

不同轮作模式对土壤团聚体组成 及有机碳分布的影响

张凤华, 王建军

(石河子大学 新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 选择干旱区玛纳斯河流域绿洲长期连作棉田土壤为研究对象, 研究连作棉田、轮作玉米、轮作大豆、玉米//大豆间作和休闲免耕 5 种模式对土壤团聚体组成及有机碳分布特征的影响。结果表明: 不同种植模式对土壤团聚体有明显的影响, 土壤机械稳定性团聚体含量在粒径 53 ~ 250 μm 为最高, 占 39% ~ 53%, 水稳性团聚体含量呈最低; > 250 μm 机械稳定性团聚体含量在不同种植模式间差异显著, 表现为大豆轮作 > 玉米轮作 > 休闲免耕 > 棉花连作 > 玉米//大豆间作; 秋季作物收获后, 轮作大豆和玉米//大豆间作模式土壤团粒指数比春季分别减少 18.7% 和 15.6%; 土壤团聚体有机碳及微生物量碳含量主要集中在 > 250 μm 大团聚体中, 而在微团聚体中含量较少; 不同模式土壤有机碳含量顺序为大豆轮作 > 玉米轮作 > 棉花连作 > 休闲免耕 > 玉米//大豆间作。比较几种种植模式, 大豆轮作和玉米轮作有利于团聚体的形成和稳定, 可作为长期连作棉田较为理想的短期轮作倒茬模式。

关键词: 轮作模式; 土壤团聚体; 有机碳; 长期连作

中图分类号: S152.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0113-04

Effect of planting patterns on organic carbon and soil aggregate composition

ZHANG Feng-hua, WANG Jian-jun

(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effect of long-term continuous cropping cotton on organic carbon and soil aggregate composition in Manas River oasis. Five patterns were conducted, including continuous cropping cotton, corn rotation, soybean rotation, corn and soybean intercropping and no-tillage. The results showed that the size distribution of soil mechanical aggregate stability was the highest for those between 53 and 250 μm , accounting for 39% ~ 53%, while that of the water-stable aggregates was the lowest. The mechanical aggregate stability size of > 250 μm showed significant difference among planting patterns, with an order of soybean rotation > corn rotation > no-tillage > continuous cropping cotton > corn and soybean intercropping. Soil aggregate index of soybean rotation and corn/soybean intercropping decreased by 18.7% and 15.6% in early spring, respectively. The contents of soil aggregate organic carbon and microbial biomass carbon are mainly in the size of > 250 μm , being higher than that in microaggregate. The content of soil organic carbon showed an order of soybean rotation > corn rotation > continuous cropping > no-tillage > corn and soybean intercropping. Compared with rotation patterns, soybeans and corn rotation showed positive effect on stable aggregate formation, which can be used as a reasonable short-term crop rotation patterns.

Keywords: planting patterns; aggregates; organic carbon; continuous cropping; arid land

土壤团聚体是土壤结构最基本的物质基础, 不同粒级团聚体在土壤结构的改善和有机碳的固定中作用不同。耕作方式通过影响大团聚体与微团聚体之间的转化和再分布, 进而影响土壤结构稳定性和抗侵蚀能力^[1]。免耕和少耕等保护性耕作措施有利于团聚体含量的增加、表层土壤结构的改善^[2-3], 但耕作方式对团聚体土壤物理性质的影响会因气候条件、土壤质地和植被类型等变化而不同。不同土地利用方式下, 粒径 > 5 mm 的土壤团聚体所占比例顺序为: 撂荒地 > 耕地 > 园地 > 林地; 粒径 < 0.25 mm

收稿日期: 2013-08-05
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20126518110002); 国家自然科学基金(31171507); 国际科技合作专项项目(2011DFA93140)
作者简介: 张凤华(1970—), 女, 山东邹县人, 博士, 教授, 主要从事干旱区资源与环境研究。E-mail: zfh2000@126.com。

