

华北地区土地利用类型对土壤呼吸、有机碳组分和水稳性团聚体的影响

王 芸¹, 赵鹏祥²

(1.河北广播电视大学 数字化学习资源中心, 石家庄 050080; 2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:土壤呼吸和土壤团聚体对土壤肥力、质量和土壤的可持续利用等具有重要作用。通过湿筛法得到华北地区不同土地利用类型土壤大团聚体($>2\text{ mm}$)、中间团聚体($0.25\sim 2\text{ mm}$)、微团聚体($53\text{ }\mu\text{m}\sim 0.25\text{ mm}$)以及粉+黏团聚体($<53\text{ }\mu\text{m}$)的质量分数和土壤呼吸速率。结果表明:不同土地利用类型土壤呼吸随着月份的增加呈先增加后降低趋势,在 7 月份最大,呈倒 V 字型变化规律,7 月以后,土壤呼吸急剧降低,其中在 1 月份土壤呼吸速率最小。不同土地利用类型对土壤呼吸具有明显的影响,土壤呼吸速率大小基本表现为次生林 $>$ 人工林 $>$ 灌木 $>$ 农田 $>$ 果园,其中,次生林和人工林显著高于其他土地利用类型($p<0.05$),灌木和农田差异不显著($p>0.05$),果园显著低于其他土地利用类型($p<0.05$)。不同土地利用类型对土壤总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)和轻组分有机碳(SLOC)影响较为明显,其大小基本表现为次生林 $>$ 人工林 $>$ 灌木 $>$ 农田 $>$ 果园。次生林和人工林以 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体为主,占粒径总组成的 20%以上;灌木以中间团聚体和粉+黏团聚体为主;而农田和果园则以粉+黏团聚体为主,约占粒径总组成的 40%。林地的开垦会导致大团聚体的破碎化,灌木及农田 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体含量较林地低,土壤结构趋于恶化;而农田闲置为果园后,则会促使粉+黏团聚体向粒径大的微团聚体及中间团聚体转化,使土壤结构趋于改善。灌木及农田土壤颗粒的 MWD(平均质量直径)和 GMD(几何平均直径)值均显著低于林地和灌木($p<0.05$),农田撂荒后,MWD 和 GMD 值均显著升高($p<0.05$),表明林地开垦后导致土壤团聚体的稳定性降低,而农田弃耕会增强团聚体的稳定性。土壤中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量、MWD、GMD 和土壤呼吸均与土壤 TOC、SLOC 和 POC 皆呈现显著正相关性($p<0.05$),其中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量、MWD、GMD 和土壤呼吸与 LFOC 和 POC 之间的相关关系达到极显著水平($p<0.01$),且相关系数较大,说明与土壤 TOC 相比,LFOC 和 POC 对土壤水稳性团聚体和稳定性的贡献更大,并且 LFOC 和 POC 对土壤呼吸的贡献更大。

关键词:华北地区;土地利用类型;土壤团聚体;土壤呼吸

中图分类号:

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0059-07

Effect of Land Use Types on Stability of Soil Aggregates, Soil Organic Carbon Fractions and Soil Respiration in Northern China

WANG Yun¹, ZHAO Pengxiang²

(1.Hebei Radio & TV University, Shijiazhuang, Hebei 050080, China;

2.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil aggregates and aggregates have the important effect on soil fertility, soil quality and the sustainable utilization of soil. In this paper, in order to study the effect of land use types on stability of soil aggregates and soil respiration in Northern China, we took soil samples from five land use types which are secondary forest, artificial forest, shrubland, farmland and orchard, then we got the proportion of large macroaggregates ($>2\text{ mm}$), small macroaggregates ($0.25\sim 2\text{ mm}$), microaggregates ($53\text{ }\mu\text{m}\sim 0.25\text{ mm}$) and silt+clay ($<53\text{ }\mu\text{m}$) by wet sieving method and measured soil respiration. The results showed that soil respiration increased at first and then decreased over the months, and got the peak in July, after July, soil respiration decreased sharply, soil respiration decreased in the order: secondary forest $>$ artificial forest $>$ shrubland $>$ farmland $>$ orchard, and there was no significant difference in soil respiration between farmland

收稿日期:2019-02-28

修回日期:2019-03-23

资助项目:国家林业局 948 项目“基于 LiDAR 系统的森林资源调查技术引进”(2014-4-27);河北省教育厅高等学校人文社会科学研究青年项目(SQ171077)

