

赵伟,郝帅,孙泰朋,等.粮草间作培肥处理对黑土土壤有机碳含量的影响[J].江苏农业科学,2017,45(7):277-280.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.07.072

粮草间作培肥处理对黑土土壤有机碳含量的影响

赵伟,郝帅,孙泰朋,田宗泽,许毛毛,王宏燕

(东北农业大学,黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:主要探讨粮草间作和培肥条件对黑土土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳含量的影响。结果表明,草木樨+化肥处理土壤有机碳含量最高,是CK的1.23倍,草木樨+半量化肥处理土壤有机碳含量是CK的1.07倍;草木樨+化肥处理土壤水溶性碳、土壤微生物量碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳含量分别是CK的1.08、1.13、1.11、1.03倍;草木樨+1/2化肥土壤有机碳、微生物量碳含量分别是CK的1.07、1.02倍,在土壤水溶性碳、颗粒态有机碳和易氧化有机碳含量上与CK差异不显著;草木樨+不施化肥处理土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳含量分别是CK的87%、85%、81%、91%、87%。可见,粮草间作的方式可以有效地提高土壤中有机碳的含量,从而为固碳减排、增加土壤碳库、寻找最佳种植和培肥土壤方式、减量施肥生产、健康安全食品和有机农业的发展提供了科学依据。

关键词:粮草间作;黑土;有机碳;培肥

中图分类号: S153.6; S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)07-0277-04

人类在长期的农业生产中过量施用化肥,导致水体、土壤和大气受到了污染^[1]。同时,土壤有机质大量流失,土壤性质急剧退化。黑土在开垦后的10年中土壤有机质大约减少1/3,开垦50年后大约减少2/3,连续30年不施肥料耕层土壤有机质年均减少0.22 g/kg;单施化肥处理耕层年均减少0.11 g/kg^[2]。减少化肥的过量施用带来的环境问题已经成为一个热点问题,但是减施化肥势必会降低农作物产量,因此,在保障国家粮食和生态环境安全的基础上,如何减少化肥的投入,是研究者和社会各界关注的主要问题^[3]。

土壤有机碳是土壤的生命源,在农田生态系统中发挥着重要的作用^[4]。夏战鹰等在湖南桃源采取稻草配施化肥种植方式,发现红壤的有机碳和易氧化有机碳含量有明显提高^[5]。张迪等研究了不同植被覆盖下和不同施肥处理下的黑土活性有机碳含量变化,发现草地与氮磷配施有机肥处理均有利于土壤有机碳及活性有机碳的积累^[6]。梁尧等在海伦农业生态实验站以黑土为对象进行定位试验,研究结果表明长期单施化肥导致土壤有机碳、土壤微生物量碳、土壤水溶性碳含量显著下降,有机无机肥配施则提高了土壤有机碳和各活性有机碳组分含量^[7]。国外学者也认为,有机肥在改善土壤环境和提升土壤有机碳储量中有重要的作用^[8-9]。

间作是我国农民在长期生产实践中逐步认识和掌握的一项增产措施,也是我国农业精耕细作传统的一个组成部分。Schmidt等研究表明,小麦-白三叶草间作土壤中土壤肥力和土壤有机质含量得到了显著提高^[10-11]。很多学者对果树与

白三叶草间作进行了研究,发现果园内果树与白三叶草间作导致土壤中有机碳含量增加,果树间作白三叶对果园土壤有机碳含量及土壤有机碳密度产生了积极影响^[12-15]。孟平等研究表明,在太行山区苹果-沙打旺复合系统中土壤有机碳含量较清耕提高1/3^[16]。宿庆瑞在黑龙江中低产黑土区进行了为期3年的玉米、草木樨间种轮作试验,结果表明粮草间作区较对照区土壤有机质含量平均提高61.5%^[17]。

尽管间作方面的研究很多,但研究粮草间作对黑土农田土壤有机碳含量的影响还鲜见报道,本试验研究粮草间作对黑土土壤有机碳含量的影响,以期为固碳减排、增加土壤有机质含量寻找最佳种植和培肥土壤方式,为化肥减量、健康安全食品和有机农业的发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验设在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学香坊农场试验基地,属于松嫩平原退化黑土类型,上一年用常规方法种植玉米,本次试验时间为2014年5—10月,供试作物为玉米302。供试土壤有机质含量21.97 g/kg,全氮含量0.20 g/kg,全磷含量0.21 g/kg,碱解氮含量173 mg/kg,速效磷含量19 mg/kg,速效钾含量207 mg/kg,pH值为7.27。

