

不同施肥条件下微生物对棕壤团聚体和碳分布的影响*

王亮¹ 孙向阳¹ 刘克锋²

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京农学院城乡发展学院,北京 102206)

【摘要】 以北京市延庆县绿富隆有机肥蔬菜研究基地长期定位肥料试验地为试验平台,利用湿筛法获得不同粒级的团聚体,通过 16SrDNA-PCR-DGGE 技术进行测序分析,研究不同施肥条件下微生物群落对棕壤土团聚体和碳分布的影响。结果表明,有机肥(OF)处理的 0.25~2 mm 水稳性团聚体增加,增加幅度为 109.0%;0.053~0.25 mm 和小于 0.053 mm 粒级团聚体的含量均下降,与 CK(不施肥)相比分别下降了 31.9% 和 142.1%。OF 处理对土壤各粒级团聚体中碳含量均有显著提高,与 CK 相比,提高 15.2%~46.9%,其中大于 2 mm 团聚体中碳含量提高了 46.9%。棕壤碳含量与大于 2 mm 粒级团聚体含量呈正相关;与 0.25~2 mm 粒级团聚体呈极显著正相关;与 0.053~0.25 mm 粒级团聚体含量呈极显著负相关;与小于 0.053 mm 粒级团聚体呈显著负相关。

关键词: 肥料 棕壤 团聚体 群落演替 碳

中图分类号: S152.4; S141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0057-05

Effect of Microbial on Carbon Distribution in Brown Soil
Aggregates under Different Fertilization

Wang Liang¹ Sun Xiangyang¹ Liu Kefeng²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Urban and Rural Development, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract

Various particle-size fractions of soil aggregates were obtained with the wet-screening method from the soil of a long-term stationary fertilization experimental field of Beijing Yanqing Lvfulong organic vegetables farms to analyze the effect of microbial communities on carbon distribution in brown soil aggregates under different fertilizations with sequence analysis by 16SrDNA-PCR-DGGE technology. Results showed that with different fertilization treatments, treatments OF (organic fertilizer) increased 0.25~2 mm water stable aggregates by 109.0%; compared to CK (unfertilized), 0.053~0.25 mm and 0~0.053 mm particle aggregates decreased by 31.9% and 142.1%, respectively. Treatments OF significantly increased carbon content in aggregates of all particle sizes by 15.2%~46.9% compared to CK, and in the >2 mm aggregates by 46.9%. The content of brown soil carbon was positively related to the content of the >2 mm aggregates; significantly positive related to the content of the 0.25~2 mm aggregates, but significantly negative related to the content of the 0.053~0.25 mm aggregates; negative related to the content of the 0~0.053 mm aggregates.

Key words Fertilizer, Brown soil, Aggregate, Microbial communities, Carbon

引言

提高我国土壤碳储量,对于农业的可持续发展

和应对全球气候变暖趋势意义重大^[1~5]。土壤碳对土壤团聚体的分布和数量具有十分重要的影响,而团聚体的形成作用是土壤碳蓄积的重要机制,特别

收稿日期: 2011-10-08 修回日期: 2011-10-28

* 北京市教育委员会科技成果转化与产业项目和北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR201007140)

作者简介: 王亮,博士生,主要从事畜禽粪便无害化处理研究,E-mail: wlyyayl@163.com

通讯作者: 孙向阳,教授,主要从事固体废弃物处理研究,E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

是土壤团聚体对碳的物理保护。施肥是影响土壤团聚体形成的重要因素,尤其是有机肥中含有的各种微生物不仅是土壤的重要组成部分,也是土壤物质循环和能量流动的主要推动者。施用有机肥不仅可以减缓大团聚体的转化,有利于微团聚体产生,也可以提高团聚体和土壤碳固定^[6]。