第一作者:王芸(1980—),女,河北定州人,博士,讲师,研究方向:3S 技术在资源环境中的应用。E-mail:Wang_yunn80@126.com

and orchard ($p > 0.05$); soil total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC) and light component organic carbon (SLOC) were significantly affected by different land use types, which decreased in the order: secondary forest > artificial forest > shrubland > farmland > orchard. Reclamation of woodland will lead to fragmentation of macroaggregates and deterioration of soil structure, respectively. Changing the sloping farmland to abandoned land, led to the conversion of soil fraction from silt + clay to large macroaggregates and small macroaggregates, and could improve the soil structure. We found the MWD and GWD in farmland were significantly lower than those in woodland ($p < 0.05$), while the MWD and GWD increased significantly ($p < 0.05$) after changing the sloping farmland to abandoned land, which indicated that reclamation of woodland could lead to the decrease of stability of soil aggregates. In addition, correlation and regressive analysis showed that > 0.25 mm WAS, MWD, GMD and soil respiration were significantly ($p < 0.01$) related to TOC, LFOC, and POC. More significant correlations between POC and > 0.25 mm WAS, MWD and GMD with greater coefficients were founded, suggesting that soil particulate organic C plays a more important role in maintaining soil aggregate stability and soil respiration.

Keywords: northern China; land use type; soil aggregates; soil respiration

人类在对自然资源进行不断的开发利用过程中产生了明显的环境问题,对于生态系统健康发展产生了不利影响,原有的气候生态被改变^[1-2],气温上升、冰川融化等问题日益突出,使得可持续发展受到了较大挑战。在 CO_2 排放量不断上升的情况下,局地气温呈现明显的上升趋势^[3-4],呈现了典型的气候变暖问题,这不仅导致冰川融化加剧,迫使海平面上升,最终导致温室效应的产生^[5],并带来了较大的影响,不仅直接影响植被生长发育,还影响动植物新陈代谢等。相关统计数据表明, CO_2 含量的增长速度保持在 0.4% 以上^[6-7],其中起着关键作用的是陆地碳循环,而作为重要的碳通量途径,土壤呼吸起着较大制约作用,并成为陆地最大碳源,即使其变化较小,但仍然能引起大气 CO_2 的较大变化^[8-9]。通过研究发现,在全球气温出现明显变化的情况下,土壤呼吸也出现了明显的响应,其反馈效果明显。大量的研究表明,在土地利用类型存在较大差异的情况下,其蒸腾作用也发生较大差异,土壤的湿度及温度也会存在较大不同,其有机质含量发生着变化,对于微生物活动产生不同的影响,进而也对根系生长产生制约,最终对土壤呼吸形成明显的制约效果,从而形成了较大的碳循环变化。通过相关数据分析得知,从 20 世纪 90 年代开始,随着土地利用方式的改变,大气中的碳源大幅增加,其含量较接近化石燃料形成的碳源,这是人类开发利用自然过程中形成的较大碳源之一。在这种情况下,越来越多的学者开展土壤呼吸相关研究,并从土地利用的角度开展相应试验研究分析,并取得了较大的研究成果。

在土地利用方式不断改变的情况下,土壤结构也随之改变,其理化特征呈现显著差异,尤其是肥力下

降、活性降低成为主要的土壤问题,也是农业生产面临的主要压力之一,对于植被生长起着严重不利影响,其在结构退化的同时伴随着有机碳的大幅下降,团聚体降低严重制约了其稳定性^[10-11]。对于土壤团聚体而言,作为土壤重要构成,其在促进土壤结构稳定方面起着积极作用,能够有效降低水土流失;此外,其能够有效保护有机碳,进而在肥力保持方面发挥关键作用,提升土壤质量,对于植被生长及农作物生产起着积极作用,因此来说,团聚体常常被作为衡量土壤质量的标准之一^[12],目前对于分类,常常通过湿筛法加以区分大团聚体及微团聚体,划分标准一般是 $250 \mu\text{m}$ ^[13];其级别的不同,则在养分保持等方面的作用会发生较大差异,对于改善土壤孔隙度也存在较大不同,能够对土壤理化特征产生较大影响,进而改变着土壤质量^[14]。对于华北地区而言,其在粮食安全生产方面起着关键作用,其大面积的作物种植,成为粮食主产区之一^[15],同时也是人口密集区,在城镇化不断深入发展的过程中,出现了大面积的土地利用,大量的耕地被占用,原有的土地利用类型发生了巨变,农田资源逐渐降低,与此同时,土壤质量出现了较大下降,对于农业发展起着不利影响。然而对于该区域而言,其土地利用类型改变下土壤呼吸等方面的研究相对较少,对于其团聚体的研究并不多^[16-17],因此,本研究将立足于华北地区,从土地利用类型的角度来对土壤呼吸等进行探究,以分析其土壤质量方面的影响,以为农业生产提供有益参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域选择在河南省济源,并在小浪底生态

