

生物炭对豫西丘陵区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响

悦飞雪¹, 李继伟², 乔鑫鑫¹, 焦念元¹, 尹飞¹, 郭大勇¹, 王艳芳¹, 刘领¹

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023;

2.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究生物炭对豫西丘陵地区农田土壤团聚体分布、稳定性及其碳、氮在团聚体中分布的影响,进一步探明生物炭对丘陵区农田土壤结构和养分的长期作用效果。采用田间长期定位试验,生物炭用量为0(C0),20(C20),40(C40)t/hm² 3个处理,研究生物炭施用5年后对土壤团聚体组成及稳定性的影响,探究土壤团聚体中有机碳和全氮分布特性。结果表明:施加20,40 t/hm²生物炭可提高0—20,20—40 cm土层的机械性>0.5 mm以上粒级和水稳性>0.053 mm以上粒级团聚体含量。在0—20 cm土层中,C20和C40处理下>0.25 mm的机械性团聚体(DR_{0.25})分别较对照增加3.78%和6.83%,>0.25 mm水稳性团聚体(WR_{0.25})分别较对照增加31.0%和49.45%,土壤不稳定团粒指数(E_{LT})分别较对照降低4.30%和6.85%,土壤团聚体破坏率(PAD)分别较对照降低9.71%和14.77%,土壤团聚体平均质量直径(MWD)分别较对照增加28.44%和45.34%,几何平均直径(GMD)分别较对照增加32.04%和54.92%。各粒级的有机碳和全氮含量随生物炭施用量的增加而增加,有机碳和全氮含量都以0.25~0.053 mm粒级最高,且0—20 cm土层的有机碳和全氮含量高于20—40 cm土层的有机碳和全氮含量;随着生物炭施用量的增加,>2,2~0.25,0.25~0.053 mm粒级团聚体有机碳和全氮贡献率随之增加,而<0.053 mm粒级微团聚体有机碳和全氮贡献率随之降低。总体来说,生物炭能够改善豫西丘陵地区农田土壤的团聚体结构,增加土壤大团聚体的含量,增强团聚体的稳定性,提高土壤团聚体中碳、氮含量,有利于豫西地区农田土壤肥力的保持和持续健康发展。

关键词:生物炭; 丘陵地区农田; 土壤团聚体; 有机碳; 全氮; 贡献率

中图分类号:S152.3⁺2; S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0265-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.037

Effects of Biochar Application on Soil Aggregates Stability and Organic Carbon and Total Nitrogen Distribution in the Hilly Area of Western Henan Province, China

YUE Feixue¹, LI Jiwei², QIAO Xinxin¹, JIAO Nianyuan¹,
YIN Fei¹, GUO Dayong¹, WANG Yanfang¹, LIU Ling¹

(1.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang,

Henan 471023; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to investigate the effects of biochar application on soil aggregates stability, organic carbon, and total nitrogen distribution, further elucidate the long-term effective mechanism of biochar addition on farmland in the hilly area of western Henan Province, China, a 5-years field experiment was conducted to explore the effects of biochar application (0 (C0), 20 (C20), 40 (C40) t/hm²) on soil aggregates composition and stability, and illustrated the distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in soil aggregates. The results showed that biochar application with 20 and 40 t/hm² increased the contents of >0.5 mm mechanical and >0.053 mm water stable aggregates. In the 0—20 cm soil layer, compared with the control, C20 and C40 treatments increased the >0.25 mm mechanical aggregate (DR_{0.25}) by 3.78% and 6.83%, increased >0.25 mm aggregate water stability (WR_{0.25}) by 31.0% and 49.45%,

收稿日期:2019-05-23

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301101);国家自然科学基金项目(31700367);河南省自然科学基金项目(182300410163);河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2016GGJS-062);河南科技大学学科提升振兴A计划项目(13660002)

