

周育智,陈孝杨,王芳,等.安徽省淮南市采煤沉陷生态修复区表层土壤有机碳分布[J].江苏农业科学,2016,44(9):439-442.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.123

# 安徽省淮南市采煤沉陷生态修复区 表层土壤有机碳分布

周育智,陈孝杨,王芳,陈敏,刘本乐

(安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南 232001)

**摘要:**以采煤沉陷生态修复区为研究对象,分析了不同煤矸石充填复垦区表层土壤有机碳的分布特征,及其与土壤理化性质的相关性。结果表明,各生态修复区表层土壤有机碳含量由大到小依次为大通矿生态修复区>潘一矿生态修复区>新庄孜矿生态修复区>创大生态园修复区;不同覆土厚度复垦土壤表层有机碳含量为 5.56~9.31 g/kg,覆土较薄的地块(0~20 cm)有机碳含量最高,为 9.31 g/kg;土壤微生物生物量碳含量与有机碳含量呈极显著正相关,且对工程措施(煤矸石充填复垦)响应较有机碳更加剧烈,可以将微生物生物量碳作为土壤有机碳库动态变化的敏感性指标。

**关键词:**煤矸石充填复垦区;覆土厚度;植被类型;土壤有机碳;微生物生物量碳

**中图分类号:** S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0439-04

土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)是土壤的重要组成部分,也是土壤质量的核心,其质量和数量影响土壤物理特征、化学特征、生物特征及其过程,并在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展和全球碳平衡等方面都有重要作用和意义<sup>[1]</sup>。土壤碳库是全球第 3 大碳库,仅次于海洋和地质库,其碳库约有 1 550 Pg 有机碳和 750 Pg 无机碳(0~1 m 土层),约是大气碳库(760 Pg)的 3.3 倍、植被碳库(560 Pg)的 4.5 倍<sup>[2]</sup>。研究发现,SOC 对土壤结构、土壤肥水保持、土壤碳收支以及全球气候变化具有重要意义<sup>[3]</sup>。目前已经有大量学者对土壤复垦工作进行了研究,如刘会平等对不同覆土厚度

煤矸石充填复垦区的土壤生产力分析发现,以煤矸石为基质,上面覆盖不同厚度表土的土壤生产力差异较大<sup>[4]</sup>;Bai 等研究表明,土壤水分和土壤密度是影响 SOC 的 2 个重要因素<sup>[5]</sup>。安徽省淮南市是华东地区重要的煤炭基地。随着城市经济的快速发展和对能源的巨大需求,必然导致煤炭开采量不断加大,同时煤炭开采伴生物煤矸石的量也会不断增加。但由于煤矸石利用率不高,必然会导致煤矸石的随意堆放,这不仅会占用大量土地,也会给当地造成严重生态环境问题。因此,为了改善当前矿区所面临的生态环境问题,亟需解决煤矸石随意堆放和恢复采煤沉陷区的土地利用价值等一系列重大问题。在采煤沉陷区,煤矸石充填复垦工作就很好地解决了煤矸石随意堆放的问题,同时也适当恢复了采煤沉陷区的土地利用价值。目前国内外对采煤沉陷区的充填复垦治理以及充填复垦后土地性状的研究不断更新<sup>[6-7]</sup>,对其他类型土壤有机碳动态变化的研究也相当多,但对开采塌陷区重构 SOC 含量、分布特征以及在一定区域尺度内对温室效应影响的研究却很少。本研究以煤矸石充填复垦区为对象,分析不

收稿日期:2016-03-16

基金项目:国家自然科学基金(编号:51274013、41572333)。

作者简介:周育智(1990—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为矿山生态环境修复与土地复垦。E-mail:1602650045@qq.com。

通信作者:陈孝杨,博士,副教授,研究方向为矿山环境修复与土地复垦。E-mail:chenxy@aust.edu.cn。

[3]王建林,太华杰.影响中国棉花产量丰歉的气象指标[J].应用气象学报,1995(增刊1):96-101.

[4]王建林,太华杰.棉花年景评价方法[J].气象,1997,23(4):24-27.

[5]孙家明,黄朝迎.中国农业气候年景的评估及预测[J].应用气象学报,2005,16(增刊1):111-115.