研究站开始具体试验,该区域属于地山丘陵地带,接近小浪底枢纽,北靠太行山区域,多分布地山丘陵,受所处地理位置影响,其气候特点呈现明显的温带大陆季风特点,其近 70% 的降雨集中在夏季,而冬季气温较低,统计近年来该地区气象数据分析得知,其年日照基本在 2 300 h 左右,该区域拥有近 650 mm 的年降雨量;对于该试验区域而言,其土质多为褐色土,该土质属于石灰岩风化淋溶而成,其厚度并不高,一般在 50 cm 左右;该试验区域不仅分布着农田及果园,同时还分布不少人工林,整体而言呈现较多的土地利用类型。

1.2 样品采集

结合本区域达到土地特点,加以利用方式的不同,在研究过程中选取了较为典型的 5 种土地开发方式:不仅选择农田及果园这两种作物开发方式,还选择了次生林、人工林这两种林木类型,同时将灌木加以考虑。根据不同的开发方式,各设置 5 个样地,要求各林地的长、宽均为 20 m,而果园要求 10 m,农田和灌木要求为 5 m,为了最大程度降低试验误差,特对各样地设置 3 种重复,对于每个采样点而言,要进行重复五次的采样,并形成平行,要求各平行间隔不低于两米。在取样的过程中,为了降低取样方式差异造成的误差,特将其坡度要求不超过 5°,并结合剖面法开展土样采集,取样深度要求达到 30 cm,将获取的原样土装入保鲜盒,并将之分为两部分:其中一部分首先对其进行风干处理,之后进行有机碳含量的测定,另一部分经过初步风干,待其出现自然裂缝的情况下将之掰成多个团聚体,要求直径在 1 cm 左右,最后借助于湿筛法确定后续的粒径分组:首先选取 100 g 经过风干的土样,将 5 ml 纯水对之进行缓慢浸湿,并放置过夜,然后通过不同的筛子进行湿筛,要求振幅达到 3 cm,频率达到每分钟 50 次,最终得到不同的团聚体,其中粒径在 2 mm 以上的为大团聚体,介于 0.25 至 2 mm 的为中团聚体,介于 53 μm 至 0.25 mm 的为微团聚体,其他微小团聚体为粘团聚体,之后对不同的团聚体进行烘干,称重后测定质量分数。对于有机碳的测定借助于加热法^[18]。

对于土壤轻组分有机碳而言,其既非稳固态有机质,也非新鲜作物残体,而是介于二者的物质,在一定重液的参与下能够借助于浮选法加以分离,首先取土样 20 g,并过 2 mm 筛后置于 NaI 溶液,要求浓度达到 1.8 g/cm³,溶液达到 200 ml,然后对溶液离心管进行震荡,静置时间达到 0.5 h 后进行离心处理,处理时间为 40 min,转速为 825 rpm;之后利用滤纸对其进行过滤处理,将剩余的溶液借助于去离子水清

洗,接下来对滤纸上物质开展烘干处理,要求温度达到 65 °C,处理时间为 12 h,称重后测定有机碳^[12]。

对于颗粒有机碳 POC 的测定如下:首先将风干土样取出 20 g,要求土样粒径在 2 mm 以下,将之置于 100 ml NaPO₃ 溶液,先进行手摇后进行长达 18 h 的震荡处理,然后将悬浮液过 53 μm 筛,过筛物质进行长达 12 h 的烘干,最终对有机碳开展测定^[14]。

对于土壤呼吸的测定借助于 Li-8100 测量系统,该系统原理主要是红外分析法,首先在各测定点将 PVC 环纵向插入,要求深度达到 7 cm,待 7 d 后开展呼吸测定。

1.3 数据分析

对团聚体稳定性的测定借助于以下方式^[13-15]:

$$\text{平均质量直径(MWD)} = \sum_i^n X_i W_i$$

$$\text{几何平均直径(GMD)} = \exp[\sum W_i \ln X_i]$$

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \cdot T \times 1000$$

$$T_{\text{add}} = [(M_{\text{soil, equit}} - M_{\text{soil, surf}}) \times 0.0001] / \rho_{b, \text{subsurface}}$$