土壤碳库的积累受植被退化、土壤侵蚀和流失等诸多因素的影响^[7]。20 世纪 80 年代以来,我国华北地区的碳储量一直缓慢上升。施肥对土壤碳累积有重要作用^[8],但是对不同施肥条件下,微生物群落变化影响团聚体的形成和全碳含量相关关系的研究较少。本文以该地区长期定位试验为基础,利用分子生物学方法(16SrDNA 序列分析技术)分析不同施肥条件下土壤微生物群落的变化及微生物群落的变化对土壤团聚体和土壤全碳分布的影响,试图揭开华北棕壤土固碳的机制,也为改善土壤结构、提高土壤生产力、减缓温室效应等提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2011 年 8 月采自北京市延庆县绿福隆有机肥蔬菜研究基地(N 40.4°,E 115.9°)的长期定位肥料试验地。当地年平均气温 12.6℃,年降水量 489 mm,气候干燥度 0.6~0.7。试验开始于 2009 年,小区面积 400 m²,供试土壤类型属典型棕壤土。土壤成分含量为:有机碳 20.90 g/kg、全氮 2.01 g/kg、全磷 1.54 g/kg、速效钾 225.3 mg/kg,pH 值 6.4。种植方式为玉米-大豆轮作,每年一季。本文选择施用玉米种植区不施肥(CK)、化肥(F)、复混肥(CF,50%化肥+50%有机肥)和有机肥(OF)4 个处理,供试肥料中化肥为尿素、过磷酸钙、硫酸钾的混合肥,有机肥为发酵腐熟牛粪。施肥量为尿素 33.28 kg/hm²,过磷酸钙 82.47 kg/hm²,硫酸钾 11.92 kg/hm²,有机肥施用量 20 000 kg/hm²。每个处理设 3 个重复小区,每个小区采样 1 次,深度 0~20 cm,采样时 4 个处理土壤有机碳含量为 21.20~26.81 g/kg,全氮含量为 1.11~1.52 g/kg。

1.2 分析方法

1.2.1 土壤 DNA 提取

在裴雪霞^[9]土壤微生物基因组 DNA 提取方法基础上,略作改进:

(1) 提取。称取 8 g 在 -20℃ 下取出完全解冻的土壤样品置于 50 mL 离心管中,加入少量玻璃珠、13.5 mL DNA 提取液(1% CTAB, pH 值 8.0; 0.1 mol/L EDTA, pH 值 8.0; 0.1 mol/L Tris-HCl, pH

值 8.0; 1.5 mol/L NaCl; 0.1 mol/L 磷酸缓冲液, pH 值 8.0)、150 μL 蛋白酶 K(10 mg/mL)和 50 μL 溶菌酶(20 mg/mL),225 r/min 振动 30 min(37℃)。向离心管中加入 1.5 mL 20% SDS,65℃ 水浴 30 min,其间每隔 10 min 轻轻颠倒几下,-80℃ 冷冻 40 min,反复冻融 3 次,65℃ 保温 30 min。室温 6 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,转移到另一干净的 50 mL 离心管中。沉淀中再加入 4.5 mL DNA 提取液和 0.5 mL 20% SDS,用力震动,沉淀全部摇起来后 65℃ 水浴 10~20 min,室温 6 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,两次的上清液合并。

(2) 抽提。加入与上清液等体积的氯仿与异戊醇(体积比 24:1)混合液,6 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液转移至另一 50 mL 离心管中。

(3) 沉淀。以 0.6 倍体积的异丙醇在室温下沉淀 1 h,室温下 10 000 r/min 离心 20 min,收集核酸沉淀。

(4) 洗涤。用预冷的 70% 乙醇洗涤 3 次,通风橱中吹干,得到粗提的 DNA,4℃ 保存。

(5) 纯化。用 100 μL 灭菌的去离子水溶解粗提 DNA,用 0.7% 的琼脂糖凝胶电泳 80 V 处理 150 min,将大约 23 kb 的 DNA 条带用灭菌手术刀切下,按照上海申能博采生物科技有限公司的胶回收试剂盒(型号 K132DNA)操作说明进行纯化,用 0.8% 的琼脂糖凝胶电泳 120 V 处理 40 min 检测。

1.2.2 16SrDNA-PCR 扩增条件

(1) 引物
338F:5'—CGC CCG CCG CGC GCG GCG GCG GCG GCG GCA CGG GGG GAC TCC TAC GGG AGG CAG CAG—3';
518R:5'—ATT ACC GCG GCT GCT GG—3'。

