物量和可溶性有机碳氮的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [15] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. *Nature*, 1989, 338 (6215): 499-500.
- [16] 韩晓日,邹德乙,郭鹏程,等.长期施肥条件下土壤生物量氮的动态及其调控氮素营养的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(1): 16-22.
- [17] 张星,刘杏认,张晴雯,等.生物炭和秸秆还田对华北农田玉米生育期土壤微生物量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10): 1943-1950.
- [18] 张宏威,康凌云,梁斌,等.长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 99-107.
- [19] 庞荔丹,婷婷,张宇飞,等.玉米秸秆配氮还田对土壤酶活性、微生物量碳含量及土壤呼吸量的影响[J]. *作物杂志*, 2017(1): 107-112.
- [20] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,等.长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502-5511.
- [21] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 152: 8-16.
- [22] 孟凡乔,吴文良,辛德惠.高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 370-374.
- [23] 王芸,韩宾,史忠强,等.保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 120-122, 142.
- [24] 胡诚,曹志平,叶钟年,等.不同的土壤培肥措施对低肥力农田土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 808-814.
- [25] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11): 1485-1498.
- [26] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤.水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549-552.
- [27] 胡霁堂.植物营养学[M]. 2版.北京:中国农业大学出版社, 2003: 206-208.
- [28] 汤宏,沈健林,张杨珠,等.秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240-246.
- [29] Qiu Q Y, Wu L F, Ou-yang Z, et al. Priming effect of maize residue and urea N on soil organic matter changes with time [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 65-74.
- [30] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices [J]. *Geoderma*, 2003, 113(3): 357-380.
- [31] Vestgarden L S, Abrahamsen G, Stuanes A O. Soil solution response to nitrogen and magnesium application in a scots pine forests [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1812-1823.