$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \cdot C_{\text{conc}} \times 0.001$$

式中: n 代表分组数;平均直径用 X_i 表示; W_i 代表的是质量分数; ρ_b , T 分别代表其容重及深度; M_{soil} , $M_{\text{soil, equit}}$ 分别代表单位面积、最大土壤质量。

Excel 2003 整理观测数据,通过 SPSS 18.0 开展单因素方差进行分析和显著性检验。

2 结果与分析

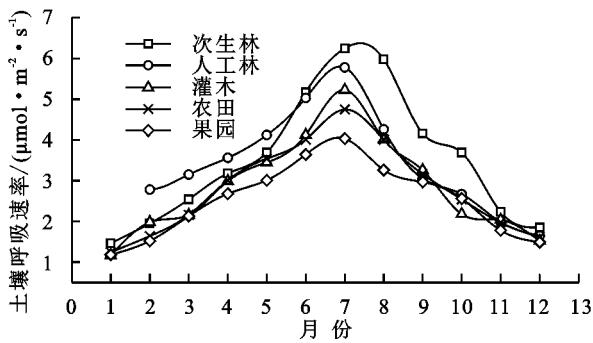
2.1 土地利用类型对土壤呼吸的影响

由图 1 可知,不同土地利用类型对土壤呼吸具有明显的影响,其中,不同土地利用类型土壤呼吸随着月份的增加呈先增加后降低趋势,在 7 月份最大,呈倒 V 字型变化规律,7 月以后,土壤呼吸急剧降低,其中在 1 月份土壤呼吸速率最小。在 7 月之前,土壤呼吸速率基本表现为人工林>次生林>灌木>农田>果园,7 月份以后土壤呼吸速率基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园。不同土地利用类型土壤呼吸速率大小基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园,其中,次生林和人工林显著高于其他土地利用类型($p < 0.05$),灌木和农田差异不显著($p > 0.05$),果园显著低于其他土地利用类型($p < 0.05$)。

2.2 不同土地利用类型对土壤 Q_{10} 的影响

本研究分别计算不同土地利用类型一年的土壤 Q_{10} 值。由表 1 可知,不同土地利用类型 Q_{10} 值大小范围在 1.65~1.97 之间,其大小基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园。由于不同土地利用条件下的土壤水分较充足,且变化范围较小,不足

以影响植物根系和土壤微生物的活动,难以区分出土壤含水量对 Q_{10} 值的影响,同时也存在土壤体积含水



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 土地利用类型土壤呼吸速率

表 1 不同土地利用类型对土壤 Q_{10} 的影响

项目	模型参数		p	R^2	Q_{10}
	R_0	b			
次生林	2.625	0.026	<0.05	0.763	1.97
人工林	2.158	0.019	<0.05	0.702	1.86
灌木	1.469	0.157	<0.05	0.689	1.72
农田	1.362	0.078	<0.05	0.692	1.71
果园	0.851	0.123	<0.05	0.651	1.65

2.3 不同土地利用类型对土壤有机碳的影响

由图 2 可知,不同土地利用类型对土壤总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)和轻组分有机碳(SLFC)影响较为明显,其中土壤总有机碳变化范围在 10.91~16.32

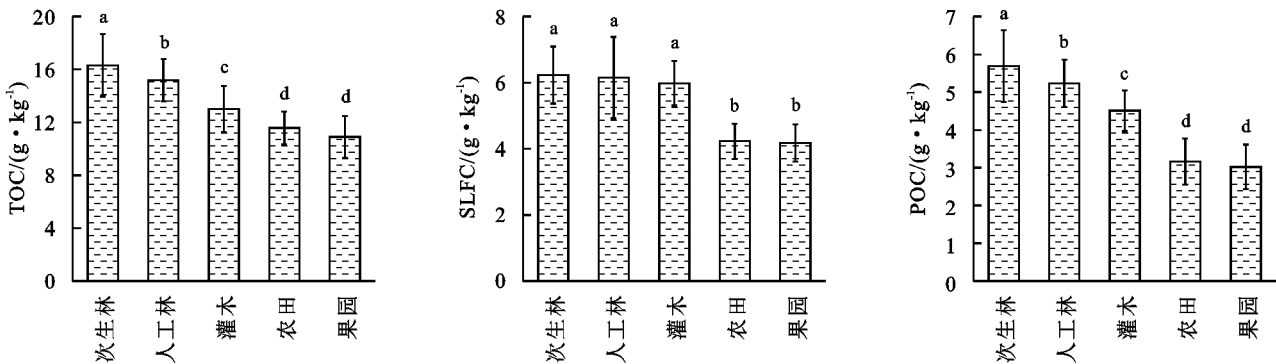
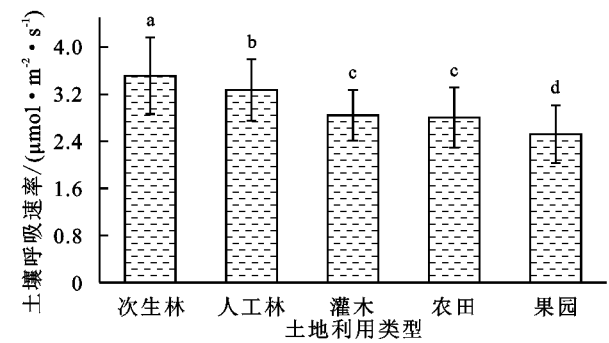