[6]李翠金,马巧英.长江中下游地区旱涝气候年景和评定方法的研究[J].灾害学,1998,13(1):72-77.

[7]石磊,王胜,盛绍学.近50年安徽省气候年景评估方法[J].地理研究,2012,31(9):1580-1588.

[8]韩蓓.HP滤波法及其在地区潜在经济增长率测算中的应用[J].经济师,2009(1):28-29.

[9]高苹,张佩,谢小萍,等.基于海温和环流特征量的江苏省小麦适播期预测[J].气象,2012,38(12):1572-1578.

[10]杨晓光,刘志娟,陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅰ.气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量的可能影响分析[J].中国农业科学,2010,43(2):329-336.

[11]李克南,杨晓光,刘志娟,等.全球气候变化对中国种植制度可能影响分析Ⅲ.中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响[J].中国农业科学,2010,43(10):2088-2097.

[12]翟盛茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(9):1-10.

[13]李麦村,陈烈庭,林学椿.海温异常影响长期天气过程研究的进展[J].大气科学,1979,3(3):247-255.

[14]汪铎,黄懿琉,张镔.试用环流特征因子作丰歉年景预报[J].气象,1982(4):18-19.

[15]朱盛明,曲学实.数值预报产品统计解释技术的进展[M].北京:气象出版社,1988:112-116.

同覆土厚度(即以煤矸石为基质,上覆表土的厚度)、植被类型、复垦时间对 SOC 含量及其分布的影响,以期为提高煤矸石充填复垦土地的碳汇功能及以后的土壤复垦工作提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于淮南市主要煤矸石充填复垦区[创大生态园修复区(A)、大通矿生态修复区(B)、新庄孜矿生态修复区(C)、潘一矿生态修复区(D)],地处淮河以南地区,是暖温带和亚热带的过渡地带,兼具南北气候特点,夏季高温多雨,冬

季寒冷干燥,年平均气温在 16.6℃左右,年平均降水量 893.4 mm,季节性降水分布不均,降水主要集中在 6—8 月,雨热同季。修复区的植被类型存在较大差异,创大生态园修复区以草地为主,潘一矿生态修复区以乔木林为主,大通矿生态修复区、新庄孜矿生态修复区以灌木林为主。同时重构土地的覆土厚度也存在较大差异,主要表现在创大生态园修复区的覆土厚度分别为 20~40、40~80、80~100 cm;大通矿生态修复区的覆土厚度基本在 13 cm 左右;新庄孜矿生态修复区的覆土厚度分别为 40~80、80~100 cm;潘一矿生态修复区的覆土厚度分别为 0~20、20~40、40~80 cm。不同生态修复区土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 不同生态修复区土壤基本理化性质

研究区	容重		含水量		pH 值		有机碳含量	
	均值(g/cm <sup>3</sup> )	变异系数(%)	均值(%)	变异系数(%)	均值	变异系数(%)	均值(g/kg)	变异系数(%)
A	1.81	6.74	20.02	9.59	7.94	1.56	3.17	49.78
B	1.91	4.58	16.75	17.72	7.82	1.75	10.02	50.84
C	2.05	3.23	16.32	10.17	8.07	1.58	6.49	27.02
D	1.80	10.54	16.73	21.39	7.93	2.14	9.27	37.35

1.2 研究区的确定与土壤采集

为了全面了解煤矸石充填复垦区 SOC 分布特征及其与土壤理化性质的关系,分别选取不同覆土厚度和植被类型的地块作为研究对象。通过实际调查和现场勘测,在每块研究区布置具有代表性的 6 个采样区域,然后按照随机性原则在每个采样区域布置 3 个采样点。采样前去除可见地表植被、枯枝落叶、石子等杂物,每个采样点分别收集 3 个土样组成混合土样。一部分土样自然烘干后,过 0.2 mm 筛,用于有机碳测定;其他土样在 4℃下保存,用于土壤微生物生物量碳(soil microbial biomass carbon,SMBC)测定。

1.3 测定方法

采用环刀取样法测定土壤容重和质量含水量;采用酸度计法测定土壤 pH 值(水土比 2.5:1);土壤颗粒组成分级标准采用中国制的分级标准;土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾容量法-外加热法<sup>[8]</sup>;土壤微生物生物量碳测定采用氯仿熏蒸浸提法。

