

种还分离玉米秸秆还田对土壤微生物量碳及酶活性的影响

刘龙, 李志洪, 赵小军, 崔婷婷

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 在种还分离模式下采用尼龙网袋法对玉米秸秆还田进行田间原位模拟, 比较不同秸秆还田量在不同还田深度下对土壤总有机碳、微生物量碳、纤维素酶活性和过氧化氢酶活性的影响。试验设置秸秆还田量 0(R0), 0.44%(R1), 0.88%(R2) 和 1.32%(R3) 4 个水平和 3 个还田深度 0—15, 15—30, 30—45 cm 交叉处理。结果表明: 还田 1 年时, 在 0—15 cm 土层, 土壤总有机碳、微生物量碳、纤维素酶活性和过氧化氢酶活性均随秸秆还田量增加而提高, 且 R3 处理提升效果最显著, 分别达到 30.98%, 101.16%, 172.72%, 5.40%; 在 15—30 cm 土层, 秸秆还田处理的土壤总有机碳、微生物量碳含量和过氧化氢酶活性高于 R0 处理, 但 R1、R2、R3 之间无显著性差异, 纤维素酶活性随秸秆还田量增加而变大; 在 30—45 cm 土层, R2、R3 处理的土壤总有机碳、微生物量碳含量和纤维素酶活性显著高于其他处理, 各处理的过氧化氢酶活性并无显著差异。还田 2 年与还田 1 年相比, 各处理的土壤总有机碳、微生物量碳、纤维素酶活性均降低, 降低幅度分别为 8.59%~35.36%, 6.74%~29.16%, 6.18%~31.72%, 但过氧化氢酶活性呈增加趋势, 以 R3 增幅最大, 随土层加深, 提升幅度为 14.14%, 10.14%, 12.11%。说明在种还分离模式下可以高量秸秆还田, 并可有效改善土壤肥力。

关键词: 玉米秸秆; 种还分离; 微生物量碳; 纤维素酶活性; 过氧化氢酶活性

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0259-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.041

Effects of Maize Straw Returning on Soil Microbial Biomass Carbon and Enzyme Activities Under the Mode of Planting and Returning

LIU Long, LI Zhihong, ZHAO Xiaojun, CUI Tingting

(College of Resources and Environment of Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: In order to compare the effects of different straw returning rates on soil total organic carbon, microbial biomass carbon, cellulase activity and catalase activity at different soil depths, an in-situ experiment was conducted in a separate mode of planting and returning. The experiment was conducted with four levels of returning amount, i. e. 0% (R0), 0.44% (R1), 0.88% (R2) and 1.32% (R3), and three different returning depths, i. e. 0—15, 15—30, and 30—45 cm. The result showed that returning for 1 year, soil organic carbon content, microbial biomass carbon content, cellulase activity and catalase activity in 0—15 cm soil layer increased with the increasing amount of straw, and those under R3 treatment had the greatest significantce, which increased by 30.98%, 101.16%, 172.72%, and 5.40%, respectively. In 15—30 cm soil layer, the contents of total organic carbon, microbial biomass carbon and catalase activity in soil treated with straw were higher than those in R0, but there were no significant differences between R1, R2, R3, while cellulase activity increased with the amount of straw returning. In 30—45 cm soil layer, soil organic carbon content, microbial biomass carbon content and cellulase activity of R2 and R3 were significantly higher than those of other treatments, and no significant differences were in catalase activity of all treatment. Compared with returning for 1 year, the total organic carbon content, soil microbial biomass carbon and cellulase activity during returning for 2 years decreased, with the degree of 8.59%~35.36%, 6.74%~29.16%, and 6.18%~31.72%, but catalase activity increased, the largest increase occurred in R3 (with the increase of soil depth, the increase rate of 14.14%, 10.14%, and 12.11%). This study indicates that in the case of separate mode of planting and returning, the high amount of straw can be returned to the field, and also the soil fertility can be improved effectively.