第一作者:悦飞雪(1990—),女,河南滑县人,硕士研究生,主要从事退化土壤生态修复研究。E-mail: yuefeixue1935@126.com

通信作者:刘领(1978—)男,河南项城人,博士,副教授,主要从事农业生态研究。E-mail: liulinghenan@126.com

decreased unstable soil aggregate index (E_{LT}) by 4.30% and 6.85%, decreased proportion of soil aggregate destruction (PAD) by 9.71% and 14.77%, increased the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates by 28.44% and 45.34%, and increased the geometric mean diameter (GMD) significantly by 32.04% and 54.92%. The content of organic carbon and total nitrogen increased with the increase of biochar application rates in each size fraction, was the highest in 0.25~0.053 mm aggregate. The contents of organic carbon and total nitrogen in 0—20 cm soil layer was higher than that in the 20—40 cm soil layer. With the increase of biochar application amounts, the contribution rates of organic carbon and total nitrogen increased at >2, 2~0.25 and 0.25~0.053 mm aggregates, and the contribution rates of organic carbon and total nitrogen decreased at <0.053 mm aggregate. In general, biochar improved the soil aggregate structure, increased the content and stability of soil macro-aggregate, and increased the contents of organic carbon and total nitrogen in each size fraction, which was beneficial to maintain the soil fertility and the long-term healthy development of farmland in the hilly area of western Henan Province.

Keywords: stalk-derived biochar; hilly area farmland; soil aggregates; organic carbon; total nitrogen; contribution rate

农田土壤是受人类活动影响最大的土壤类型之一^[1],我国北方丘陵地区是我国农业生产的重要组成部分,因该地区干旱少雨和近年来不合理的农业管理措施(如农药和化肥的过度施用等)导致土壤结构破坏,土壤持水保肥能力下降,土壤团聚体含量减少,生产效率降低等一系列问题,严重制约了农业土地健康和可持续发展^[2-3]。因此,进一步了解丘陵区农田土壤退化的成因与过程,寻找改善土壤结构及肥力的经济有效途径是农业生态建设和生产中亟待解决的问题。

近年来,生物炭作为一种有效的农业废弃物加工产物,具有比重小、比表面积大、吸附性强等特点,已成为国内外学者的研究热点^[3-4]。生物炭在农业生产中表现出重要生态功能,包括改善土壤结构、促进养分利用及降低环境污染等^[4]。有研究^[5]表明,生物炭的有机碳含量较高,施入土壤中可增加有机碳含量,有利于土壤团聚体的形成和稳定,增加土壤的通气性和持水性^[6]。土壤团粒结构是土壤肥力的物质基础,与土壤的物理、化学、生物过程密切相关,同时土壤团聚体的稳定性是反映土壤结构稳定性重要标志^[7]。Khademalrasoul 等^[8]研究发现,施用生物炭能够使土壤团聚体稳定性增加,分散性降低,随着生物炭施用量增加团聚体的抗拉强度和抗破坏力增强,可有效提高土壤的质量,增加土壤抗侵蚀能力。Liu 等^[9]研究表明,施加生物炭可显著增加粉壤土团聚体中有机碳含量和土壤大团聚体含量,但对沙壤土团聚体的形成和稳定无显著影响。侯晓娜等^[10]研究表明,生物炭与秸秆配施可提高土壤大团聚体含量和稳定性,但单独施用生物炭处理无显著影响;Zhou 等^[11]研究表明,生物炭对沙壤土的持水能力有一定的增强作用,但对土壤团聚体的影响无显著作用。由于生物炭材料、裂解温度、施用量及土壤类型等因素的差异使土

壤对生物炭的反应差异较大。目前,生物炭在土壤团聚体的形成和稳定方面的长期影响已有不少报道,但研究结果尚存在较大争议,且生物炭对北方丘陵区农田土壤团聚体的影响还缺乏长期的相关研究。鉴于此,本研究通过施加不同生物炭量的 5 年田间定位试验,研究生物炭对农田土壤团聚体分布、稳定性及有机碳和全氮含量的影响,期为生物炭在豫西丘陵地区农田土壤结构改善和培肥方面的应用提供理论基础,同时为农田土壤利用的可持续发展提供方法。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间长期定位试验于 2013 年 10 月至 2018 年 10 月在河南科技大学开元校区农场(34°25'N,111°38'E)进行。该地区属于半干旱大陆性季风气候,年均气温 13.7℃,年日照时间 2 217.6 h,年均无霜期 216 d,年降水量 600~800 mm,降水较少且分布不均,以雨养农业为主。供试土壤类型为黄潮土,土壤基本理化性质:pH 7.4(土水比为 1:2.5),有机质含量 12.2 g/kg,全氮含量 1.05 g/kg,有效磷含量 9.0 mg/kg,速效钾含量 118.5 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设 3 个生物炭施用量处理,分别为 C0 (0 t/hm²)、C20 (20 t/hm²)、C40 (40 t/hm²),每个处理 3 个重复小区,小区的面积为 32 m²(4 m×8 m),共 9 个小区,随机区组排列。供试生物炭材料为河南商丘三利新能源有限公司生产的小麦秸秆生物炭(于 450℃条件下小麦秸秆限氧热裂解制成),基本理化性质为:pH 10.4,比表面积为 8.92 m²/g,全碳含量 52.2%,全氮含量 5.9 g/kg,全磷含量 0.89 g/kg,全钾含量 23.2 g/kg。采用小麦—玉米周年复种模式,每年 10 月种植小麦,6 月小麦收获后种植玉米。供试小麦品种为