图 2 不同土地利用类型对土壤有机碳的影响

2.4 不同土地利用类型对土壤团聚体组成的影响

图 3 显示,土壤团聚体组成受到不同土地利用类型的显著影响。不同土地中的团聚体差异也比较大。粉+黏团聚体主要存在于果园以及农田中,比例高达 40%;中间团聚体和粉+黏团聚体则主要存在于灌木之中; $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体则主要存在于人工林和次生林之中,比例为 20% 以上。 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体通常被称为土壤团粒结构体,对土壤结构的稳定性有很大的决定作用,越高越好,因此被看做是土壤中最

率对土壤呼吸速率的影响作用被其他影响因子所遮蔽的可能。



g/kg,其大小基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园,其中次生林、人工林、灌木显著高于农田和果园($p<0.05$),农田和果园差异不显著($p>0.05$);轻组分有机碳(SLFC)变化范围在 4.18~6.23 g/kg,其大小基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园,其中次生林、人工林、灌木显著高于农田和果园($p<0.05$),次生林、人工林、灌木差异不显著($p>0.05$),农田和果园差异不显著($p>0.05$);颗粒有机碳(POC)变化范围在 3.02~5.69 g/kg,其大小基本表现为次生林>人工林>灌木>农田>果园,其中次生林、人工林、灌木显著高于农田和果园($p<0.05$),农田和果园差异不显著($p>0.05$)。

垦的林地变成农田之后的土壤结构产生了极大的恶化;但是,如果农田转化成果园之后,情况则相反,土壤中的中间团聚体和粒径大的微团聚体增多,改善了土壤结构。

2.5 不同土地利用类型对土壤团聚体稳定性的影响

由图 4 看出,与农田和果园相比,次生林和人工林的 GMD 高、MWD 低。而果园与农田的 GMD 与 MWD 值跟林地比较,都显著降低($p<0.05$)。但是,当农田转化成果园时,虽然 GMD 与 MWD 值都会呈现不同程度的下降,然后差异却表现为不显著($p>0.05$)。这说明当林地转化成农田以及果园的过程中,会极大的降低土壤团聚体的稳定性,但是当农田