收稿日期: 2017-03-09

资助项目: 吉林省科技厅重点基金项目(LFGC14213); 科技部丰粮工程项目(2012BAD04B02)

第一作者: 刘龙(1989—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机培肥研究。E-mail: yuluogod@163.com

通信作者: 李志洪(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤培肥、土壤—作物养分高效利用、农业信息技术与精准农业研究。E-mail: lizhihong21@163.com

Keywords: maize straw; separate mode of planting and returning; microbial biomass carbon; cellulase activity; catalase activity

秸秆含有丰富的有机碳和大量的氮、磷、钾等矿物质营养元素,是营养物质和能量的载体^[1]。秸秆还田是作物秸秆综合利用的方法之一,可有效培肥土壤,增加土壤养分,同时减少秸秆焚烧对大气环境造成的污染,是发展可持续绿色农业经济的高效途径^[2-3]。已有研究表明秸秆为微生物提供碳源,激发了土壤微生物生长繁殖^[4-5],提高了土壤微生物量碳^[6]和土壤酶活性^[7]。但现行的秸秆还田方式多为地表覆盖和粉碎浅施,Tang 等^[8]在华南黏壤土区进行的研究表明,冬季秸秆覆盖增加了土壤中酶活性和微生物群落;Dikg-watlhe 等^[9]在华北平原潮土区的研究表明,免耕、旋耕和翻耕秸秆还田后均增加土壤有机碳和全氮含量,而且免耕秸秆覆盖效果最好。而东北地区温度低,还田秸秆腐解慢^[7],不合时宜的还田方式在耕作中易造成负面影响,如还田部位浅、剂量小且不均匀,土壤微生物(即参与秸秆转化的微生物)与作物幼苗争夺养分^[10]以及土壤跑墒漏风、影响作物出苗、增加病虫害等^[2],这是传统的栽培耕作与秸秆还田模式不能相适应所致。本文提出的玉米种植与秸秆还田分离开来的栽培耕作方式,即“种还分离”微区轮作,既能实现全量秸秆还田,又避免对玉米生长带来不利影响。

种还分离将 3 条均匀田垄分为玉米种植行(40 cm 宽种 2 行玉米)和休闲行(140 cm 宽),休闲行中间 100 cm 宽用于秸秆还田,玉米平均密度保持 6 万株/hm²(与均匀田垄密度相同)^[11]。种植行与休闲行年际间轮作,在玉米种植前对休闲行适当深翻加深耕层。深层秸秆还田对于恢复土壤肥力、加深耕层具有重要的实践意义。而休闲行不仅为玉米生长创造了边行效应,又为秸秆高量还田提供了空间。种还分离方式下还田区秸秆全量是常规均匀还田的 2 倍,必然引起土壤生物学性质的变化。虽然已有研究关注还田深度、还田量、耕作措施等^[12-14]对土壤生物学性质的影响,但也有研究表明不同的耕作和秸秆还田方式对土壤的作用结果有区域性的差异^[15-17],而在东北地区高量秸秆还田对深层土壤的影响仍鲜有报道。因此本文模拟“种还分离”,通过尼龙袋法进行田间不同深度秸秆还田连续腐解两年,研究不同量的秸秆还田对土壤微生物量碳及酶活性的影响作用,以期种还分离的应用和推广提供必要的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2015 年在吉林省四平市梨树县泉眼沟中国农业大学实验站进行,供试土壤为黑土,前茬作物

为玉米(郑单 958),施用 NPK 复合肥(N 200 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 80 kg/hm²),土壤基本理化性质见表 1 所示。试验所用秸秆为上季玉米秸秆,粉碎至 1~5 cm 大小,秸秆基本理化性质为:有机碳含量 437.62 g/kg,全氮含量 8.29 g/kg,全磷含量 1.18 g/kg,全钾含量 12.22 g/kg。

表 1 供试土壤基本理化性质

还田 深度	pH	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
S1	5.52	128.3	61.6	172.9	24.9
S2	5.95	82.6	20.7	108.7	16.3
S3	6.54	58.3	13.2	71.8	12.5

1.2 试验设计

采用尼龙袋田间培养的方法,秸秆添加比例以田间单位面积秸秆产量(10 000 kg/hm²)还到耕层同样单位面积的土壤中为常规全量还田,秸秆与土壤重量比为 0.44%。试验于 2015 年玉米播种后进行,设置秸秆还田量 4 个水平,未还田 0%(R0)、常规全量还田 0.44%(R1)、种还分离全量还田 0.88%(R2)和常规还田 3 倍量 1.32%(R3);设置 3 个还田深度(0—15 cm(S1),15—30 cm(S2),30—45 cm(S3)),以不同秸秆还田量和不同深度设置交叉处理,共计 12 个处理,每个处理重复 3 次,每个处理填装对应层土壤 4 kg,所用秸秆均以尿素调节碳氮比为 25:1,秸秆与土壤充分混合,将尼龙袋填埋于休闲行相应原土层,并于 2015 年、2016 年收获玉米时采集尼龙网袋中部分土样,并分别记为还田一年和还田二年,用于试验测试。