(2) 扩增体系
25 uL 体系含 2.5 uL 10 × Buffer, 2 uL dNTP, 0.5 uL TagDNA 聚合酶(Promega 公司,USA),引物各 0.5 uL,DNA 模板 1.5 uL。

(3) PCR 反应条件
95℃ (1.5 min)—[95℃ (30 s)—退火温度(如下 30 s)—72℃ (1 min)] (25cycles)—72℃ (10 min)—60℃ (10 min)—4℃,保存。退火温度依次是 60℃ (5cycles), 55℃ (5cycles), 50℃ (15cycles)。EZ-10PCR 纯化试剂盒(BBI 公司,Canada)纯化 PCR 产物。

1.2.3 PCR-DGGE 分析、测序和同源性分析

采用 Bio-RAD 公司 Decode 基因突变检测系统,对扩增的 PCR 反应产物进行变性梯度凝胶电泳(denaturing gradient gel electrophoresis,简称 DGGE)

分离,产物按 1.2.2 节中的 PCR 处理后在线 NCBI 测序,利用 DNAMAN 进行同源性分析。

1.2.4 团聚体分析

湿筛法采用 Cambardella 和 Elliott^[10]略作修改,利用自动振荡筛(套筛直径为 2、0.25、0.053 mm)对土壤团聚体进行分级。具体操作为:称取风干土样 100 g,置于 2 mm 的筛子上,在室温条件下用蒸馏水浸润 5 min,然后以 30 次/min 的速度在蒸馏水中振荡 2 min,上下振幅为 3 cm,将筛上的团聚体冲洗至烧杯中,小于 0.053 mm 水稳性团聚体则需在筒内沉降 48 h,弃去上清液后,将团聚体转移至烧杯中。将盛有团聚体的烧杯置于 50℃ 条件下干燥,称量,计算各粒级团聚体的组成,同时将干燥的团聚体磨细过 0.25 mm 筛备用。

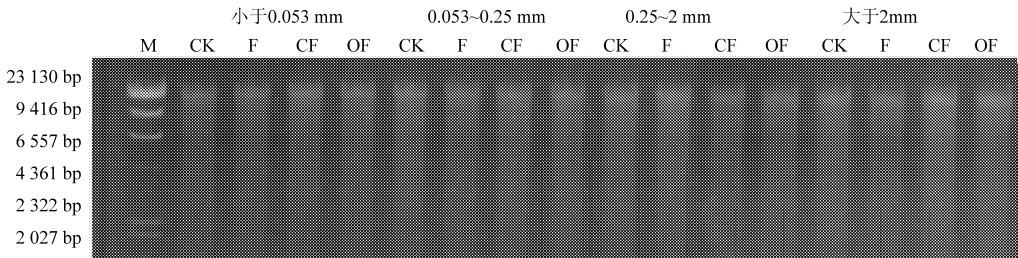


图 1 不同施肥处理土壤总 DNA 提取

Fig. 1 Total DNA extraction of the soil with different fertilization treatments

2.1.2 PCR-DGGE 分析

由图 2 和表 1 可知,经 CK、F、CF 和 OF 处理后土壤各粒级团聚体的生物多样性分布,粒级 0.053 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 2 mm PCR-DGGE 条带数最多,故微生物种类居多。且 OF 处理的土壤各粒级团聚体中微生物数量最高,0 ~ 0.053 mm、0.053 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 2 mm 的生物多样性也处于最高。大于 2 mm 的土壤虽生物多样性较少,但微生物数量同比

