

文章编号:1003-8701(2014)03-0042-04

土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展

吴晓丽¹, 李林¹, 史喜林¹, 刘淑霞^{1*}, 高强¹, 姜玉杰²

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林农业大学动物科技学院, 长春 130118)

摘要: 土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其积累和分解的变化直接影响全球的碳平衡。而土壤有机碳的积累和分解受土壤有机碳稳定性的影响。土壤有机碳的稳定机制包括有机碳的难降解性、有机碳与微粒间的作用以及受团聚体的保护机制, 影响有机碳稳定性的因素有土壤本身的特性及外在的因素, 而且它们之间是相互作用的。今后应该加强有机碳的物理稳定性与化学结合机制间的相互关系的研究, 以期推动有机碳的研究, 为土壤固碳及培肥提供依据。

关键词: 土壤有机碳; 稳定机制; 影响因子; 研究进展

中图分类号: S153

文献标识码: A

Progress of Studies on Influencing Factors and Stabilization Mechanism of Soil Organic Carbon

WU Xiao-li¹, LI Lin¹, SHI Xi-lin¹, LIU Shu-xia^{1*}, GAO Qiang¹, LOU Yu-jie²

(1. College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2. College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Soil organic carbon pool is an important part of the global carbon cycle, changes of its accumulation and decomposition have a direct impact on the global carbon balance. The accumulation and decomposition of organic carbon in soil was affected by the stability of organic carbon. The stabilization mechanism of soil organic carbon includes refractory of organic carbon, interaction of organic carbon and particles and aggregates protection mechanisms. Factors influencing the stability of organic carbon include characters of soil and external factors, and these factors interact with each other. Studies in the future should strengthen research on the relationship between physical stability of organic carbon and chemical bonding mechanism in order to promote the study of organic carbon, and provide a basis for soil carbon sequestration and fertility.

Keywords: Soil organic carbon; Stabilization mechanism; Influencing factor; Progress of studies

土壤肥力的重要指标是土壤有机碳, 它影响土壤本身具有的物理、化学及生物特性, 能调节土壤的质量和功能^[1]。人类对土壤有机碳的研究可追溯到 200 年前^[2], 主要是针对土壤有机碳的肥力特性、周转包括有机物质的输入、有机碳组分的分解与产物的转化途径等^[3-7]。以往研究有机碳时, 注

重其对农业生产的作用, 而如今的研究更注重其对于生态环境的意义。

土壤有机碳的增加有利于进行农业可持续发展 and 缓解温室气体排放, 而土壤有机碳的固定和储存是由其稳定性来控制^[8]。所以想应对全球气候变化或制定温室气体减排措施时, 必须对土壤有机碳的稳定性有所了解。本文在总结前人研究的基础上, 对土壤有机碳的稳定机制及影响因素进行了综述。

1 土壤有机碳的稳定机制

土壤有机碳稳定性是指在当前条件下土壤有机质的抗干扰以及恢复原有状态的能力^[9]。对于有机碳稳定机制的研究, 国内外的报道不是很多, 较

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(216-172); 吉林省科技发展规划项目(20110202); 吉林省科技引导计划项目(201205057); 现代农业产业技术体系建设专项资金(nycytx-38)

作者简介: 吴晓丽(1985-), 女, 在读硕士, 主要从事废物处理与资源化研究。

通讯作者: 刘淑霞, 女, 教授, E-mail: liushuxia2005824@163.com

早的是 Sollins(1996)提出的将有机碳稳定机制分成三个类别^[10]:(1)有机碳内在的难降解性,指其功能团、分子组成等对酶作用和微生物的抗性;(2)化学的交互作用导致的稳定,指有机质其他无机分子之间或有机质分子之间与分子间交互作用,致使微生物对基质的不能利用;(3)基质由于物理保护而导致的微生物及酶的易接近性下降,指土壤团聚体等对基质的闭蓄作用。陈小红^[11]对土壤有机碳的物理稳定机制、化学稳定机制和生物稳定机制及相互作用进行了详细的论述。刘满强等^[9]结合以前和最新的研究进展,分4个方面对土壤有机碳的稳定机制进行论述:(1)有机碳的难降解性;(2)金属氧化物、黏土矿物与有机碳之间的相互作用;(3)土壤团聚体的物理保护导致的生物与有机碳之间的空间隔离;(4)土壤生物自身对有机碳稳定性的贡献。总结国内外相关的研究报道^[12-13],发现对土壤有机碳稳定性机制的研究主要从土壤生物、有机碳特性和土壤结构特性等几个方面进行考虑。