1.2 试验设计

本研究共4个处理,设12个小区,每个处理3次重复。每个小区10条垄,垄宽65 cm,垄长6 m。分别为处理1(CK):常规种植玉米+化肥,每垄栽1行玉米,玉米株距为25 cm,常规化肥处理(施肥量比例N:P₂O₅:K₂O=150:60:90);处理2:玉米间作草木樨+化肥,常规化肥处理(施肥量比例N:P₂O₅:K₂O=150:60:90);处理3:玉米间作草木樨+1/2化肥,半量常规化肥处理(施肥量比例N:P₂O₅:K₂O=75:30:45);处理4:玉米间作草木樨+不施化肥。处理2、处理3和处理4为玉米和草木樨间作,玉米

收稿日期:2016-01-10

基金项目:黑龙江省博士后科研启动金(编号:LBH-Q13020)。

作者简介:赵伟(1971—),女,河北乐亭人,博士,教授,主要从事农业生态学和土壤生态学的研究。E-mail:niersi7105@sina.com。

通信作者:王宏燕,博士,教授,主要从事生态学方面的研究。E-mail:why220@126.com。

株距为 25 cm, 草木樨为撒播, 撒播密度为 15 kg/hm²。在抽雄期(7月28日)进行 1 次追肥, 追肥量比例如上, 正常田间管理, 不施加任何农药。

1.3 土样采集

在玉米的出苗期(T₁)(6月7日)、拔节期(T₂)(6月28日)、抽雄期(T₃)(7月28日)、灌浆期(T₄)(8月28日)、成熟期(T₅)(9月20日)采集土样, 取土深度为 20 cm, “S”形取样, 四分法取土。

1.4 试验方法

1.4.1 土壤有机碳含量的测定 采用重铬酸钾外加热法^[18]进行测定。

1.4.2 土壤水溶性有机碳含量的测定 称取 5.00 g 风干土, 按水土比为 20 mL : 1 g 添加双蒸水, 在室温(25 ± 1)℃、180 r/min 振荡 30 min, 再离心 10 min(8 000 r/min) 然后通过 0.45 μm 微孔滤膜, 收集用于测定。

1.4.3 土壤微生物量碳(MBC)含量的测定 称取 20 g 新鲜土样, 用 50 mL 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液浸提后振荡过滤, 滤液为空白对照; 再取同等量鲜土采用三氯甲烷熏蒸法进行熏蒸, 将真空干燥器放入培养箱中于 25℃ 放置 24 h, 熏蒸后取出土样, 与对照样品的浸提振荡过滤步骤相同, 迅速用定量滤纸过滤, 用 TOC 仪测定, 以熏蒸和未熏蒸的土壤样品提取液中全碳含量的差值 × 系数(2.64) 计算其含量。

1.4.4 土壤颗粒态有机碳含量的测定 取过 2 mm 风干土约 20.00 g 放入 250 mL 塑料瓶, 加入 100 mL NaOH(0.5 mol/L), 手摇 3 min, 再用恒温振荡器振荡 18 h(90 r/min), 土壤悬液过 53 μm 筛, 并反复用蒸馏水冲洗。收集所有留在筛中的物质, 在 60℃ 下烘 48 h 至恒质量, 并计算该物质占土壤的百分含量, 再采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定其颗粒态有机碳含量。

1.4.5 易氧化有机碳含量的测定 采用 333 mmol/L 的高锰酸钾氧化法。具体方法: 25℃ 下, 称取含 15~30 mg 的待测样品, 装入 100 mL 的塑料瓶, 加入 333 mmol/L K₂MnO₄ 溶液 25 mL, 密封瓶口, 25 r/min 振荡 1 h。同时做空白样; 振荡后的样品以 4 000 r/min 离心 5 min, 取上清液, 用去离子水按 1 : 250 稀释; 在 565 nm 的分光光度计上比色测定稀释样品的吸光度, 由不加土壤的空白与土壤样品的吸光度之差, 得出被还原的 K₂MnO₄ 的消耗量, 即可求出样品的易氧化有机碳含量(氧化过程中 1 mmol K₂MnO₄ 消耗 0.75 mmol 或 9 mg 碳)。