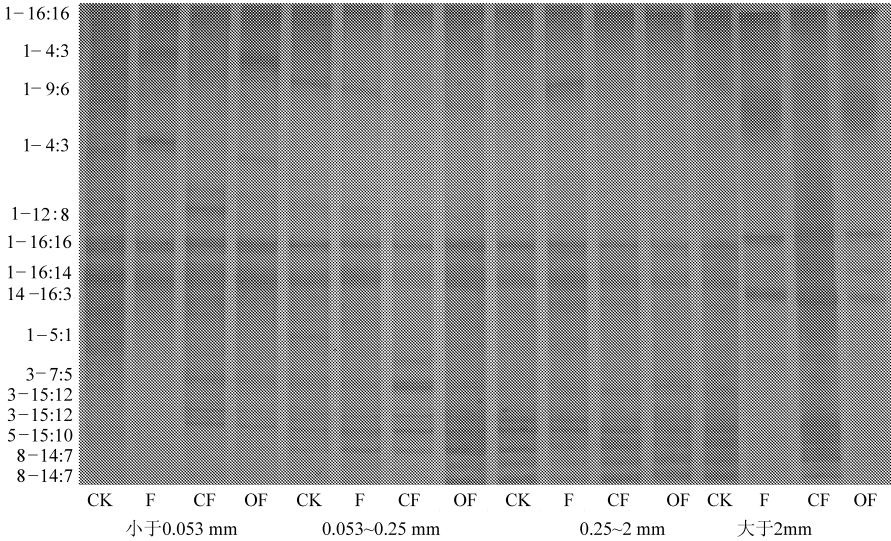


图 2 不同施肥处理下土壤各粒级团聚体 PCR-DGGE

Fig. 2 PCR-DGGE of the particles of soil aggregates with different fertilization treatments

1.3 数据处理

数据经 Excel 2003 整理后,采用 SPSS 12.0 统计软件进行相关性分析和 Duncan 极差 5% 水平的差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤微生物变化

2.1.1 土壤总 DNA 提取

由图 1 可知,CK、F、CF 和 OF 处理的各粒级总 DNA 提取都在 23 kb 以上,说明土壤微生物提取完全,为图 2 的 PCR-DGGE 电泳微生物多态性分离和表 1 的微生物数量测定提供了充足的依据。(图 2 左侧数字 A-B:C 模式中,A 和 B 表示从第 A 个土样到第 B 个土样,C 表示同一微生物出现的次数。)

仍然最高。

从表 2 得出,CK、F、CF 和 OF 处理土壤各粒级团聚体均有的 1 - 16 微生物为 *Butyrivibrio fibrisolvens*(溶纤维丁酸弧菌)和 *Pseudomonas sp*(假单胞菌属),两种微生物都具有降解木质素低分子量部分和木质素降解产物的能力且后者数量较大,对土壤中全碳含量提高和团聚体分布有一定的影响。1 - 4:3 为 *Corynebacterium sp*(棒状杆菌),该菌

表 1 不同施肥处理微生物数量变化

Tab.1 Changes in the number of microorganism fertilization with different treatments			
样品	粒级/mm	微生物数量/个·g ⁻¹	条带数
CK	大于 2	3. 8 × 10 ⁵	8
	0. 25 ~ 2	6. 8 × 10 ⁸	9
	0. 053 ~ 0. 25	1. 5 × 10 ⁶	9
	小于 0. 053	2. 5 × 10 ⁶	9
F	大于 2	4. 0 × 10 ⁵	3
	0. 25 ~ 2	7. 3 × 10 ⁸	9
	0. 053 ~ 0. 25	1. 4 × 10 ⁶	8
	小于 0. 053	2. 6 × 10 ⁶	8
CF	大于 2	5. 2 × 10 ⁶	8
	0. 25 ~ 2	7. 4 × 10 ⁹	9
	0. 053 ~ 0. 25	1. 6 × 10 ⁶	9
	小于 0. 053	2. 7 × 10 ⁶	6
OF	大于 2	2. 2 × 10 ⁷	4
	0. 25 ~ 2	9. 9 × 10 ¹⁰	10
	0. 053 ~ 0. 25	1. 8 × 10 ⁶	11
	小于 0. 053	2. 9 × 10 ⁶	9