1.4 数据处理与统计分析

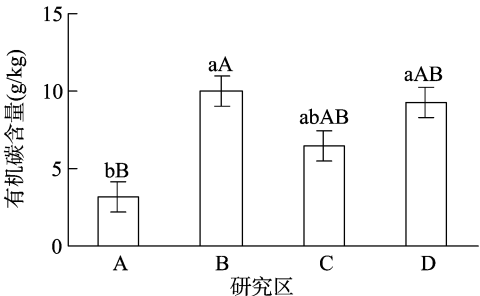
运用 SPSS 18.0 软件和 Excel 软件进行统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 SOC、SMBC、溶解性有机碳(DOC)含量的分布特征

2.1.1 不同生态修复区 SOC、SMBC、DOC 含量的分布特征

生态修复区 SOC 含量与覆土厚度、复垦时间以及植被类型有关。从图 1 可以看出,各生态修复区 SOC 含量由高到低依次为大通矿生态修复区>潘一矿生态修复区>新庄孜矿生态修复区>创大生态园修复区。大通矿生态修复区 SOC 含量极显著高于创大生态园修复区( $P<0.01$ ),潘一矿生态修复区 SOC 含量显著高于创大生态园修复区( $P<0.05$ );其他修复区 SOC 含量之间的差异不显著。由图 2 可知,不同煤矸石复垦区 MBC、DOC 含量变化基本一致,表现为大通矿生态修复区的 MBC、DOC 含量最高,分别是 84.01、62.57 mg/kg。从复垦时间来看,大通矿生态修复区复垦时间最长,说明在一定时间内,随着复垦年限增加 SOC 含量不断增加。



不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著;不同大写字母表示在 0.01 水平上差异极显著。下图同图 1 生态修复区 SOC 含量分布特征

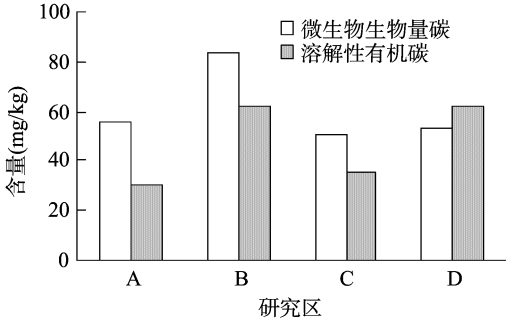


图 2 生态修复区 SMBC、DOC 含量分布特征

2.1.2 不同覆土厚度下 SOC、SMBC 含量的分布特征 由图 3 可见,不同覆土厚度复垦土壤平均有机碳含量为 5.56~9.31 g/kg,覆土较薄的地块(0~20 cm)有机碳含量最高,为 9.31 g/kg,分别比覆土 20~40、40~80、80~100 cm 的地块高 49.20%、67.45%、53.88%,这可能是由于植被类型对复垦区有机碳的影响大于覆土厚度(覆土厚度在 13cm 左右的大通矿生态修复区的有机碳含量较高)的影响。覆土 0~20 cm 的地块 SOC 含量显著高于覆土 40~80、80~100 cm 地块( $P>0.05$ ),而其他覆土厚度处理 SOC 含量之间差异不显著。由图 4 可见,不同覆土厚度下 SMBC 含量与 SOC 含量的变化规律基本一致,但不同覆土厚度下 SMBC 含量之间差异不显著。

综合比较不同覆土厚度下的 SOC 含量,可以发现覆土 0 ~ 20 cm 的地块 SOC 含量最高,但这并不能说明覆土较薄的地块有机碳含量较高,因为覆土厚度对表土有机碳含量的影响部分被植被类型所覆盖。