2 结果与分析

2.1 粮草间作培肥处理对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可以看出, 各处理土壤有机碳含量差异明显。各处理有机碳含量以草木樨 + 化肥处理最高, 达到 15.66 g/kg, 是 CK 处理的 1.23 倍; 草木樨 + 1/2 化肥处理土壤有机碳含量为 13.63 g/kg, 是 CK 的 1.07 倍; 草木樨 + 不施化肥处理土壤有机碳含量最低, 只有 11.02 g/kg, 是 CK 的 87%。表明草木樨与玉米间作对提高土壤有机碳含量起到了良好的促进作用。

2.2 粮草间作培肥处理对土壤水溶性有机碳含量的影响

各处理土壤水溶性有机碳含量如图 2 所示, 可见各处理

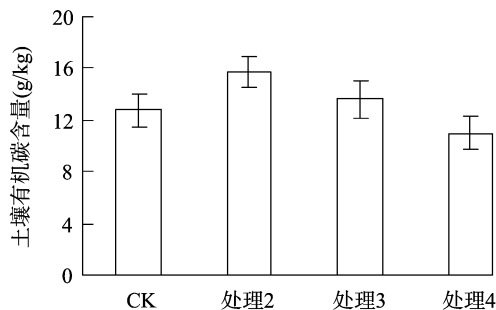


图1 各处理土壤有机碳含量

土壤水溶性有机碳含量呈现先上升后下降的趋势, 在 T₄ 灌浆期达到最高值。其中草木樨 + 化肥处理最高, 达到 209.45 mg/kg, 是 CK 的 1.13 倍; 草木樨 + 1/2 化肥土壤水溶性有机碳含量达到 193.00 g/kg, 是 CK 的 1.04 倍; 草木樨 + 不施化肥处理土壤水溶性有机碳含量达到 163.48 g/kg, 是 CK 的 88%。从玉米整个生育期平均值来看, 草木樨 + 化肥处理土壤水溶性碳含量为 129.2 mg/kg, 是 CK 的 1.08 倍; 草木樨 + 1/2 化肥处理的土壤水溶性碳含量为 113.91 mg/kg, 与 CK 差异不明显; 草木樨 + 不施化肥处理土壤水溶性碳含量是最低的, 平均值为 101.85 mg/kg, 是 CK 的 85%。

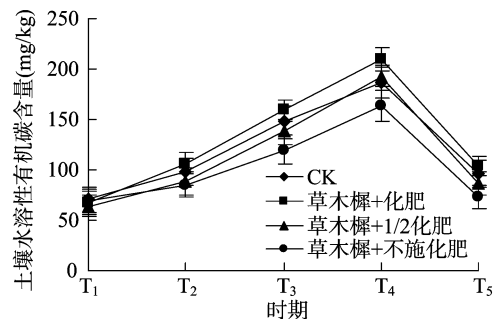


图2 土壤水溶性碳含量变化

2.3 粮草间作培肥处理对土壤微生物量碳含量的影响

由图 3 所示, 各处理土壤微生物量碳含量最小值在苗期, 最大值在灌浆期, 土壤微生物量碳含量呈现先升高后降低的趋势; 从整个生育期平均水平来看, 草木樨 + 化肥处理土壤微生物有机碳含量最高, 为 91.28 mg/kg, 是 CK 的 1.13 倍, 草木樨 + 1/2 化肥次之, 是 CK 的 1.02 倍, 草木樨 + 不施化肥处理土壤微生物有机碳含量是 CK 的 81%。

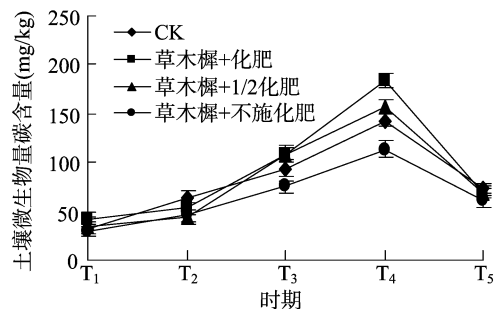


图3 土壤微生物量碳含量变化

2.4 粮草间作培肥处理对土壤颗粒态有机碳含量的影响

由图 4 所示, 土壤颗粒态有机碳含量变化总体呈现先上升再下降趋势, 各处理在 T₄ 灌浆期达到最高值, 苗期为最低, 拔节期与成熟期接近; 草木樨 + 化肥处理在灌浆期的土壤颗