团聚体所占比例顺序分别为:园地>耕地>林地>撂荒地^[4]。Nakamoto 等^[5]研究表明,与玉米相比,虽然大豆根长密度较小,但大豆根系生长对土壤中大团聚体破坏作用更强,种植大豆可降低大团聚体的数量^[6]。另有一些研究表明,豆科植物根际微生物生物量较高,因而较非豆科植物能增加水稳性团聚体的数量^[7-8]。土壤有机质与团聚体关系密切,对土壤团聚体数量和大小分布有重要影响^[9],其含量的提高有利于土壤结构形成及增强土壤结构稳定性^[10-11],而团聚体形成反过来影响土壤有机碳分解^[12]。Christensen^[13]认为影响土壤团聚体的因素都影响土壤碳,土壤碳的数量和质量与团聚体密切相关。李阳兵等^[14]研究表明,团聚体稳定性下降和水稳性团聚体减少的主要原因是有机质含量下降。合理的农业管理措施,对于增加土壤有机碳的固定,提高土壤肥力具有重要的理论和实践意义。

新疆是中国最适宜和最优质的商品棉生产基地,主要植棉区棉花面积占作物播种面积的 60%~70%,有些地区甚至高达 80% 以上^[15],连作现象非常普遍。大面积棉田多年连作的结果,使土壤肥力消耗很快,地力明显下降,对农田生态系统产生重要影响。本研究以长期连作棉田为对象,分析基于长

期连作棉田进行不同轮作模式土壤有机碳团聚组成及有机碳的分布特征,并运用土壤团粒指数(E_{LT})指标分析不同种植模式对长期棉田连作土壤团聚体稳定性的影响。研究结果明确并量化不同轮作模式下长期连作棉田土壤质量的变化,为采用有效的土壤管理措施及提高新疆棉田土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆北疆最大的植棉产区玛纳斯河流域石河子绿洲西古镇(85°52′~86°10′E,44°52′~45°12′N)。该区地处天山山前冲积洪积平原与古尔班通古特沙漠南缘交接地带,伸入沙漠腹地 70 km,年平均气温为 6.1℃,各季的平均气温为:春季 9.7℃,夏季 24.3℃,秋季 6.6℃,冬季-16.5℃,平均≥10℃积温 3 693.8℃,无霜期 160~180 d,平均日照时数 2 600~3 000 h,属于典型的温带大陆性干旱气候。该区域地势平坦,耕层盐分含量低、热量充足、作物产量当季表现较高,近年连创北疆地区植棉高产记录。试验区土壤为砂壤土,土壤耕层基本理化性质见表 1。

表 1 研究区土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

含水量 Water content /%	容重 Volume-weight /(g·cm ⁻³)	pH	电导率 Conductivity /(ms·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium /(g·kg ⁻¹)
15.10	1.59	7.95	0.27	6.60	0.57	22.68

1.2 试验设计

本试验选择玛纳斯河流域石河子绿洲长期连作棉田(20 a)为样地,在此基础上采用不同轮作模式进行小区试验,共设 5 个处理,分别为连作棉田(CM),玉米轮作(YL),大豆轮作(DL),休闲免耕(XX)和玉米//大豆间作(YDJ)。每个小区面积为 6.5 m×44 m,田间统一管理。

1.3 样品采集和测定

本实验样品采集在春季播种前和秋季收获时进行田间采样,在 5 个处理中分别挖取土壤剖面(30 cm 宽,40 cm 深),采集土壤耕层大小一致的原状土样,每种模式采取 3 个重复。将土样过 8 mm 的土筛,最后风干土样,分别过 1、0.25 mm 筛孔以供测定。

机械稳定性团聚体采用人工筛分法,水稳性团聚体采用湿筛法进行测定,共分>250 μm(D_{250}),53

~250 μm($D_{53\sim250}$)和<53 μm(D_{53})三个粒级;计算各粒级团聚体含量百分数。土壤团聚体中有机碳含量采用外加热重铬酸钾氧化法进行测定。