“洛早6号”,播量为 160 kg/hm^2 ,行距 20 cm ,氮、磷、钾复合肥(N:P₂O₅:K₂O为26:16:6)作为基肥每季种植前施入,氮、磷、钾施用量分别为 $195,120,45\text{ kg/hm}^2$ 。玉米品种为“郑单958”,玉米行距 60 cm ,株距 25 cm ,种植密度为 $67\ 000\text{ 株/hm}^2$,各处理以 46% 尿素、 12% P₂O₅和 45% K₂O为肥料,每季玉米种植前氮、磷、钾施用量分别为 $80,80,100\text{ kg/hm}^2$,玉米大口期追施氮 120 kg/hm^2 。生物炭在2013年小麦种植前一次性施入,通过翻耕使其与土壤混匀。试验期间田间以雨养方式管理,不进行灌溉,定期除草。于2018年玉米收获后采集土壤样品,测定土壤团聚体分布及稳定性、团聚体有机碳和全氮。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤团聚体分级 每小区采集土层深度为 $0\text{--}20,20\text{--}40\text{ cm}$,按“S”形采样路线选取5个样点,将5个样点土样混合带回实验室(尽量保持土壤结构不被破坏)。机械稳定性团聚体和水稳性团聚体分别采用干筛法和湿筛法^[3]测定;干筛法采用DM180型土壤团粒分析仪,称取去除石块和杂物的风干土样 500 g 放置于土筛上,振荡 2 min ,频率 300 次/min ,共分5级($>2,2\sim 1,1\sim 0.5,0.5\sim 0.25,<0.25\text{ mm}$),筛分,称重,计算各级团聚体质量百分比;湿筛法利用振荡筛对土壤团聚体进行分级,共分4级($>2,2\sim 0.25,0.25\sim 0.053,<0.053\text{ mm}$),将土样中的石块和杂物去除,称取 200 g 土样平铺于 2 mm 筛面上,缓慢加入去离子水,湿润 10 min 后,在去离子水中进行振荡,振幅为 3 cm ,振动频率为 50 次/2 min ,然后将各层筛上的水稳性团聚体分别冲洗至容器中。各粒级组分在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重,称重,研磨,过筛用于测定各粒级有机碳和全氮含量。

$>0.25\text{ mm}$ 的机械稳定性团聚体含量($DR_{0.25}$)、 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳性团聚体含量($WR_{0.25}$)、土壤不稳定团粒指数(E_{LT})、团聚体破坏率(PAD)、平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[12]计算公式分别为:

$$DR_{0.25} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$WR_{0.25} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$E_{\text{LT}} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{PAD} = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i \ln \bar{R}_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \quad (6)$$

式中: W_i 为第 i 粒级团聚体质量所占的百分含量

(%); M_i 为各粒级团聚体质量(g); W_T 为供试土样的总质量(g); \bar{R}_i 为某级团聚体的平均直径(mm)。

1.3.2 土壤团聚体各粒级有机碳、全氮含量测定及贡献率计算 土壤团聚体有机碳含量和全氮含量测定参照鲍士旦^[13]的方法:采用重铬酸钾外加热法(K₂Cr₂O₇-H₂SO₄法)测定有机碳含量;采用半微量凯氏定氮法测定全氮含量。