废弃不耕种后期图土壤团聚体的稳定性又会呈现增强的趋势,这样就会对其抵抗外力破坏的能力起到很大的提升作用。

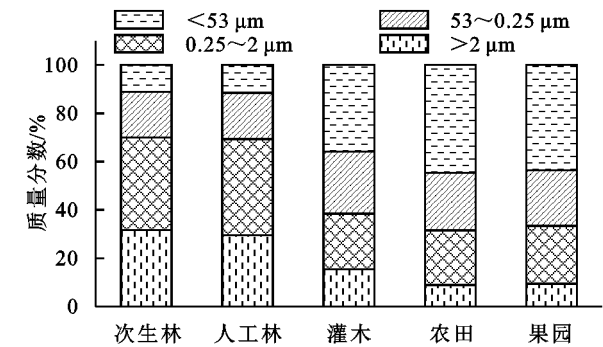


图 3 不同土地利用类型各粒径团聚体质量分数平均值

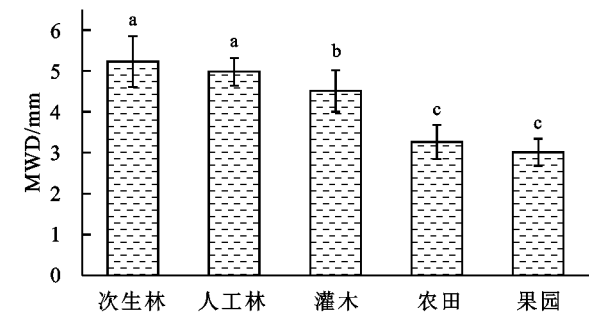


图 4 不同土地利用类型下土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

表 2 土壤水稳性团聚体和土壤呼吸与土壤有机碳的相关分析

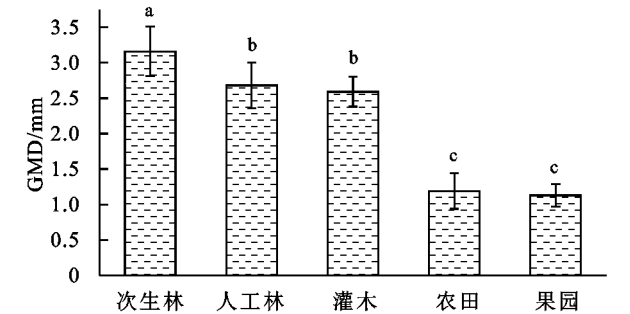
项目	土壤有机碳	回归方程	相关系数(<i>r</i>)	<i>p</i>	<i>F</i>
>0.25 mm 团聚体	TOC	$y = 18.263x - 165.022$	0.623 *	<0.01	53.269
	LFOC	$y = 16.021x + 23.617$	0.698 *	<0.01	61.020
	POC	$y = 13.129x + 4.016$	0.802 **	<0.01	63.788
平均重量直径(MWD)	TOC	$y = 0.153x + 0.091$	0.703 *	<0.01	59.563
	LFOC	$y = 0.026x + 0.159$	0.725 *	<0.01	65.791
	POC	$y = 0.037x + 0.051$	0.856 **	<0.01	72.612
平均几何直径(GWD)	TOC	$y = 0.206x - 1.026$	0.675 *	<0.01	60.723
	LFOC	$y = 0.219x + 0.407$	0.692 *	<0.01	72.151
	POC	$y = 0.358x + 0.324$	0.817 **	<0.01	79.039
土壤呼吸	TOC	$y = 2.169x - 0.517$	0.823 **	<0.01	86.236
	LFOC	$y = 1.264x + 1.955$	0.846 **	<0.01	89.147
	POC	$y = 0.918x + 2.356$	0.901 **	<0.01	92.064

3 讨论与结论

通过对土壤呼吸速率的计算得知,土壤呼吸受到不同土地利用类型的显著影响。月份的不同也会影响到土壤呼吸,其变化规律为倒 V,即主要呈现先不断增加而后不断降低的情形,土壤呼吸速率最大的月份是 7 月,最小的月份是 1 月。土壤呼吸速率因土地利用类型的不同而不同,果园的土壤呼吸速率最低,接着从低到高依次是农田、灌木、人工林,呼吸速率最高的是次生林。在这些土地类型汇总,人工林和次生林是比较显著的($p<0.05$),差异不显著($p>0.05$)的主要是农田和灌木,比其他土地类型都显著较低

2.6 土壤水稳性团聚体和土壤呼吸与土壤有机碳相关分析

本文将土壤水稳性团聚体和土壤呼吸与土壤有机碳进行相关分析(表 2),结果表明:所测定的土壤中>0.25 mm 团聚体含量、MWD,GMD 和土壤呼吸均与土壤 TOC,LFOC 和 POC 皆呈现显著正相关性($p<0.01$),其中>0.25 mm 团聚体含量、MWD,GMD 和土壤呼吸与 LFOC 和 POC 之间的相关关系达到极显著水平($p<0.01$),且相关系数较大,说明与土壤 TOC 相比,LFOC 和 POC 对土壤水稳性团聚体和稳定性的贡献更大,并且 LFOC 和 POC 对土壤呼吸的贡献更大。



($p<0.05$)的是果园,这个结果与以往的研究相同^[13-15],此外,研究分析显示,土壤有机质含量与土壤呼吸之间存在相关关系,一般表现为显著正相关。这是因为,林地的树木大、根系庞杂,自然比农田中植物的根系呼吸要强。此外,林地的凋落物也增多,提高了林地土壤有机质的含量,对林地中土壤微生物的呼吸和生长起到了极大的促进作用^[19-20]。用来衡量土壤呼吸对温度变化敏感性的一个重要指标就是 Q_{10} 值。在本文的分析中的次生林、人工林、灌木、农田以及果园 4 种土地利用类型中,其 Q_{10} 值主要在 1.65~1.97,最小的是果园,其次依次是农田、灌木、人工林, Q_{10} 值最大的是次生林。这种变化次序和土壤呼吸的