种具有较强胞外酶活性,可以分解蛋白类物质,在 OF 处理中大量出现证明长期施用有机肥对微生物种群提供相应的营养物质,为微生物繁殖提供能量保障。1-9:6 为 *Gunnera* (根乃拉草菌),该菌种具有一定的固氮能量,在 0.053~0.25 mm 粒级的土壤中均出现,说明土壤中固氮的微生物菌群出现在该粒级较多。在土壤粒级为 0.053~0.25 mm 和 0.25~2 mm 中大量出现的 5-15:10 为 *Streptosporangiaceae* (高温单胞菌)、8-14:7(1) 为 *Ruminococcus albus* (丙酸杆菌)、8-14:7(2) 为 *Flavobacterium sp* (链孢囊菌),其具有固氮和部分抗细菌、真菌繁殖的功能,这解释了在大于 2 mm 的土壤团聚体中 OF 处理中微生物种类少但数量不少的原因。

表 2 PCR-DGGE 后测序结果

Tab.2 Sequencing results of PCR-DGGE		
条带分布	NCBI 测序结果(登录号)	相似度/%
1-16:16	<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i> (AM039822.1)	99
1-4:3	<i>Corynebacterium sp</i> (GU304633.1)	100
1-9:6	<i>Gunnera</i> (GQ998357.1)	100
1-4:3	<i>Uncultured</i> (AB241680.1)	97
1-12:8	<i>Pseudonocardia sp</i> (DQ343763.1)	92
1-16:16	<i>Pseudomonas sp</i> (GU570645.1)	99
1-16:14	<i>Shigella sp</i> (JN001312.1)	100
14-16:3	<i>Psychrobacter sp</i> (HM468114.1)	100
1-5:1	<i>Finegoldia magna</i> (AB640691.1)	100
3-7:5	<i>Thermomonospora</i> (AB588631.1)	97
3-15:12	<i>Actinomadura sp</i> (AB562487.1)	99
3-15:12	<i>Propionibacterium sp</i> (AB453308.1)	100
5-15:10	<i>Streptosporangiaceae</i> (AF345861.1)	98
8-14:7(1)	<i>Ruminococcus albus</i> (CP002403.1)	92
8-14:7(2)	<i>Flavobacterium sp</i> (HQ917670.1)	97

2.2 不同施肥处理的土壤全碳量分析

2.2.1 团聚体的组成

从图 3 可见,在 CK、F、CF 和 OF 处理中,随着粒级的减少团聚体呈现先增加后减少的趋势。与 Manna 等^[11]和李凯等^[12]研究一致,该 4 个粒级团聚体中,0.25~2 mm 为优势粒级团聚体,范围在 27.5%~57.6% 之间。说明 0.25~2 mm 粒级是大团聚体的重要组成部分。

施用有机肥后大团聚体含量增加,微团聚体含量减少(图 3)。说明施用有机肥更能促进大团聚体的形成,与 CK 相比,F、CF 和 OF 处理中,施用 OF 的 0.25~2 mm 粒级团聚体的含量显著增加,增加了 109.0%;0.053~0.25 mm 和小于 0.053 mm 粒级团聚体的含量均下降,与 CK 相比分别下降了 31.9% 和 142.1%。另外从表 1 可知,在长期施用有机肥(OF)后,微生物数量(9.9×10⁹个/g)和生物多样性(10 条带)都显著提高。