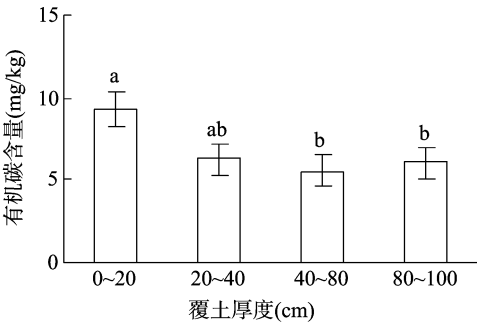


图3 不同覆土厚度下 SOC 含量分布特征

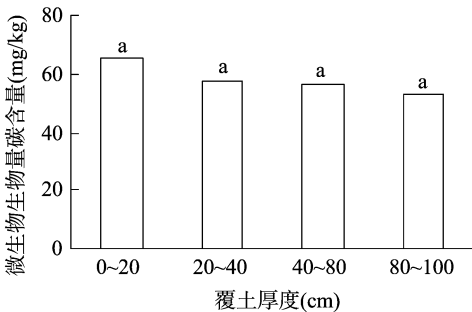


图4 不同覆土厚度下 SMBC 含量的分布特征

由表 2 可见,大通矿生态修复区(灌木林)SOC 含量最高,其次是潘一矿生态修复区(乔木林),创大生态园修复区(草地)最低,这与 Wiesmeier 等的研究结果<sup>[9]</sup>一致,即林地的 SOC 含量高于草地。创大生态园修复区(草地)有机碳含量偏低,也可能与修复过程中所覆表土来源有关。在各生态修复区,SOC 含量均随覆土厚度的增加而增加,而 SMBC 含量变化的规律性不强,原因可能是煤矸石在氧化过程中放出大

表 2 不同生态修复区 SOC、SMBC 含量的分布特征

研究区	植被类型	覆土厚度 (cm)	SOC 含量 (g/kg)	SMBC 含量 (mg/kg)	黏粒含量 (%)
A	草地	0~20			
		20~40	2.31 ± 1.44	38.77 ± 7.62	24.83 ± 7.62
		40~80	3.55 ± 2.08	65.67 ± 10.08	24.28 ± 2.75
		80~100	3.66 ± 0.63	63.32 ± 38.05	26.09 ± 3.46
B	灌木林	0~20	10.02 ± 5.09	84.00 ± 22.71	26.06 ± 2.00
		20~40			
		40~80			
		80~100			
C	灌木林	0~20			
		20~40			
		40~80	5.36 ± 1.32	57.25 ± 31.08	23.93 ± 4.60
		80~100	7.63 ± 1.37	43.69 ± 14.04	25.18 ± 4.89
D	乔木林	0~20	7.90 ± 3.17	45.98 ± 20.36	28.12 ± 2.06
		20~40	10.17 ± 4.24	63.06 ± 37.89	31.04 ± 4.38
		40~80	10.20 ± 1.01	45.19 ± 8.23	29.98 ± 2.83
		80~100			

量热量,加快靠近填充层(煤矸石)土壤中有有机碳的矿化,进而表现出 SOC 易受覆土厚度的影响。

2.2 SOC 含量与土壤理化性质的相关性分析

2.2.1 不同植被类型下 SOC 含量与土壤理化性质的相关性分析 由表 3 可知,在乔木林,SOC 含量与土壤容重、pH 值、砂粒含量呈负相关,与土壤含水量呈极显著负相关。对于灌木林,SOC 含量与土壤容重、pH 值、砂粒含量呈负相关,而与土壤含水量呈正相关;新庄孜矿生态修复区 SOC 含量与土壤含水量极显著相关,相关系数为 0.566,但大通矿生态修复区 SOC 含量与土壤含水量相关性不显著;大通矿生态修复区 SOC 含量与土壤砂粒含量极显著相关,相关系数为 -0.721,但新庄孜矿生态修复区 SOC 含量与土壤砂粒含量相关性不显著。对于草地,SOC 含量与土壤容重、土壤含水量、pH 值均呈负相关,其中与土壤含水量呈极显著负相关。从表 3 可以看出,不同植被类型下 SOC 含量与 pH 值之间均存在负相关性,但相关性不显著 ( $P > 0.05$ ),这与曹小玉等的研究结论<sup>[10]</sup>基本一致。综上所述,不同植被类型下,SOC 含量与土壤容重、pH 值均存在负相关性,但与其他土壤理化性质的相关性存在差异。

表 3 不同植被类型下 SOC 含量与土壤理化性质的相关性

研究区	植被类型	SOC 含量 (g/kg)	相关系数			
			土壤容重	土壤含水量	pH 值	砂粒含量
A	草地	3.17	-0.333	-0.755 **	-0.101	0.102
B	灌木林	10.02	-0.257 *	0.170	-0.064	-0.721 **
C	灌木林	6.49	-0.080	0.566 **	-0.127	-0.005
D	乔木林	9.27	-0.147	-0.489 **	-0.256	-0.279