变化基本相同。

对于土壤结构稳定性的衡量能够借助于团聚体结构,其能够对土壤理化特征加以体现,能够作为重要的衡量指标之一,一方面平均重量直径 MWD 能够对其加以体现,另一方面,常用几何平均直径 GMD 对团聚体结构加以反映,二者是团聚体的重要指标^[21];且其与稳定性呈现正向的变化关系,其值越大说明其团聚能力越强,越能体现更强的稳定性;作为其重要的胶结物质,有机碳在团聚体中扮演重要角色,对于其稳定性起着关键作用^[22]。大量研究表明,在土地利用不同的情况下,有机碳含量会发生较大差异,从而制约着团聚体稳定性。通过研究得知,在土层 30 cm 深度内,次生林的土壤有机碳含量最高,其次是人工林及灌木,而农田及果园最低。主要原因在于农田开发的不断深入,其大团聚体大福下降,MWD 和 GMD 值均呈现明显的下降趋势,并在 0.05 检验水平下达到显著,对于林地而言,其被开垦后有机碳含量迅速降低,团聚体被明显分散,其稳定性被大幅降低,不少研究发现,在农田长期耕作后团聚体直径逐渐变小,且更容易破裂;而在农田弃耕的情况下,微团聚体减少,反而使得团聚体直径出现增大的情况,并形成了大量中间团聚体,这将明显提升其稳定性,以往不少学者也通过试验对比得出了此结论^[23-24]。通过试验对比分析可知,有机碳的保护能够促进团聚体稳定,进而促进土壤稳定性,尤其是在化肥施用方面搭配有机肥,降低单纯的氮肥等单一化肥施用,从而降低土壤板结^[21-23],此外,实行秸秆还田等措施也有利于改善土壤结构,这样能够明显增加大团聚体含量,将土壤稳定性得以明显提升。通过试验对比可知,与林地相比而言,农田有机碳含量下降并不明显,二者差异未达到显著水平,但是大团聚体出现了大福降低,其 MWD 和 GMD 值亦明显下降,这也与根系存在密切关系^[25]。对于农田而言,其植被密度明显低于林地,且根系远不如林地发达,因此其根系难以充分分泌胶结物质等,不利于大团聚体的形成,无法增强团聚效果^[18-19],从而使得其稳定性较弱。

通过试验对比分析可知,与林地及灌木对比而言,农田不仅出现了较低含量的颗粒有机碳 POC,而且其轻组分有机碳 SLFC 较低,这表明在对林地不断开垦的过程中,有机碳含量呈现了大幅下降,不利于土壤结构稳定性,另外,在农田撂荒的情况下,有机碳含量将出现较明显的上升^[15-16]。对于林地和果园而言,其并未受到过度的开发利用,加之较为充足的枯枝落叶,在微生物分解之下能够形成较多含量的碳,从而对土壤碳库形成了较大的补充作用^[25-27],另外,根系转化也能够明显促进碳含量的上升。对于土壤团聚体而言,作为土壤重要构成,其在促进土壤结构

稳定方面起着积极作用,能够有效降低水土流失;此外,其能够有效保护有机碳,进而在肥力保持方面发挥关键作用,提升土壤质量;对于农田来说,由于长期的耕作而导致其表层土壤较为疏松,从而使得其碳含量出现较大的流失,此外,加之孔隙度的增加,有机碳矿化现象更为突出;待农作物成熟收割后,其秸秆难以及时还田,也无法继续增加碳含量^[27]。通过分析得知,就 MWD, GMD 和土壤呼吸而言,其与 TOC, LFOC 和 POC 之间均呈现正向变化关系,并达到了极显著水平。

参考文献:

- [1] Carey J C, Tang J, Templer P H, et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48):13797-13802.
- [2] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, et al. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades [J]. *Nature*, 2018, 560(7716):80-83.
- [3] Chen J, Luo Y, Li J, et al. Costimulation of soil glycosidase activity and soil respiration by nitrogen addition [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3):1328-1337.
- [4] Hawkes C V, Waring B G, Rocca J D, et al. Historical climate controls soil respiration responses to current soil moisture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(24):6322-6327.
- [5] Pries C E H, Schuur E A G, Natali S M, et al. Old soil carbon losses increase with ecosystem respiration in experimentally thawed tundra [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2):214-218.
- [6] Chen D, Li J, Lan Z, et al. Soil acidification exerts a greater control on soil respiration than soil nitrogen availability in grasslands subjected to long-term nitrogen enrichment[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(4):658-669.
- [7] Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, et al. Global spatio-temporal distribution of soil respiration modeled using a global database[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(13):4121-4132.
- [8] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5):2090-2103.
- [9] Liu L, Wang X, Lajeunesse M J, et al. A cross-biome synthesis of soil respiration and its determinants under simulated precipitation changes[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4):1394-1405.
- [10] 王志强,刘英,杨文亭,等.稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].*生态学报*, 2018, 55(5): 1143-1155.
- [11] 钟晓兰,李江涛,李小嘉,等.模拟氮沉降增加条件下土

壤团聚体对酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(5):1422-1433.