粒态有机碳含量较高,达 1.7 g/kg,为各处理整个生育期最高值,是 CK 的 1.11 倍;草木樨 + 1/2 化肥处理土壤颗粒态有机碳含量达到 1.64 g/kg,是 CK 的 1.07 倍;各个处理在抽雄期的土壤颗粒态有机碳含量最为接近,在灌浆期相差最大。从整个生育期平均值来看,草木樨 + 化肥处理平均值为最高,达到 1.08 g/kg,是 CK 的 1.11 倍;草木樨 + 1/2 化肥处理土壤颗粒态有机碳含量与对照差异不明显;草木樨 + 不施化肥处理土壤颗粒态有机碳含量为 0.88 g/kg,是 CK 的 91%。

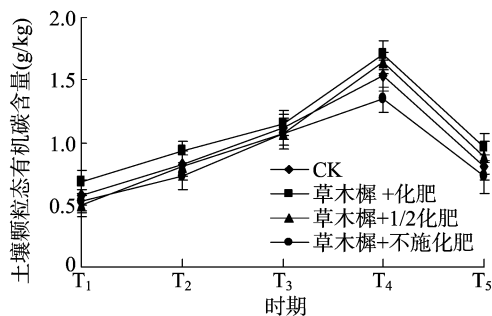


图4 土壤颗粒态有机碳含量变化

2.5 粮草间作培肥处理对易氧化有机碳含量的影响

如图 5 所示,土壤易氧化有机碳含量整体表现为前 3 个时期较平缓,T₄ 灌浆期上升,到 T₅ 成熟期又下降;除灌浆期外,其他 4 个时期土壤易氧化有机碳含量变化不大;各处理土壤易氧化有机碳含量在 T₄ 灌浆期达到最高值。在灌浆期草木樨 + 化肥处理土壤易氧化有机碳含量最高,达到 2.23 g/kg,是 CK 的 1.16 倍;草木樨 + 1/2 化肥处理土壤易氧化有机碳含量为 2.02 g/kg,是 CK 的 1.05 倍;草木樨 + 不施化肥处理土壤易氧化有机碳含量为 1.66 g/kg,低于 CK,是灌浆期 CK 的 86%。从整个生育期平均水平来看,草木樨 + 化肥处理土壤易氧化有机碳含量最高,达到 1.56 g/kg,是 CK 的 1.03 倍;草木樨 + 1/2 化肥处理土壤易氧化有机碳含量为 1.48 g/kg,低于 CK,但与 CK 差异不明显;草木樨 + 不施化肥处理土壤易氧化有机碳含量为 1.32 g/kg,是 CK 的 87%。

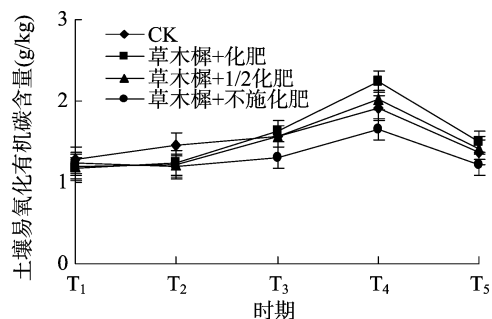


图5 土壤易氧化有机碳含量变化

3 讨论与结论

土壤有机碳是土壤有机质的重要组成部分,为土壤的植物生长提供了养分。本研究表明,草木樨 + 化肥处理及草木樨 + 1/2 化肥处理土壤有机碳含量均高于 CK,说明在同等施肥条件下,粮草间作可以有效提高土壤的有机碳含量。草木樨 + 1/2 化肥处理可以使土壤有机碳含量达到 CK 全量化肥的效果。天津市滨海新区胡卢巴与沙枣间作可以有效地提高土壤的有机质含量^[19];北京市大兴区梨园行间种植白三叶和

黑麦草能显著提高土壤各层次的土壤有机碳含量^[20]。可见,粮草间作对土壤有机碳含量有提高作用,因此粮草间作可以作为减施化肥的一种手段。由于草木樨与玉米间作,草木樨枯落物生物量增加了土壤有机-无机体的转化量,促进了土壤微生物生长繁育,从而增加了土壤微生物量,有利于土壤有机碳的积累。