注:“\*”“\*\*”分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。下表同。

2.2.2 不同覆土厚度下 SOC 含量与土壤理化性质的相关性分析 如表 4 所示,不同覆土厚度下 SOC 含量均与土壤砂粒含量存在极显著相关性;覆土 0 ~ 20 cm 的地块 SOC 含量与土壤砂粒含量存在极显著负相关,而与土壤容重、土壤含水量、pH 值的相关性不显著;覆土 20 ~ 40 cm 的地块 SOC 含量与土壤含水量、砂粒含量存在极显著相关性;覆土 40 ~ 80 cm 的地块 SOC 含量与土壤容重、pH 值存在极显著负相关性,与土壤含水量的相关性不显著;覆土 80 ~ 100 cm 的地块 SOC 含量与土壤容重存在极显著负相关性,与土壤含水量和砂粒含量存在极显著正相关性。总之,不同覆土厚度下,SOC 含量与砂粒含量均存在极显著相关性,但与其他土壤理化性质的相关性存在差异。

表 4 不同覆土厚度下 SOC 含量与土壤理化性质的相关性

覆土厚度 (cm)	SOC 含量 (g/kg)	相关系数			
		土壤容重	土壤含水量	pH 值	砂粒含量
0~20	9.31	0.074	0.240	-0.241	-0.524 **
20~40	6.24	0.164	-0.775 **	0.377	0.746 **
40~80	5.56	-0.598 **	-0.221	-0.339 **	0.568 **
80~100	6.05	-0.520 **	0.637 **	0.095	0.739 **

2.3 SOC 含量和 SMBC 含量的关系

SMBC 是指土壤中体积小于 5 ~ 10  $\mu\text{m}^3$  的微生物总量(包括活的和死的细菌、真菌、小型动物等),可调节土壤所有

组分有机碳的转化。SMBC 是 SOC 中最活跃和最容易变化的部分, 周转期一般小于 5 年, 因此可以将其作为衡量 SOC 含量变化的重要敏感指标。从图 5 中可以看出, SMBC 含量与 SOC 含量呈显著线性正相关, 因此可以通过观察 SMBC 的动态变化来判断土壤总有机碳含量的变化。

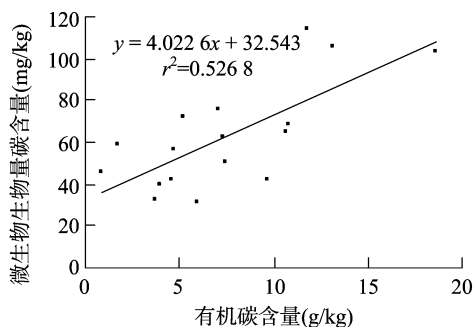


图5 SOC 含量和 SMBC 含量的关系

### 3 结论与讨论

#### 3.1 生态修复区表层 SOC 含量的分布特征

土壤是一种不均匀的固体介质, 具有高度的异质性, SOC 作为土壤中较为活跃的重要组成部分, 其在土壤中的分布也具有高度不均匀性<sup>[11]</sup>。异质性主要表现在不同植被类型、覆土厚度、成土母质下 SOC 含量的不均匀分布, 即异质性产生原因包括成土母质类型、降水分布、微地形因素、土壤动植物及微生物活动、植被类型、覆土厚度以及人为活动影响程度等<sup>[12-13]</sup>。本研究从复垦时间、覆土厚度、植被类型方面对土壤理化性质及其有机碳分布进行分析, 结果表明: 表层 SOC 含量由高到低顺序为大通矿生态修复区 > 潘一矿生态修复区 > 新庄孜矿生态修复区 > 创大生态园修复区, 且林地 SOC 含量高于草地。从不同覆土厚度考虑, SOC 含量为 5.56 ~ 9.31 g/kg, 覆土 0 ~ 20 cm 的地块 SOC 含量最高; 随着覆土厚度进一步增加, SOC 含量逐渐降低; 在覆土 40 ~ 80 cm 地块 SOC 含量降到最小值; 接着 SOC 含量又逐渐增加, 覆土 80 ~ 100 cm 的地块 SOC 含量达到 6.05 g/kg。