目前,大多数学者认为,增加土壤有机碳稳定的重要机制之一是团聚体的物理保护作用^[14],因为土壤团聚体的稳定性对土壤有机碳有保护作用。几十年来,国内外土壤研究者对土壤有机、无机、胶结物和土壤团聚体形成的关系作了大量的研究工作,得到了关于团聚体形成机制的不同观点^[15]。Elliott^[16]认为大团聚体中碳的高含量是由有机质把微团聚体胶结合成大团聚体引起的,相对而言大团聚体中有机质处于非稳定状态。Cambardella等^[17]认为大团聚体所含有的有机质属于轻组微粒有机质或者相对密度较小、且与黏土矿物之间的结合并不紧密。紧结态及有机质的黏粒影响着小粒级的微团聚体形成,而松结态的有机质和多糖物质影响着大粒级的微团聚体形成。关连珠等^[18]则认为,微团聚体的粒级决定了胶结物质的作用程度。Tisdall等^[19]的试验结果证明,黏结的团聚体(由菌丝分泌物的大分子多糖类物质的)比团聚体(由菌丝本身缠绕的)的稳定性较弱一些。Puget等^[20]认为有机质(如脂肪族化合物、不稳定碳水化合物、真菌菌丝体)可以增加大团聚体的稳定性。虽然研究人员已认识到土壤中团聚体的稳定性受到一些因素的影响,但这些研究未能进一步解释这些因素的影响过程。

2 土壤有机碳稳定性的影响因素

影响土壤有机碳稳定的因素是多方面的,概

括起来为自然因素(植被类型、水分、温度、土壤质地、土壤微生物等)和人为因素(耕作、施肥等)。自然条件下,气候条件比如年均气温和年降水会直接影响植被类型的生长,而植被类型直接决定了进入土壤中的有机残体数量,有机残体量越高,土壤有机物质量也相应增加^[21];土壤理化特性在很大程度上影响着土壤有机碳的含量^[20],不同土壤类型土壤有机质分解效率和恢复周期的差别很大,受其土壤本身质地的影响,土壤中的有机碳总量和有机碳的组分分配均有不同程度的差异^[22],也使土壤有机碳的稳定性发生了改变;土壤本身特性和外在环境因子相互作用对土壤中有有机碳的稳定性具有重要的影响。人为因素对土壤有机碳的影响是综合的,也是比较复杂的。种植作物和耕作是影响空气状况和土壤湿度、温度变化的重要因素,因此人为因素对土壤有机碳稳定性的影响有着不同的机制。

2.1 土壤微生物

微生物既是土壤的重要组成部分,又是形成土壤中团聚体最活跃的生物因素,在土壤有机碳的形成与转化中起到非常重要的作用。土壤微生物对有机碳的利用和转化主要有真菌和细菌主导的两种途径,由于微生物对基质的选择利用,真菌对碳的存储能力更强^[23]。相关研究表明,土壤有机碳与真菌和细菌的相对组成有关,可能是影响土壤有机碳稳定性的主要原因,但其影响机制是相当复杂的。土壤微生物主要是通过影响团聚体的稳定性、土壤黏粒矿物的形成以及有机物料的可降解性来影响土壤有机碳稳定程度的。