[12] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.

[13] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等.不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J].环境科学,2015,36(3):1045-1052.

[14] 杨宁,邹冬生,付美云,等.紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J].生态学杂志,2016,35(9):2361-2368.

[15] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.

[16] 孙娇,赵发珠,韩新辉,等.不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2016,36(21):6879-6888.

[17] 王甜,徐姗,赵梦颖,等.内蒙古不同类型草原土壤团聚体含量的分配及其稳定性[J].植物生态学报,2017,41(11):1168-1176.

[18] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤学报,2015,52(4):828-838.

[19] 朱姝,窦森,陈丽珍.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报,2015,52(4):747-758.

[20] 杨飞霞,曹广超,于东升,等.引黄灌溉耕作对土壤团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):190-196.

[21] 李玮,郑子成,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J].应用生态学报,2015,26(1):9-16.

[22] 余林,徐海宁,肖复明,等.不同类型毛竹林土壤团聚体有机碳特征研究[J].江西农业大学学报,2017,39(4):713-720.

[23] 黄天颖,高唤唤,康宏樟.黄浦江上游水源涵养林土壤团聚体组成及其碳、氮分布特征[J].上海交通大学学报》(农业科学版),2017,6(3):1-7.

[24] 褚冰杰,余光辉,刘飞飞,等.土壤微团聚体中矿物—有机复合体特征[J].土壤学报,2017,54(6):1451-1458.

[25] 赵然然,张志国,李晓军,等.基于粒度的土壤团聚体中砷的形态分布特征[J].生态环境学报,2016,25(2):327-332.

[26] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):378-386.

[27] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.



(上接第 58 页)

[3] 王菊芬,吴伯志.间套作系统中土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报:自然科学,2009,24(2):286-291.

[4] 刘英超,郑毅,汤利.间套作作物对土壤水分的利用效率研究[C]//面向未来的土壤科学,2012.

[5] 董宛麟,张立祯,于洋,等.向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J].农业工程学报,2012,28(18):127-133.

[6] 叶林,杨峰,苏本营,等.不同田间配置对玉豆带状套作系统水分分布及水分利用率的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):000041-48.

[7] 苗庆丰,史海滨,李瑞平,等.河套灌区畦—沟分灌水分利用效率及节水效果试验研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):135-139.

[8] 郝娜.内蒙古农牧交错带 4 种典型间作系统生产力和水分利用研究[D].长春:吉林农业大学,2017.

[9] 牛伊宁,刘冬梅,罗珠珠,等.不同供水水平对玉米/豌豆间作系统作物耗水特征的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):83-88,101.

[10] 潘幸来.试论苜蓿—小麦生态系统[J].山西农业科学,1983(8):18-19.

[11] 周健民.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.

[12] 南京农业大学.土壤农化分析[M].南京:农业出版社,1990.

[13] 王浩,王淑兰,徐宗贵,等.耕作与施肥对旱地玉米田土壤耗水量和水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):856-864.

[14] 张晓红,徐炳成,李凤民.密度对 3 种豆科牧草生产力和水分利用率的影响[J].草地学报,2007,15(6):593-598.

[15] 李巍,郝明德,王学春.黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J].农业工程学报,2010,26(3):99-105.

[16] 何亚男.间套作苜蓿对冬小麦土壤养分、水分和土地经济效益的影响[D].山西临汾:山西师范大学,2017.

[17] 袁锐明.不翻耕苜蓿地套种冬小麦、谷子试验报告[J].陕西农业科学,1957(4):14-18.

[18] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: water[J]. Field Crops Research, 1993,34(3):303-317.

[19] 任继周,林慧龙,未丽.草地农业是甘肃农业可持续发展的重要途径[J].草地学报,2009,17(4):405-412.

[20] 肖靖秀.小麦//蚕豆的根系分泌物特征及其对蚕豆枯萎病菌的响应研究[D].昆明:云南农业大学,2013.