土壤中水溶性有机碳以碳水化合物为主,是微生物降解腐殖质和动植物残体所产生的可溶于水的小分子物质^[21]。腐殖化的有机质、植物凋落物、根系分泌物和微生物生物量都是土壤水溶性有机碳重要来源^[22]。本试验中草木樨与玉米间作提高了单位面积内根系的数量,增加了植物凋落物,通过微生物降解,在短期内产生了大量的水溶性有机物。这应该是本试验草木樨 + 化肥处理土壤水溶性有机碳含量高于 CK 的原因。土壤微生物量碳是土壤中活性较高的有机碳部分,它是衡量土壤有机碳质量的重要指标^[23]。夏志敏等研究认为,蚕豆-玉米间作带的土壤微生物量碳高于玉米-玉米带^[24]。本试验中草木樨 + 化肥处理和草木樨 + 1/2 化肥处理土壤微生物量碳含量比单施化肥的 CK 高,这与夏志敏等的研究结果一致,可能是因为草木樨与玉米间作种植,增加了农田的生物多样性,强化了种间边缘效应,导致土壤中微生物的数量及活性大大增加,从而提高土壤中微生物碳含量。

颗粒有机碳主要由植物残体的半分解产物组成^[25]。近年来许多研究认为,颗粒有机碳对于施肥的响应十分显著,能在较短时间内反映因农业管理措施的改变而导致的土壤质量变化^[26]。本试验中草木樨 + 化肥处理土壤颗粒态有机碳含量明显高于 CK,草木樨 + 1/2 化肥处理土壤颗粒态有机碳含量比 CK 高 7%。说明减施化肥同时采用粮草间作方式有利于土壤中颗粒态有机碳的积累,有利于土壤肥力的修复。草木樨与玉米间作增加了农田种间边缘效应,同时单位面积内植物生物量高于玉米单作,因而土壤中有可供微生物大量分解的植物残体,这是颗粒态有机碳含量增加的一个原因。易氧化有机碳是土壤总有机碳中的活性部分,是土壤碳库变化快慢的指示性指标^[27]。本试验中草木樨 + 化肥处理土壤易氧化有机碳含量明显高于 CK,草木樨 + 1/2 化肥处理在灌浆期的土壤易氧化有机碳含量也明显高于 CK,可能是因为易氧化有机碳是土壤中活性较高、较为灵敏的一个碳素指标,它比土壤总有机碳更为灵敏^[28],在草木樨、玉米间作的条件下,植株密度变大,根际温度较高,大量微生物在适宜的环境中短时间内快速分解土壤中的植物残体等有机物质,从而使易氧化有机碳含量上升。在本试验中,各处理土壤水溶性有机碳、土壤微生物有机碳、土壤颗粒态有机碳、土壤易氧化有机碳含量均于 T₄ 灌浆期达到最高值,可能由于受大气温度变化影响,T₄ 灌浆期时试验地区温度最高,降水充沛,环境条件有利于生物及微生物生长繁殖,因此增加了土壤水溶性有机碳、微生物有机碳、颗粒态有机碳和易氧化有机碳含量。另外,有研究表明施加化肥可以提高土壤碳素含量^[29-30],本试验在 T₃ 抽雄时期进行了一次追肥,这可能是导致土壤的有机碳素含量提升的一个原因。间作是通过各类作物的不同组合构成多种植物、多层次、多功能的人工复合群体,利用不同植物在生长过程中形成的空间差、时间差,有效地发挥光、肥、水、气、热等有限农业资源的生产潜力,提高了土壤养分的吸收利用效

率,弥补了单作的不足,在农业生产中占有重要地位^[31]。因而在本试验中,草木樨 + 化肥处理土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量有机碳、颗粒态有机碳和易氧化有机碳含量均高于 CK;草木樨 + 1/2 化肥处理土壤有机碳、微生物量碳含量高于 CK,而土壤水溶性碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳含量与 CK 接近;草木樨 + 不施化肥处理土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳、颗粒态有机碳、易氧化有机碳含量与 CK 相比均略低于对照,分别是对照的 87%、85%、81%、91%、87%,表明粮草间作起到了一定的施肥效用,由于仅是 1 年试验结果,随着多年定位试验,粮草间作替代化肥的作用效果还有待进一步研究。因此,本研究表明,玉米、草木樨间作起到了一定的施肥效果,且试验中未喷洒农药和除草剂,这为节能减排、减少化肥施用以及有机农业的发展提供了良好的科学依据。