土壤团粒指数(E_{LT}):

$$E_{LT} = (W_T - W_{0.25}) / W_T \times 100\%$$

式中, W_T 为供试土壤总质量, $W_{0.25}$ 为水稳性团聚体质量。

实验数据采用 SPSS11.5 数据处理系统进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

不同种植模式中 53~250 μm 机械稳定性团聚体远大于其他粒径土壤团聚体,约占总团聚体的 39%~53%(表 2)。春季>250 μm 团聚体在不同种

植模式间差异显著,相对春季播种前,秋季作物收获后含量均有增加,其中,春季 YL 模式最高,为 30.1%,YDJ 最低,为 19.9%;在秋季作物收获后,DL 模式最高,为 34.0%,而 YDJ 含量仍然最低,为 28.5%,但也较春季增加了 8.6%。粒径 < 53 μm 团聚体从春季到秋季呈下降趋势,但减少幅度不大,春

季玉米轮作表现为最高(30.7%),棉花连作最低(26%),秋季大豆轮作最高(26.7%),棉花连作最低(21.6%)。表明大豆和玉米轮作对长期棉田连作土壤有很好的改良作用,休闲地和玉米//大豆间作具有提升连作土壤向良好结构形成的潜在能力。

表 2 不同种植模式机械稳定性团聚体含量/%
Table 2 Size distribution of soil aggregates under different cropping patterns

种植模式 Cropping patterns	> 250 μm		53 ~ 250 μm		< 53 μm	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
CM	22.7c	29.0ab	51.3a	49.4a	26.0a	21.6b
YL	30.1a	31.2ab	40.0c	43.1c	30.7a	25.8a
DL	26.2b	34.0a	47.6ab	39.2d	26.1a	26.7a
YDJ	19.9d	28.5b	53.6a	48.1ab	26.5a	23.4ab
XX	22.2c	29.5ab	49.6ab	45.3bc	28.1a	25.3a

注:不同字母表示不同种植模式之间差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。
Note: Different letters indicate significance at $P < 0.05$ level. The same below.

2.2 不同种植模式对土壤水稳性团聚体组成的影响

不同种植模式对土壤团聚体的组成、数量等都有一定的影响,而且对不同生长季节团聚体特征也有影响。水稳性团聚体分布规律与机械稳定性团聚体相比有所不同(表 3),53 ~ 250 μm 土壤团聚体数量最低,约占总团聚体的 16% ~ 31%。在春季,< 53 μm 土壤团聚体大于其他粒径的土壤团聚体;而

在秋季,> 250 μm 土壤团聚体大于其他粒径的土壤团聚体。农田管理措施会影响土壤团聚体的形成,土壤团聚体在不同种植模式中的表现不同,与春季相比,秋季轮作大豆模式 > 250 μm 团聚体含量增加 18.7%,玉米//大豆间作模式增加了 15.6%;而在 < 53 μm 土壤团聚体中,休闲免耕模式和玉米轮作含量上升,分别上升了 8.9%和 11.1%,而其它种植模式含量均呈下降趋势。

表 3 不同种植模式水稳性团聚体含量和团粒指数/%
Table 3 Contents of water-stable aggregates and E_{LT} under different cropping patterns

种植模式 Cropping patterns	> 250 μm		53 ~ 250 μm		< 53 μm		团粒指数(E_{LT})	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
CM	33.1ab	50.4a	31.0a	23.4a	35.9ab	26.2b	66.9	49.6
YL	54.0a	45.9a	23.7a	20.7a	22.3b	33.4b	46	54.1
DL	24.5b	43.2a	16.7a	23.3a	58.8a	33.5b	75.5	56.8
YDJ	24.8b	40.4ab	21.3a	19.1a	54.9a	40.5ab	75.2	59.6
XX	37.3ab	23.5b	20.3a	25.2a	42.4ab	51.3a	62.7	76.5