土壤中的微生物,特别是真菌,对于大团聚体的稳定性和形成起着重要作用^[24]。Birgitte等^[25]研究表明,真菌菌根能有效提高土壤结构和土壤中团聚体的稳定性。Degens等^[26]利用电子显微镜发现,菌丝能够使团聚体中的砂粒联结起来,同时也证实了,增加菌根真菌和腐生真菌的菌丝长度有利于沙土进行团聚。菌根菌丝体和其它根际微生物产生的有机化合物,可使微团聚体进一步胶结成大团聚体。由Pojasak等^[27]报道可知,玉米根系分泌物的大分子多糖类可以使大团聚体的稳定性增强。总体来说,微生物对土壤中团聚体稳定性机理可分为以下几点^[28]:土壤颗粒可以被细菌产生的多聚物吸附;被土壤颗粒表面吸附的真菌菌丝能与土壤颗粒胶结在一起;微生物的群落间植物根系间的相互作用,使土壤中团聚体更加稳定,土壤有机碳的稳定性增强。

2.2 土壤黏粒矿物

土壤有机碳的稳定性受土壤中以铁铝氧化物为代表的金属氧化物、黏粒含量以及黏土矿物的影响^[15]。土壤有机碳与土壤黏粒矿物紧密结合,可以抵抗土壤微生物对有机碳的降解作用。不同的土壤矿物,因为结构不同,表面电荷不同,所以对有机碳的吸附作用不同。通过大量调查发现酸性土壤底土层,土壤有机碳的稳定性由草酸中提取的非晶形铁铝氧化物通过配位体置换决定的。此外其他实验证明,铝-有机质也可以形成生物稳定复合体^[16]。

McConkey 等^[29]对美国温带地区免耕土壤进行了研究,研究结果表明土壤有机碳的增加和黏粒含量呈正相关的关系。铁铝氧化物是土壤中的活跃成分,供给土壤正电荷,可以作为胶结物质,有效地使黏粒胶结在一起。Oades^[22]发现,碱性离子(如 Ca)和铁铝氧化物与土壤有机碳含量之间存在着关联性,自此之后土壤金属氧化物、特别是铁铝氧化物对有机碳的保护日渐受到学者的关注。铁铝氧化物巨大的比表面积和大量的表面电荷具有强烈的吸附力,是有机碳保护的实质。Kaiser 等^[30]发现铁铝氧化物对水溶性有机质(DOM)具有一定的吸附作用,而 DOM 是有机碳积累的关键所在。Schwesig 等^[21]做了进一步的研究,发现 DOM 的矿化受到铝(Al)的抑制,而 Kahle 等^[31]研究表明,铁铝氧化物与有机碳呈现出显著的负相关性。因此,金属氧化物对有机碳的影响不能简单的一概而论,可能存在地域上或其他因素上的差异。

2.3 进入土壤中有机物质的种类和性质

研究表明,土壤有机碳的主要来源是死亡的生物残体碳,牲畜粪肥、人粪肥、绿肥和饼肥等有机物料。土壤中生物残体的分解大抵可分为快速分解和缓慢分解。生物残体分解后一部分矿化掉了,一部分残存在土壤中。残存在土壤中的有机碳可以在土壤微生物的进一步作用下经缓慢而复杂的转化-缩合等过程后形成难分解的腐殖质。它在分解的同时也将改变土壤中原有的有机碳的分解速率。已有的研究表明,每百公斤不同有机物料能形成的土壤有机碳量以作物根茬最多,平均可达 31 kg;其次是猪粪,约 24 kg;再其次是作物秸秆,平均为 22 kg;每公斤绿肥能形成的土壤有机碳最少,平均仅为 18 kg^[32]。

土壤的植物残体本身的分解程度、化学组成以及分解者生物群落等诸多因素决定了有机碳的难降解性^[11]。也决定了土壤有机碳的稳定性。进入

土壤中的有机物还在微生物及酶的选择作用下,最先分解的为蛋白类物质和碳水化合物,有机物的颗粒变小,碳氮比也下降,致使较难降解的复杂化学结构物质产生富集^[13]。有机物的难降解性使土壤中有有机碳的稳定性增强。Tan 等^[33]用 6M HCl 酸解得到 NHC,证明难降解性保护机制(该文称生化保护机制)对土壤有机碳的稳定性具有最重要的作用。由于 HCl 酸解法的简捷性,至今仍被广泛使用。在土壤有机碳稳定机制中,有机碳难降解性的地位及利用该机制来调控土壤有机碳的稳定性有待更多的研究^[34]。