1.3 测试项目与方法

将所取土样过 2 mm 筛,除去秸秆和其他可见杂质,分两部分保存,一部分置于 4 ℃ 保存用于土壤微生物量,另一部分风干过筛用于测定土壤养分。土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效钾含量采用乙酸铵提取法测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠法测定;土壤 pH 采用 pH S-3C 型 pH 计测定;土壤总有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定^[18];酶活性参照关松荫^[19]的方法测定,过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,以单位土重所消耗的高锰酸钾(0.02 mol/L)的毫升数表示其活性;纤维素酶活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定(葡萄糖 mg/g, 37 ℃, 72 h);微生物量 C(MBC)含量采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 提取法^[20]测定,提取液中碳的采用重铬酸钾氧化法测定。土壤微生物生物量碳的计算采用 $B_C = E_C / K_C$ 。式中: E_C 为熏蒸与未熏蒸对照土壤浸提液有机碳差值; K_C 为转换系数,取值 0.38。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 及 SPSS 21.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤总有机碳的影响

秸秆还田对土壤总有机碳含量的影响见图 1。不同秸秆还田量处理在各时期对土壤总有机碳含量的影响均表现为 $S1>S2>S3$;各层施用秸秆的处理(R1、R2、R3)均高于 R0,且随着秸秆还田量的增加土壤有机碳含量相应增加。S1 土层,第一年 R1、R2 和 R3 的总有机碳含量较 R0 分别增加了 1.38,2.83,4.42 g/kg,其中 R2、R3 与 R0 差异显著,增幅达到 19.82%和 30.97%;第二年与第一年相比,各处理总有机碳含量分别降低了 2.08,2.56,1.63,1.61 g/kg。S2 土层,第一年 R1、R2 和 R3 与 R0 相比,总有机碳含量分别提高了 22.81%,26.02%和 26.49%,秸秆还田处理之间差异不显著,但与 R0 分别差异显著;第二年与第一年相比,各处理有机碳含量分别降低了 1.40,2.11,2.36,2.25 g/kg。S3 土层,第一年 R1、R2 和 R3 的总有机碳含量分别提升了 8.26%,65.08%和 65.88%,R2 和 R3 提升幅度显著,R1 与 R0 之间差异不显著;第二年与第一年相比,各处理的总有机碳含量分别减少了 1.89,1.57,2.38,2.07 g/kg。还田两年时,不同还田量处理总有机碳含量均较第一年对应含量有所下降,其中 S2、S3 土层降幅更明显,但较高量秸秆还田(R2、R3)处理总有机碳含量均高于第一年 R0。

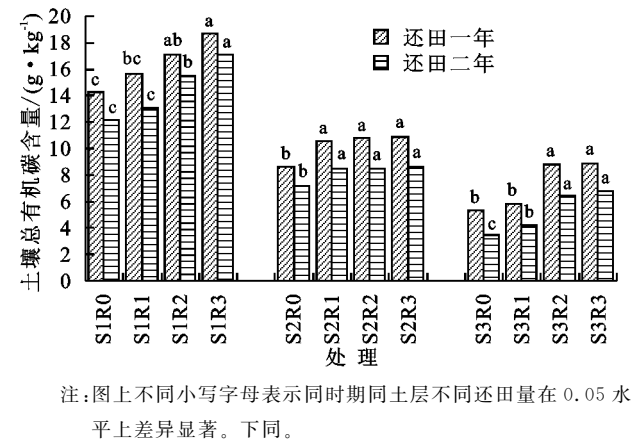


图 1 不同处理两年土壤总有机碳含量变化

2.2 秸秆还田对土壤微生物量碳的影响

秸秆还田对土壤微生物量碳含量的影响见图 2。两个时期不同秸秆还田量的微生物量碳含量均表现为 $S1>S2>S3$;在各层施用秸秆还田的处理(R1、R2、R3)均高于 R0。在第一年 S1 土层,随着秸秆还田量的增加,土壤微生物量碳含量增加,与 R0 相比,R1、R2 和 R3 分别增加了 32.13%,68.36%和 101.16%,且各处