#### 3.2 生态修复区表层 SOC 含量分布的影响因子

容重是土壤物理性状的重要指标<sup>[14]</sup>, 它显著影响 SOC 含量, 研究发现土壤容重降低, SOC 含量增加<sup>[15]</sup>, 这与本研究中覆土 40 ~ 80、80 ~ 100 cm 地块的试验结果一致。研究区土壤容重均值偏高, 为 1.80 ~ 2.05 g/cm<sup>3</sup>。重构土壤容重增加最主要的原因是复垦过程中机械设备对土壤的压实作用, 使大孔隙减少, 土壤容重增加。土壤含水量也是影响土壤有机碳含量的一个重要因素, 本研究发现草地、灌木林、乔木林 SOC 含量均与土壤含水量显著相关。Hobley 等研究表明, 降水量与 SOC 含量呈正相关, 表层 SOC 主要受气候影响, 随着土壤深度增加, 气候的影响逐渐减小<sup>[16]</sup>。本研究中, pH 值的变异系数为 1.56 ~ 2.14, 属于小变异。本研究还发现, SOC 含量与土壤 pH 值呈负相关, 但 Yao 等却在对高尔夫草地的研究中发现 SOC 含量与土壤 pH 值呈正相关<sup>[17]</sup>, 这是由于在碱性土壤中溶解性酚类浓度较高, 降低了土壤中水解酶活性, 从而削弱了 DOC 降解, 促进碱性土壤中碳的积累。土壤微生物生物量碳与土壤有机碳之间存在显著的线性正相关性, 相

关系系数  $r = 0.726$ , 这与以往研究结果<sup>[17]</sup>一致, 因此为了弥补有机碳在反映土壤碳库变化时所表现的滞后性, 可以通过监测 SMBC 的动态变化来及时掌握土壤总碳库的动态变化。

本研究探讨了不同植被类型、覆土厚度对煤矸石充填复垦区表层土壤有机碳分布的影响, 但还需要进一步深入研究, 以期找到最优的覆土厚度和最适宜的植被类型, 以提高土壤肥力和增加复垦土壤碳固定。

#### 参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] Lal R. Soil Carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623 - 1627.
- [3] Sartori F, Lal R, Ebinger M H, et al. Potential soil Carbon sequestration and CO<sub>2</sub> offset by dedicated energy crops in the USA[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2006, 25(5): 441 - 472.
- [4] 刘会平, 严家平, 樊雯. 不同覆土厚度的煤矸石充填复垦区土壤生产力评价[J]. 能源环境保护, 2010, 24(1): 52 - 56.
- [5] Bai J, Xiao R, Zhang K, et al. Soil organic carbon as affected by land use in young and old reclaimed regions of a coastal estuary wetland, China[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(1): 57 - 64.
- [6] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276 - 280.
- [7] 李媛媛, 张怡康. 徐州采煤塌陷区复垦土壤的细菌群落多样性[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(9): 312 - 315.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] Wiesmeier M, Spoerlein P, Geuss U, et al. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth[J]. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2233 - 2245.
- [10] 曹小玉, 李际平, 张彩彩, 等. 不同龄组杉木林土壤有机碳与土壤理化性质的变化特征及其通径分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 200 - 205.
- [11] 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.
- [12] Gabarrón - Galeote M A, Trigalet S, van Wesemael B. Effect of land abandonment on soil organic carbon fractions along a Mediterranean precipitation gradient[J]. Geoderma, 2015, 249: 69 - 78.
- [13] 杨红飞, 穆少杰, 李建龙. 陆地生态系统土壤有机碳储量研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 10 - 12.
- [14] 孙成明, 曹军, 刘涛, 等. 稻麦周年地区机械深松对土壤特性及小麦产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(6): 76 - 77.
- [15] 闫俊华, 周传艳, 王安邦, 等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 273 - 278.
- [16] Hobley E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia[J]. Plant and Soil, 2015, 390(1/2): 111 - 127.
- [17] Yao H Y, Bowman D, Ruffy T, et al. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1425 - 1432.
- [18] 官会林, 郭云周, 张云峰, 等. 不同复种模式对云南植烟红壤根区有机碳和微生物量碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 133 - 138.