2.4 耕作措施

对土壤进行频繁耕作,改变了土壤有机碳的分布和微生物的生存环境,为土壤有机物质的分解和转化创造了有利的条件,及由此造成的团聚体的变化,可促进土壤有机质周转随耕作强度增加而增大,降低土壤团聚体的发生^[35]。与传统耕作相比,免耕土壤的团聚性更强,表现为 >1 mm 时能够增加水稳性的团聚体, >1 mm 时净团聚体量和 <1 mm 时均能显著提高黏粒团聚度^[36]。与常规耕作相比,保护性耕作提高表层土壤的生物活性,提高团聚体内部碳、氮的含量,增大其结构的稳定性。保护性耕作制度下,土壤微团聚体的颗粒有机质的浓度明显高于常规耕作,大团聚体的含量则是常规耕作的 2~3 倍^[37]。周虎等^[38]对华北平原地区做了研究,采用保护性耕作制度对土壤中团聚体的稳定性、大小和数量的影响,结果表明,免耕处理促进了表层土壤团聚体的形成。

2.5 土地利用

土地利用主要通过影响土壤有机物质的来源和种类等来影响土壤有机碳的稳定性。因利用方式不同,同一母质发育的土壤,其团聚体的组成和数量都存在着很大的差异性,这说明土地利用方式很大程度上影响着土壤团聚体的形成^[39]。分别对耕地、林地和草地的土壤中团聚体的含量作了比较,发现草地的团聚体含量大于耕地和林地的含量,特别是土壤中大团聚体的含量。刘梦云等^[40]又对天然草地、灌木林地、果园、农地和人工草地的土地利用方式、微团聚体的结构和土壤中团聚体的结构做了研究和分析,发现它们的土壤中团聚体的总量依次减小(即天然草地 > 灌木林地 > 果园 > 农地 > 人工草地)。Singh 等^[41]在印度的干热地区分别对森林、草原及农田进行研究和分析,其结果显示森林的生态系统中大团聚体组分含量最大,草原与农田在后,但微团聚体却恰好相反。

而当草地被开垦成耕地时,土壤的微域环境更有利于微生物的分解,团聚体的稳定性因此下降,水稳性团聚体减少的主要诱因是有机质分解加快。

3 问题与展望

虽然已经认识到土壤有机碳稳定性的重要作用,且有关有机碳稳定机制的研究已取得了一定的成就,但是由于土壤有机碳受土壤类型、土层深度、土壤管理措施、土壤生物活性及生物群落组成等多种因素的影响,导致了土壤有机碳稳定机制的复杂性,有机碳稳定机制的内在机理和各机制之间的相互关系还没有全面的了解。通过物理、化学分组方法获得的有机碳组分对有机碳稳定的贡献也没有很好的阐述过。针对不同生态系统土壤有机碳库稳定多集中在森林、草原生态系统。对农田生态系统有机碳稳定性研究较少,从已有的研究看,多集中在南方的水稻土上,而且对于南方水稻土固碳潜力及固碳机制的研究日益深入,对黑土的有机碳稳定性的研究还较少。今后的研究重点应放在以团聚体与化学结合机制及相互关系的研究,物理、化学及生物稳定相互作用机制的研究。

参考文献:

- [1] 熊毅,陈家坊.土壤胶体(第三册),土壤胶体的性质[M].北京:科学出版社,1990:487-513.
- [2] Baldock J A, Nelson P N. Soil Organic Matter[M]. In: Sumner M E, ed. Handbook of Soil Science. CRC Press Inc., Boca Raton; USA, 1999: B25- B84.
- [3] Anna E, Richards, Ram C, et al. Soil carbon turnover and sequestration in native subtropical tree plantations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(8): 2078-2090.
- [4] Julia Seeber, Seeber G U. Effects of land-use changes on humus forms on alpine pastureland (Central Alps, Tyrol)[J]. Geoderma, 2005, 124(4): 215-222.
- [5] Tsutsuki K, Kuwatsuka S. Characterization of soil organic matter in particle size fractions obtained from different types of soils[J]. Transactions of 14th ICSS. 1990(5): 242-247.
- [6] 关连珠,张佰泉,颜丽.不同肥力土壤微团聚体形成与胶结特性的研究[J].土壤学报,1991,2(3):15-19.
- [7] 窦森,徐冰,孙宏德.黑土有机培肥与腐殖质特性[J].吉林农业大学学报,1995,17(1):46-51.
- [8] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2642-2650.
- [9] 吴庆标,王效科,郭然.土壤有机碳稳定性及其影响因素[J].土壤通报,2005,36(5):743-747.
- [10] Sollins, Homnn P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of 50 organic matter [J]. Mechanisms and control, 1996(74):65-105.
- [11] 陈小红,段争虎.土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究[J].土壤通报,2007,38(4):765-772.
- [12] Krull E S, Baldock J A, Skjemstad J O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modelling carbon turn over[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30: 207-222.
- [13] Li Y T, Dai J, Becquer T, et al. Availability of different organic carbon fractions of paddy soils under two heavy metal contamination levels[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 138-145.
- [14] Six J, Callewaert Anderss, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested By Physical fractionation [J]. Science Society of America Journal, 2002(66): 1981-1987.
- [15] Bossuyt H D J, Hendrix P F. Protection of carbon by microaggregates within earth casts [J]. Biology and Biochemistry, 2005(37): 251-258.
- [16] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Sci Soc. Am. J., 1986(50): 627-633.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. Soil Sci. Soc. Am J, 1994, 58: 123-130.
- [18] 关连珠,张佰泉,颜丽.不同肥力黑土、棕壤微团聚体的组成及其胶结物质的研究[J].土壤学报,1991,28(3):260-267.
- [19] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J]. Aust. J. Soil Res., 1980, 18: 423-433.
- [20] Puget P, Angers D A, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils [J]. Soil Biol Biochem, 1999, 31 (1): 55-63.
- [21] Schwesig D, Kalbitz K, Matzner E. Effects of aluminum on the mineralization of dissolved organic carbon derived from forest floors [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54: 311-322.
- [22] Oades J M. The retention of organic matter in soil [J]. Bio-geochemistry, 1988(5): 35-70.
- [23] Six J, Frey S D, Thiet R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems [J]. Soil Science Society America Journal, 2006, 70: 555-569.
- [24] Guggenberger G, et al. Microbial contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch[J]. Soil Biol. Biochem, 1999, 31: 407-419.
- [25] Birgitte N, Leif P. Influence of arbuscular mycorrhizal function soil structure and aggregate stability of vertisol [J]. Plant and Soil, 2000, 218: 173-183.
- [26] Degens B, Sparling G. Changes in aggregation do not correspond with changes in labile organic C fractions in soil amended with ¹⁴C-glucose [J]. Soil Biol. Biochem., 1996, 28 (4-5): 453-462.
- [27] Pojasak Tand, Kay S D. Effect of root exudates from corn and brome grass on soil structural stability [J]. Can. J. Soil Sci., 1990, 70: 351-362.
- [28] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(4):434-438.