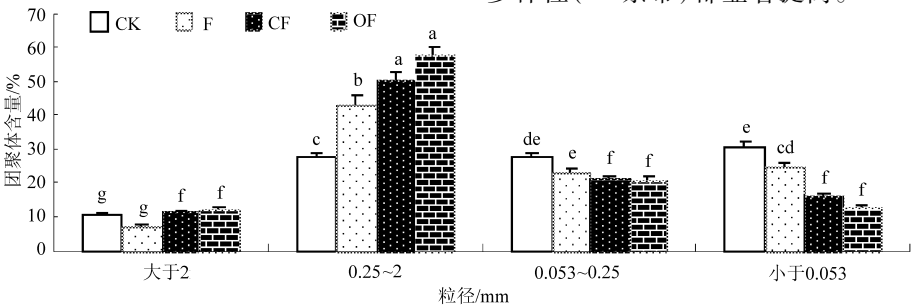


图 3 土壤各粒级团聚体含量柱图

Fig.3 Contents of various particle-size soil aggregates

由此推出,0.25~2 mm 粒级团聚体的形成与微生物多样性和数量呈正相关,所以长期施用有机肥可以显著提高土壤水稳性大团聚体的形成。

2.2.2 团聚体的全碳含量

图 4 显示了团聚体的全碳含量,除 CF 和 OF 处理中的大于 2 mm 土壤团聚体有差异外(虽然 OF 处理中微生物多样性减少为 4 条带,但数量仍为最高

2.2×10^7 个/g,证明外来微生物群体已经成为粒径大于 2 mm 土壤中的微生物主体,因有机肥中含有大量分解纤维素的菌种,全碳含量有明显增加),F 处理各粒级团聚体间没有明显差异。随着粒级的减少团聚体全碳含量逐渐下降,OF 和 CF 处理的表现尤为明显,与 CK 相比,大于 2 mm 粒级团聚体增长幅度为 46.9% 和 13.0%。

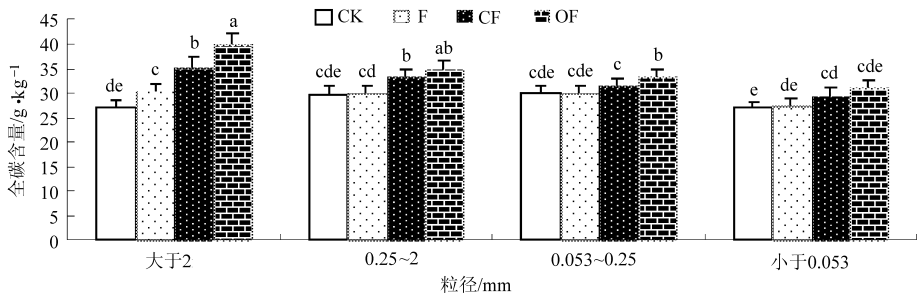


图 4 土壤各粒级团聚体全碳含量柱图
Fig. 4 Contents of carbon in various particle-size soil aggregates

2.2.3 团聚体全碳含量与各粒级含量的相关性

表 3 表明,团聚体全碳含量与大团聚体含量呈正相关,与微团聚体含量呈显著负相关。大于 2 mm 粒级团聚体的含量与团聚体的碳含量呈正相关。0.25~2 mm 粒级团聚体的含量与团聚体碳量间呈极显著正相关,0.053~0.25 mm 粒级团聚体的含量与该粒级的碳量间呈极显著负相关。小于 0.053 mm 粒级团聚体含量与该粒级的碳量间呈显著负相关。

3 结论

(1) 施肥处理主要增加了棕壤中大粒级水稳性团聚体含量,其中 0.25~2 mm 水稳性团聚体大量增加,而 OF 处理因微生物数量和种类的特异性而增加最多,CF 处理次之。

(2) 施肥的 4 个处理中,只有大于 2 mm 的 CF 和 OF 处理碳增加较为明显(有机肥中纤维素和木质素分解菌群对固碳帮助尤为明显),其他均无明显变化。证明有机肥的施用可以促进棕壤水稳性大团聚体形成和碳量的增加。

(3) 棕壤团聚体全碳含量与大团聚体含量呈正相关,与微团聚体含量呈显著负相关。大于 2 mm 粒级团聚体的含量与团聚体的碳含量呈正相关。0.25~2 mm 粒级团聚体的含量与团聚体碳量间呈极显著正相关,0.053~0.25 mm 粒级团聚体的含量与该粒级的碳量间呈极显著负相关。小于 0.053 mm 粒级团聚体含量与该粒级的碳量间呈显著负相关。

表 3 土壤团聚体含量与团聚体碳含量的相关关系		
Tab.3 Correlation between soil aggregates content and carbon content		
粒径/mm	线性方程	相关系数
大于 2	$Y = 0.3438x - 0.6777$	$R^2 = 0.3850 (n = 8, p < 0.05)$
0.25 ~ 2	$Y = 2.282x - 29.018$	$R^2 = 0.7077 (n = 7, p < 0.01)$
0.053 ~ 0.25	$Y = -1.970x + 83.527$	$R^2 = 0.7274 (n = 8, p < 0.01)$
小于 0.053	$Y = -2.129x + 82.04$	$R^2 = 0.6264 (n = 8, p < 0.05)$

参 考 文 献

1 Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions; a review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998,51(2):123~137.