2.3 不同种植模式对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团粒指数(E_{LT})和水稳性团聚体含量是表达土壤团聚体稳定性的重要指标。团聚体 E_{LT} 的值越低表明团聚体结构越稳定。由表 3 可见,土壤团粒指数从春季的 65.3%下降至秋季的 59.3%,相比较春季而言,秋季土壤稳定性有所提高。不同种植模式下,土壤团粒指数有所变化,春季土壤团聚体团粒指数(E_{LT})表现为 $\text{YL} < \text{XX} < \text{CM} < \text{YDJ} < \text{DL}$,而到秋季则为 $\text{CM} < \text{YL} < \text{DL} < \text{YDJ} < \text{XX}$ 。从作物生育前

期到收获后,休闲模式和玉米轮作的团粒指数有所升高,分别升高了 13.8%和 8.1%;大豆轮作和玉米//大豆模式团粒指数有所降低,分别下降了 18.7%和 16.6%。说明短期大豆轮作增加了土壤大团聚体的含量,有利于团聚体的形成和稳定。

2.4 不同种植模式土壤团聚体有机碳含量的变化

在不同种植模式中,团聚体中有机碳含量在三个粒径中有所差异(图 1),其大小顺序为 $\text{D}_{250} > \text{D}_{53} > \text{D}_{53 \sim 250}$,团聚体的有机碳主要集中在粒径 > 250

μm 的大团聚体中,最高含量为 $7.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而微团聚体中含量较少。在不同种植模式中,大豆轮作模式土壤有机碳各团聚体粒径中含量均为最高,其次是玉米轮作和连作棉田,最少的是玉米//大豆间作模式。说明长期连作棉田采用轮作大豆和轮作玉米模式对土壤团聚体的养分积累有一定作用。

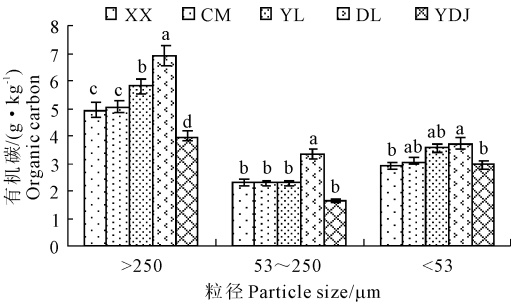


图 1 不同种植模式团聚体中有机碳的含量
Fig.1 Contents of aggregate-associated soil organic carbon under different cropping patterns

2.5 不同种植模式土壤团聚体微生物量碳分布

不同种植模式下微生物量碳在 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 团聚体中大小顺序表现为 $\text{CM} > \text{XX} > \text{YL} > \text{DL} > \text{YDJ}$ (图 2),棉花连作含量最高,玉米大豆间作最低;在 $53\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 团聚体中大小顺序表现为 $\text{DL} > \text{XX} > \text{YL} > \text{CM} > \text{YDJ}$,大豆轮作含量最高,玉米大豆间作模式最低;在 $<53\text{ }\mu\text{m}$ 团聚体中微生物量碳大小顺序表现为 $\text{XX} > \text{CM} > \text{YL} > \text{YDJ} > \text{DL}$ 。在不同种植模式下,团聚体微生物量碳含量在不同粒径大小顺序表现为 $\text{D}_{250} > \text{D}_{53\sim250} > \text{D}_{53}$,土壤微生物主要聚集在 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体中,对土壤养分影响较大。轮作大豆后,土壤团聚体中微生物量碳含量在 $53\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 最高。

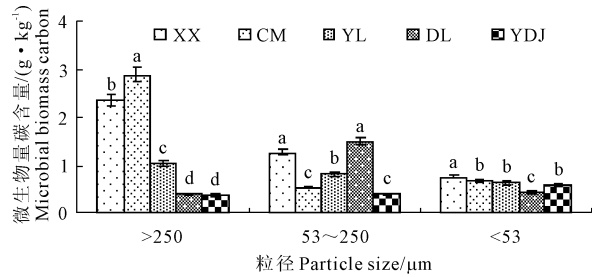


图 2 不同种植模式土壤团聚体微生物量碳变化
Fig.2 Microbial biomass carbon under different cropping patterns