理之间差异显著;S2 土层,R1、R2 和 R3 分别比 R0 增加了 66.13%,93.57%和 72.64%,秸秆还田处理与未还田处理差异显著,但不同秸秆还田量处理之间差异不显著;S3 土层,相较于 R0,R1、R2 和 R3 分别增加了 76.06%,358.89%和 271.97%,且各处理之间差异显著,以 R2 处理的微生物量碳增幅最大。第二年, R2、R3 高量还田处理在各土层的微生物量碳含量均显著高于其他处理,且相较于第一年相应土层 R0 的微生物量碳含量,R2、R3 处理的增幅效果更加明显,分别达 42.71%~207.52%,41.37%~246.87%。

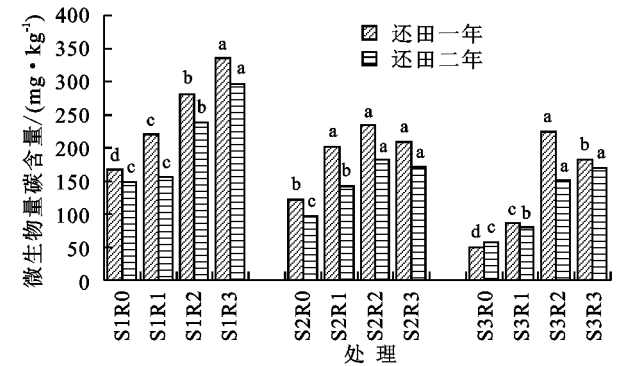


图 2 不同处理两年土壤微生物量碳含量变化

2.3 秸秆还田对土壤纤维素酶活性的影响

从图 3 可以看出,在两个时期不同秸秆还田量处理在各土层均表现为 $R3>R2>R1>R0$ 。在第一年 S1 土层,R3 与其他处理差异显著;在 S2 土层,R3 与 R1、R0 差异显著,但与 R2 差异不显著;在 S3 土层,秸秆还田处理与未还田处理差异显著,但不同秸秆还田量之间差异不显著。第二年,同土层纤维素酶活性变化趋势与第一年相符,但各处理纤维素酶活性较第一年有所降低,在 S1 土层各处理分别降低 31.72%,7.72%,22.35%,14.86%,而在 S2、S3 土层各处理变化幅度较小。

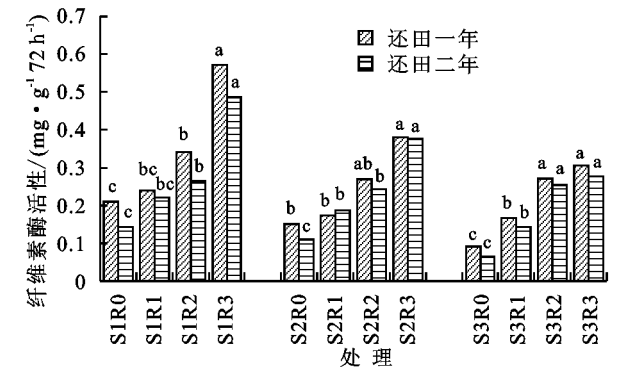


图 3 不同处理两年土壤纤维素酶活性变化

2.4 秸秆还田对土壤过氧化氢酶活性的影响

从表 2 可以看出,两个时期不同秸秆还田量处理的过氧化氢酶活性均随土层深度的增加呈上升趋势。在第一年 S1 土层,R1、R2、R3 与 R0 处理之间差异显著,分别增加了 4.38%,6.07%,5.40%;但在 S2、S3 土层时,各处理之间差异不显著。在第二年,各处理对应过氧化氢

酶活性均有所增加,以 R3 处理的增势较大,在 S1、S2、S3 土层分别增加 14.14%,10.14%,12.11%。

表 2 不同处理两年土壤过氧化氢酶活性

单位:0.02 mol/L KMnO₄ mL/g

还田 时间	还田 深度	R0	R1	R2	R3
还田一年	S1	1.60±0.019b	1.67±0.011a	1.70±0.025a	1.69±0.009a
	S2	1.67±0.024b	1.730.045ab	1.74±0.045a	1.79±0.036a
	S3	1.78±0.003a	1.80±0.012a	1.80±0.040a	1.80±0.037a
还田二年	S1	1.61±0.002c	1.77±0.025b	1.87±0.017a	1.93±0.032a
	S2	1.68±0.043c	1.84±0.021b	1.84±0.021b	1.97±0.037a
	S3	1.75±0.057b	1.85±0.014ab1	1.87±0.085ab2	2.02±0.046a