参考文献:

- [1]肖 军,秦志伟,赵景波. 农田土壤化肥污染及对策[J]. 环境保护科学,2005,31(5):32-34.
- [2]朱 平,彭 畅,高洪军,等. 长期培肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 玉米科学,2009,17(6):105-108,111.
- [3]李明哲. 农田化肥施用污染现状与对策[J]. 河北农业科学,2009,13(5):65-67.
- [4]Lal R. Soil Carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science,2004,304(5677):1623-1627.
- [5]夏战鹰,黄道友,刘守龙,等. 稻草添加对新垦红壤易氧化有机碳和腐殖碳的影响[J]. 土壤通报,2014,45(4):871-875.
- [6]张 迪,韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(13):2715-2723.
- [7]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.
- [8]Purakayastha T J,Rudrappa L,Singh D,et al. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system[J]. Geoderma,2008,144(1):370-378.
- [9]Banger K,Toor G S,Biswas A,et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2010,86(3):391-399.
- [10]Schmidt O,Clements R O,Donaldson G. Why do cereal-legume intercrops support large earthworm populations? [J]. Applied Soil Ecology,2003,22(2):181-190.
- [11]Schmidt O,Curry J P,Hackett R A,et al. Earth-worm communities in conventional wheat monocropping and low-input wheat-clover intercropping systems[J]. Ann Appl Biol,2001,138(3):377-388.
- [12]王英俊,李同川,张道勇,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. 草地学报,2013,21(3):485-493.
- [13]王义祥,翁伯琦,黄毅斌,等. 不同垦殖方式下果园土壤有机碳的空间分布特征[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2511-2517.
- [14]颜晓捷,黄坚钦,邱智敏,等. 生草栽培对杨梅果园土壤理化性质和果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报,2011,28(6):850-854.
- [15]张玉岱,李同川,张道勇,等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总有机碳及轻组有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报,2014,33(4):810-818.
- [16]孟 平,张劲松. 太行山低山丘陵区果-草复合系统生态经济效益研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(2):111-113.
- [17]宿庆瑞. 东北玉米主产区玉米、草木樨间种轮作农牧结合综合效益的研究[J]. 中国草地,1998(4):17-20.
- [18]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:30-34.
- [19]李 慧,冯 涛,于玮玮,等. 复合间作栽培模式对滨海盐渍土养分和有机质的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(15):89-92.
- [20]霍 颖,张 杰,王美超,等. 梨园行间种草对土壤有机质和矿物质元素变化及相互关系的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(7):1415-1424.
- [21]Kalbitz K,Solinger S,Park J H,et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils;a review[J]. Soil Science,2000,165(4):277-304.
- [22]刘 丽,周连仁,苗淑杰. 长期施肥对黑土水溶性碳含量和碳矿化的影响[J]. 水土保持研究,2009,16(1):59-62.
- [23]Bohme L,Bohme F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilisation[J]. European Journal of Soil Biology,2006,42(1):1-12.
- [24]夏志敏,梅沛沛,王 平,等. 新垦灰钙土蚕豆/玉米间作系统土壤活性有机碳、氮的时空变异研究[J]. 土壤通报,2012,43(2):336-341.
- [25]Camberdella C A,Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of some fraction from cultivated grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1994,58:123-130.
- [26]李江涛,张 斌,彭新华,等. 施肥对红城性水稻土顺粒有机物形成及团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报,2004,41(6):912-917.
- [27]关振寰,李巧云,张仁陟,等. 保护性耕作对土壤易氧化和总有机碳的影响[J]. 土壤通报,2015,45(2):420-426.
- [28]王 琳,李玲玲,高立峰,等. 长期保护性耕作对黄绵土总有机碳和易氧化有机碳动态的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(9):1057-1063.
- [29]马俊永,曹彩云,郑春莲,等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(6):38-42.
- [30]谢军飞,许 蕊. 长期施用化肥对土壤有机碳含量影响的 Meta 分析[J]. 土壤通报,2014,45(2):427-431.
- [31]唐劲弛,Mboreha I A,余丽娜,等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学,2005,38(6):1196-1203.