3 结 论

相比连作棉田土壤的机械稳定性团聚体,大豆和玉米轮作后 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 和 $<53\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体含量有所增加,休闲模式和玉米//大豆模式 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体含量增加明显,表明大豆轮作、玉米轮作方式可

以促进团聚体形成,改善土壤结构,增加土壤肥力,对长期棉田连作土壤有很好的改良作用,休闲免耕和玉米//大豆间作也可提升连作土壤向良好结构形成的潜在能力。

不同种植模式中水稳性团聚体中,连作棉田的 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 含量最高,而 $53\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 含量最低;在短期种植模式中,大豆轮作和玉米//大豆间作模式土壤大团聚体含量略微增加,微团聚体含量减少,玉米轮作和免耕休闲地土壤大团聚体的含量明显减少,微团聚体明显增加。从土壤团聚体角度分析,短期大豆轮作和玉米轮作可做为长期连作棉田合理的轮作倒茬模式。从生育前期到收获期,休闲免耕模式和玉米轮作的团粒指数有所升高,分别升高了 13.8%和 8.1%;大豆轮作和玉米//大豆模式的团粒指数是下降的,分别下降了 18.7%和 15.6%。说明短期大豆轮作增加了土壤大团聚体的含量,有利于团聚体的形成和稳定。

不同种植模式土壤有机碳主要集中在 $>250\text{ }\mu\text{m}$ 团聚体中,小团聚体中含量较少,这与袁颖红^[16]研究结果一致。土壤有机碳含量为 $\text{DL} > \text{YL} > \text{CM} > \text{XX} > \text{YDJ}$ 。土壤团聚体微生物量与有机碳的变化规律相似。不同种植模式中,大豆轮作在土壤团聚体各个粒级中有机碳含量都高,与其他种植模式差异显著,说明大豆轮作对土壤团聚体的养分积累有很大的帮助。

参 考 文 献:

[1] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51:595-605.

[2] 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.

[3] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2009,105:192-199.

[4] 何淑勤,郑子成.不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J].水土保持通报,2010,30(1):7-10.

[5] Nakamoto T, Suzuki K. Influence of soybean and maize roots on the seasonal change in soil aggregate size and stability[J]. Plant Pro. Sci., 2001,4(4):317-319.

[6] Fahad A A, Mielke L N, Flowerday A D, et al. Soil physical properties as affected by soybean and other cropping sequences[J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1982,46:377-381.

[7] Chan K Y, Heenan D P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage[J]. Soil Till. Res., 1996,37:113-125.

净干物质最多,营养物质转移的差异主要表现在茎秆上^[22]。本试验也表明茎秆对籽粒干物质的贡献最大,但是膜侧条播方式下冬小麦穗部农艺性状和生育后期干物质积累量表现出较高水平,而最终产量低于全膜覆土处理,笔者认为,营养器官中干物质的再分配仅仅是地膜小麦籽粒产量增加的部分贡献者,地膜小麦有效穗数的增加和同化作用的加强是籽粒产量增加的更关键因素。全膜覆土方式下冬小麦产量最高可能是籽粒灌浆期具有灌浆速率快、灌浆时间长、更强的生长势、更高的群体表现等优异特点协同作用的结果。

参 考 文 献:

[1] Niu J Y, Gan Y T, Zhang J W, et al. Postanthesis is dry matter accumulation and redistribution in spring wheat mulched with plastic film [J]. *Crop Science*, 1998, 38: 1562-1568.

[2] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat field[J]. *Crops Research*, 1999, 63: 79-86.

[3] 李 福, 刘广才, 李诚德, 等. 旱地小麦全膜覆土穴播技术的土壤水分效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 73-78.