注:表中同行数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

本研究表明在种还分离模式下,还田区土壤总有机碳含量随秸秆还田量的增加而增加,这与矫丽娜^[11]、董珊珊等^[21]的研究结果相符。在 S1 和 S3 土层,以 R2、R3 还田量下土壤有机碳含量提高显著。秸秆作为外来碳源,与土壤颗粒接触均匀,作物秸秆更易腐解转化为土壤有机碳组分,有利于土壤团聚体的形成,增加土壤对有机碳的固持效果^[22]。在 S2 土层,秸秆还田虽然增加了土壤中有机碳含量,但有机碳含量并没有随加入秸秆量的增大而提高,这可能是由于过量的秸秆导致深层土壤微生物呼吸矿化增加^[23],转化固碳减少所致。另外,同一还田量处理的土壤有机碳含量均随土层的加深而减少,这与张鹏等^[24]的研究结果相符,说明种还分离模式提供的高量秸秆还田(R2 处理)为提高深层土壤肥力和增加耕作层厚度提供了适宜的有机碳源。

对比两年不同秸秆还田量处理的土壤有机碳含量发现,各层土壤有机碳含量均随还田时间的增加而减少。Tang 等^[25]和 Brahim 等^[26]认为农田开垦后土壤有机质含量逐年降低,有机碳库呈亏损状态。张孝存等^[27]认为人类活动和生态环境条件变化使土壤团聚体破碎,导致土壤有机质物理保护层被破坏,表层土壤有机质充分暴露在空气中;微生物活动加剧,土壤呼吸作用加强,土壤中有机物质分解速率增强,土壤有机碳的矿化速率明显增大,而补充的有机物数量有限,入不敷出是黑土土壤有机质含量降低的主因。因而每年向土壤中输入适量有机物料及其腐解物质,以维持土壤碳库的循环。而种还分离模式为还田区提供高量秸秆,在还田区适当加深耕层,既有利于当季秸秆腐解转化,补充耕层肥力,扩大耕层厚度,又可为下季作物提供可以利用的有机物质。

土壤微生物参与养分循环转化的各个过程,秸秆还田及有机肥料的投入都能显著提高土壤耕层微生物数量^[5]。微生物量碳用于表征微生物数量,是评价土壤微

生物参与土壤碳转化能力的重要指标^[28]。陈尚洪等^[29]通过 4 年 7 季作物研究发现,秸秆还田使土壤活性碳、微生物量碳分别提高 4.33%~52.88%和 8.69%~86.62%。本试验研究显示,秸秆还田 1 年时,S1 土层的土壤微生物量碳随秸秆还田量的增加而增加,且相同秸秆还田量处理的土壤微生物量碳均随土层深度的增加而减少。秸秆的施入,为土壤微生物提供了丰富的矿质养分和有机碳^[30],促进微生物活动,刺激微生物生长繁殖^[4],进而增加土壤微生物量碳含量。而在深层土壤(S2、S3)中,R3 的土壤微生物量碳并未随秸秆还田量的提高而增加,与同层有机碳含量变化情况相符,这可能是过量秸秆腐解过程中微生物呼吸矿化作用增强^[26],消耗大量物质能量,不能有效提供更高通量的物质转化,抑制微生物数量增加。土壤酶活性可指示土壤质量的变化,能迅速响应短期的耕作和秸秆还田对土壤质量的影响^[7,31]。任万军等^[32]研究表明,各耕作方式下土壤纵剖面酶活性均表现为上层高于下层,且上层土壤中纤维素酶活性以秸秆还田处理高于无秸秆还田处理。本试验与其研究结果相符,且随秸秆还田量增加纤维素酶活性增大。矫丽娜等^[11]试验表明,土壤过氧化氢酶活性表现为秸秆还田处理高于对照,秸秆还田有助于提高土壤生物活性,这与本研究结果一致。说明在种还分离模式下,高量秸秆还田(R2)改善了土壤微环境,使微生物活性增加,增强物质转化,减少有机物质的亏缺^[33]。

4 结论

(1) 在种还分离模式下,还田一年时,在 S1 土层,土壤总有机碳、微生物量碳、纤维素酶活性和过氧化氢酶活性均随秸秆还田量的增加而提高,且 R3 处理提升效果最显著,分别达 30.98%,101.16%,172.72%和 5.40%;在 S2 土层,秸秆还田处理的土壤总有机碳、微生物量碳含量和过氧化氢酶活性高于 R0 处理,纤维素酶活性随秸秆还田量的增加而变大;在 S3 土层,R2、R3 处理的土壤总有机碳、微生物量碳含量和纤维素酶活性显著高于其他处理。说明秸秆还田提高了土壤碳源,种还分离模式下全量还田(R2)改善了还田区域土壤微环境,为下季作物耕种提供了有利条件。