(下转第78页)

与张美善等对西洋参叶片研究结果一致。

高 WUE 被认为是在干旱和半干旱环境里植物能够成功或良好生长和生产的一个有贡献的特征,是协调碳同化与水分耗散之间的关系^[21]。本研究利用仪器测定枣树叶片气体交换效率来推算枣树的 WUE。主要对枣树叶片短时的日变化进行了研究,对于该地区水分利用率日变化而言,上午时段的水分利用率明显高于下午时段的水分利用率(图 5)。

参考文献:

- [1] 王志强,何方,牛良,等.设施栽培油桃光合特性研究[J].园艺学报,2000(4):245-250.
- [2] J Peuelas, J Filella, J Llusia et al. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(319): 229-238.
- [3] 徐飞,郭卫华,王玉芳,等.济南市校园 6 个绿化树种光合荧光特征比较初探[J].山东大学学报(理学版),2007,42(5):86-94.
- [4] 姜小文,易干军,霍合强,等.毛叶枣光合特性研究[J].果树学报,2003,20(6):479-482.
- [5] Francis B Lopez, Tim L Setter, Charles R McDavid. Carbon dioxide and light responses of photosynthesis in cowpea and pigeonpea during water deficit and recovery [J]. *Plant physiology*, 1987, 85(4): 990-995.
- [6] MA Sobrado. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species[J]. *Trees*, 2000, 14(5): 258-262.
- [7] 郑淑霞,上官周平.8 种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J].生态学报,2006(4):1080-1087.
- [8] Gui-Rui Yu, Jie Zhuang, Zhen-Liang Yu. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158(7): 861-874.
- [9] 万素梅.干旱胁迫对塔里木盆地红枣光合特性及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(3)
- [10] 柴仲平,王雪梅,孙霞,等.红枣光合特性与水分利用效率日变化研究[J].西南农业学报,2010(1):168-172.
- [11] 姜小文,张秋明,易干军,等.四季柚的光合特性研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2003(5):397-401.
- [12] 宋纯鹏,王学路,等译.植物生理学(第四版)[M].北京:科学出版社,2009.
- [13] J Berry, O Bjorkman. Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31(1): 491-543.
- [14] H M Miziorko. Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase-Oxygenase[J]. *Biochemistry*, 1983(52): 507-535.
- [15] W L Ogren. Photorespiration: Pathways, Regulation, and Modification [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1984, 35(1): 415-442.
- [16] Richard C Leegood, Peter J Lea, Michael D Adcock, et al. The regulation and control of photorespiration [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46(special issue): 1397-1414.
- [17] 张美善,徐克章.西洋参叶片光合日变化与内生节律的关系[J].吉林农业大学学报,2003(6):595-597.
- [18] 郭艺鹏.骏枣光合生理特性研究[D].新疆农业大学,2011.
- [19] 刘世平,李武军,黄小凤,等.3 个台湾青枣品种与野生毛叶枣光合作用及叶绿素荧光特性的比较[J].广东农业科学,2007(7):7-10.
- [20] 翁晓燕,蒋德安,陆庆,等.影响水稻叶片光合日变化因素的分析[J].中国水稻科学,1998(2):105-108.
- [21] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009(7):3882-3892.
- [29] McConkey B G, Liang B C, Campbell C A, et al. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 74 (1): 81-90.
- [30] Kaiser K, Guggenberger G, Derenne S, et al. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2000(31): 711-725.
- [31] Kahle M, Kleber M, Jahn R. Predicting carbon content in illitic clay fractions from surface area, cation exchange capacity and dithionite-extractable iron [J]. *European Journal of Soil Science*, 2002(53): 639-644.
- [32] 沈善敏.中国土壤肥力[M].北京:中国农业出版社,1998:64.
- [33] Tan Z X, Lal R, Lzaurralde R C, et al. Biochemically protected soil organic carbon at the north Appalachian experimental watershed[J]. *Soil Science*, 2004(169): 423-433.
- [34] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, et al. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005(69): 1078-1085.
- [35] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998(62): 1367-1377.
- [36] 常旭虹,赵广才,孟祥云,等.农牧交错区保护性耕作对土壤含水量和温度的影响[J].土壤,2006,3(3):328-332.
- [37] Six J, Elhott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1350-1353.
- [38] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [39] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [40] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰.不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2006,4(4):47-51.
- [41] Singh S, Singh J S. Water-stable aggregates and associated organic matter in forest, savanna, and crop land soils of seasonally dry tropical region, India [J]. *Bio. Fertilizer. Soil*, 1996(22): 76-82.

(上接第 45 页)