[4] 张 静, 李 福, 刘广才, 等. 甘肃发展全膜覆土穴播技术的主要方式[J]. *甘肃农业科技*, 2013, 2: 56-58.

[5] 马全林. 2MBXF-120/140 型旋耕覆膜覆土播种机的研制与使用[J]. *农业技术与装备*, 2013, (12): 38-39.

[6] 李 福, 刘广才, 李城德, 等. 甘肃省旱地小麦全膜覆土穴播栽培技术规程[J]. *甘肃农业科技*, 2012, 2: 49-51.

[7] 李 福, 李城德, 刘广才, 等. 甘肃发展旱地全膜覆土穴播技术的重要意义[J]. *农业科技与信息*, 2010, 23: 3-5.

[8] 王虎全, 韩思明, 唐拴虎, 等. 渭北旱原冬小麦全程地膜覆盖超高产栽培技术研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 24-30.

[9] 董 钻, 沈秀英. 作物栽培学总论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[10] Bidinger F, Musgrave R B, Fischer R A. Contribution of stored pre-anthesis assimilates to grain yield in wheat and barley[J]. *Nature*, 1977, 270: 431-433.

[11] 阎世理, 蒋纪芸, 潘世录, 等. 陕西关中地区春小麦生长发育规律的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1987, 15(1): 17-24.

[12] 王荣栋, 陶光琰, 唐慧江, 等. 新疆春大麦干物质积累、分配和产量形成的研究[J]. *大麦科学*, 1994, (4): 21-23.

[13] 张 娟, 崔俊群, 范 平, 等. 小麦冠层结构与产量及其构成因素的典范相关分析[J]. *华北农学报*, 2000, 15(3): 39-44.

[14] 陈玉华, 张岐岐, 田海燕, 等. 地膜覆盖及施用有机肥对地温及冬小麦水分利用的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(3): 59-63.

[15] 张保军, 韩 海, 朱芬萌, 等. 地膜小麦土壤温度动态变化研究[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(1): 59-62.

[16] 王有宁, 王荣堂, 董秀荣, 等. 地膜覆盖棉花、玉米、大豆地的降温效应研究[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(4): 45-47.

[17] 夏自强, 蒋洪庚, 李琼芳, 等. 地膜覆盖对土壤温度、水分的影响及节水效益[J]. *河海大学学报*, 1997, 25(2): 39-44.

[18] Gan Y T, Stobbe E H. Seedling vigor and grain yield of Roblin wheat affected by seed size[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 456-460.

[19] Borrell A K, Incoll L D, Simpson R J, et al. Partitioning of dry matter and the deposition and use of stem reserves in a semi - dwarf wheat crop[J]. *Annals of Botany*, 1989, 63: 527-539.

[20] Gent M P N, Kiyomoto R K. Assimilation and distribution of photosynthate in winter wheat cultivars differing in harvest index[J]. *Crop Science*, 1989, 29: 120-125.

[21] Kiniry J R. Nonstructural carbohydrate utilization by wheat shaded during grain growth[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 844-849.

[22] 王鹤龄, 王润元, 牛俊义, 等. 黄土高原地膜春小麦地上干物质累积与转运规律[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(1): 28-32.

(上接第 116 页)

[8] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. *Soil Biol. Biochem*, 1997, 29(12): 1647-1653.

[9] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(2): 253-263.

[10] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 159-165.

[11] 窦 森, 李 凯, 关 松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418.

[12] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14):

2099-2103.

[13] Christensen B T. Carbon in primary and secondary organ mineral complexes[C]//Cater M R, Stewart A B, et al. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 1996: 97-165.

[14] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 等. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(5): 451-455.

[15] 韩春丽, 刘 娟, 张旺锋, 等. 新疆绿洲农田土壤 - 棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6234-6241.

[16] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. *生态学报*, 2004, 12(12): 2961-2966.