2 刘晓利,何园球,李成亮,等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报,2009,46(2):255~262.

Liu Xiaoli, He Yuanqiu, Li Chengliang, et al. Distribution of soil water-stable aggregates and soil organic C, and P in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 255~262. (in Chinese)

3 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 施肥措施对棕土旱塬区小麦产量和土壤有机碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1333~1338.

Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Effects of fertilization on wheat yield and soil organic carbon accumulation in rainfed loessial tablelands [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1333~1338. (in Chinese)

- China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(6): 7~9. (in Chinese)
- 2 施卫东,王洪亮,余学军. 深井泵的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械,2009,27(1):64~68.
Shi Weidong, Wang Hongliang, Yu Xuejun. Development and prospect of deep well pump in China [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1):64~68. (in Chinese)
 - 3 Shi W D, Lu W G, Wang H L, et al. Research on the theory and design methods of the new type submersible pump for deep well [C]//ASME Conference Proceedings, FEDSM2009, 2009, 1: 91~97.
 - 4 杨志伟,曹树良,王国玉,等. 离心泵叶轮进口边位置的研究[J]. 水泵技术,2002(6):8~11.
Yang Zhiwei, Cao Shuliang, Wang Guoyu, et al. Position research on impeller inlet edge of centrifugal pump [J]. Pump Technology, 2002(6): 8~11. (in Chinese)
 - 5 罗先武,张瑶,彭俊奇,等. 叶轮进口几何参数对离心泵空化性能的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008, 48(5):836~839.
Luo Xianwu, Zhang Yao, Peng Junqi, et al. Effect of impeller inlet geometry on centrifugal pump cavitation performance [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(5):836~839. (in Chinese)
 - 6 张人会,张学静,杨军虎. 非设计工况下叶轮进口附近的流动及其控制[J]. 甘肃工业大学学报,2003,29(4):64~66.
Zhang Renhui, Zhang Xuejing, Yang Junhu. Flow field around intake of impeller under off-design conditions and its control [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(4): 64~66. (in Chinese)
 - 7 袁建平,袁寿其,何志霞,等. 离心泵内部流动测试研究进展[J]. 农业机械学报,2004,35(4):188~191.
Yuan Jianping, Yuan Shouqi, He Zhixia, et al. Research advance in flow of centrifugal pumps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4):188~191. (in Chinese)
 - 8 罗惕乾. 流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
 - 9 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):69~73.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):69~73. (in Chinese)
 - 10 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.
 - 11 Feng J J, Benra F K, Dohmen H J. Investigation of periodically unsteady flow in a radial pump by CFD simulations and LDV measurements[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1):011004-1~011004-11.

(上接第 61 页)

- 4 Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community in a paddy soil derived from quaternary red clay [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 36(2~3): 84~91.
- 5 Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau [J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 486~495.
- 6 Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14):2009~2103.
- 7 中国科学院棕土高原综合科学考察队. 棕土高原地区土壤资源及合理利用[M]. 北京:中国科学技术出版社,1991: 155~204.
- 8 郭胜利,高会议,党廷辉. 施氮水平对棕土旱塬区小麦产量和土壤有机碳/氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009,15(4):808~814.
Guo Shengli, Gao Huiyi, Dang Tinghui. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009,15(4): 808~814. (in Chinese)
- 9 裴雪霞. 典型种植制度下长期施肥对土壤微生物群落多样性的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- 10 Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. SSSAJ, 1993, 57(4):1071~1076.
- 11 Manna M C, Swarup A, Wanjari R H. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2):397~409.
- 12 李凯,窦森,韩晓增,等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. 土壤学报,2010,47(3):578~583.
Li Kai, Dou Sen, Han Xiaozeng, et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(3):578~583. (in Chinese)