(2) 还田二年与还田一年相比,各处理的土壤总有机碳、微生物量碳、纤维素酶活性均有所降低,降低幅度分别为 8.59%~35.36%,6.74%~29.16%,6.18%~31.72%;过氧化氢酶活性呈增加趋势,R3 增幅最大,随土层加深,提升幅度分别为 14.14%,10.14%,12.11%。

参考文献:

[1] Turmel M S, Speratti A, Baudran F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis [J]. Agricultural Systems, 2015, 134(3): 6-16.

- [2] 窦森,陈光,关松,等. 秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式研究[J]. 吉林农业大学学报,2016,37(5):1-8.
- [3] 崔新卫,张杨珠,吴金水,等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报,2014,45(6):1527-1532.
- [4] Zhang B, He H, Ding X L, et al. Soil microbial community dynamics over a maize (*Zea mays* L.) growing season under conventional-and no-tillage practices in a rainfed agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2012,124(4):153-160.
- [5] 慕平,张恩和,王汉宁,等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(5):81-85.
- [6] Nele V, Fabian K, Ken D S, et al. Soil quality as affected by tillage-residue management in a wheat-maize irrigated bed planting system[J]. Plant and Soil, 2011, 340(1):453-466.
- [7] 隋鹏翔,张心昱,温学发,等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(8):2038-2045.
- [8] Tang H M, Xiao X P, Tang W G, et al. Effects of winter cover crops residue returning on soil enzyme activities and soil microbial community in double-cropping rice fields[J]. Plos One, 2014,9(6):e100443.
- [9] Dikgwatlhe S B, Chen Z D, Lal R, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2014,144(4):110-118.
- [10] 黄毅,邹洪涛,闫洪亮,等. 玉米秸秆深还剂量对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究,2013,20(4):61-63.
- [11] 矫丽娜. 深层秸秆还田对土壤生物化学性质及玉米产量的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
- [12] 李纯燕,杨恒山,萨如拉,等. 不同耕作措施下秸秆还田对土壤速效养分和微生物量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):197-201.
- [13] 李晓莎,武宁,刘玲,等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1765-1771.
- [14] 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.
- [15] Liang A Z, Zhang X P, Fang H J, et al. Short-term effects of tillage practices on organic carbon in clay loam soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5):619-623.
- [16] Dong W, Hu C, Chen S, et al. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat-corn double-cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009,83(1):27-37.
- [17] 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 and Tillage Research, 2015,152(9):8-16.
- [18] 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.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:120-276.
- [20] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006:54-78.
- [21] 董珊珊,窦森,林琛茗,等. 玉米秸秆在土壤中的分解速率及其对腐殖质组成的影响[J]. 吉林农业大学学报,2016,38(5):579-586.
- [22] 李硕,李有兵,王淑娟,等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1215-1222.
- [23] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. Pedosphere, 2011, 21(6):813-820.
- [24] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2518-2525.
- [25] Tang H J, Qiu J J, Li C S, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model[J]. Geoderma, 2006, 134(1/2):200-206.
- [26] Brahim N, Blavet D, Gallali T, et al. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2011,8(2):305-320.
- [27] 张孝存,郑粉莉,王彬,等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J]. 陕西师范大学学报,2011,39(5):90-95.
- [28] Fu Q L, Liu C, Ding N F, et al. Soil microbial communities and enzyme activities in a reclaimed coastal soil chronosequence under rice-barley cropping [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(7): 1134-1144.
- [29] 陈尚洪,朱钟麟,刘定辉,等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):806-809.
- [30] 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.
- [31] Karaca A, Cetin S C, Turgay O C, et al. Soli enzymes as indication of soil quality[J]. Soil Enzymology, 2011, 22:119-148.
- [32] 任万军,黄云,吴锦秀,等. 免耕与秸秆高留茬还田对抛秧稻田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(11):2913-2918.
- [33] Qin S P, He X H, Hu C S, et al. Responses of soil chemical and microbial indicators to conservational tillage versus traditional tillage in the North China Plain[J]. European Journal of Soil Biology, 2010,46(3/4):243-247.