各粒级团聚体对土壤养分的贡献率计算公式^[3]为:

$$\text{某粒级团聚体的养分贡献率} = \frac{\text{该粒级团聚体养分含量} \times \text{该粒级团聚体含量}}{\text{该土层的该养分含量}} \times 100\% \quad (7)$$

1.4 数据处理和分析

试验数据基础分析和处理间多重比较采用 Excel 2007 及 SPSS 17.0 软件,采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 施用生物炭对土壤团聚体分布的影响

2.1.1 施用生物炭对土壤机械性团聚体分布的影响

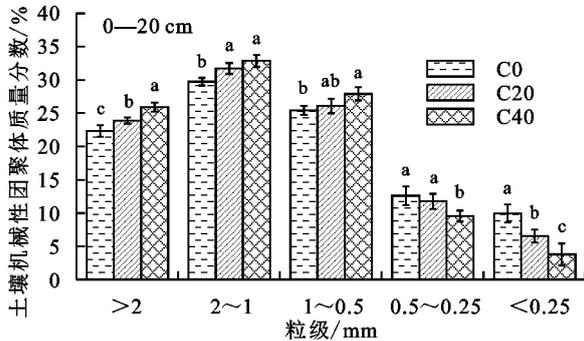
由图1可知,C0、C20和C40处理的土层土壤团聚体粒级分布基本一致, $>2,2\sim 1,1\sim 0.5\text{ mm}$ 3个粒级的团聚体含量较高, $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体含量次之, $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体含量最低。与C0相比,施加生物炭处理的土层 $>2,2\sim 1,1\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级的大团聚体含量增加, $0.5\sim 0.25,<0.25\text{ mm}$ 粒级的小团聚体降低。在 $0\text{--}20\text{ cm}$ 土层中,C20和C40处理下 $>2\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量较对照分别显著增加 7.12% 和 16.19% ($P<0.05$), $2\sim 1\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照显著增加 6.68% 和 10.49% , $1\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照增加 2.62% 和 9.72% , $0.5\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照降低 6.65% 和 24.20% , $<0.25\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照显著降低 34.25% 和 61.94% ;在 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层中,C40处理较C20处理效果好,其中C40处理下 $>2,2\sim 1,1\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照显著增加 13.60% , 8.83% 和 8.01% ($P<0.05$), $0.5\sim 0.25,<0.25\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照显著降低 13.73% 和 58.04% 。

2.1.2 施用生物炭对土壤水稳性团聚体分布的影响

由图2可以看出,不同土层的水稳性团聚体的分布规律基本一致,其中 $<0.053\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量最高, $0.25\sim 0.053,2\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量次之, $>2\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量最少。在 $0\text{--}20\text{ cm}$ 土层中,施加生物炭处理增加了 $>2,2\sim 0.25,0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量($P<0.05$), $<0.053\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量显著降低,C20和C40处理 $>2\text{ mm}$ 粒级的水稳性团聚体含量分别较对照显著增加 54.72% 和 88.35% , $2\sim 0.25\text{ mm}$ 粒级的团聚体含量分别较对照显著增加

24.68%和 39.08%, 0.25~0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量分别较对照显著增加 13.16%和 18.44%, <0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量分别较对照显著降低 19.77%和 30.45%;在 20—40 cm 土层中, C20 和 C40 处理下 >2 mm 粒级的水稳性团聚体含量分别较

对照显著增加 44.27%和 76.07%, <0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量分别较对照显著降低 15.11%和 26.94%。C40 处理增加 2~0.25, 0.25~0.053 mm 粒级的水稳性团聚体含量达到显著水平, 分别较对照增加 28.35%和 19.92%。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同生物炭施用量处理下土壤机械性团聚体分布

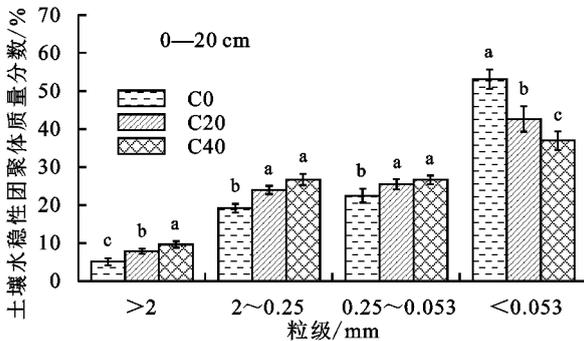
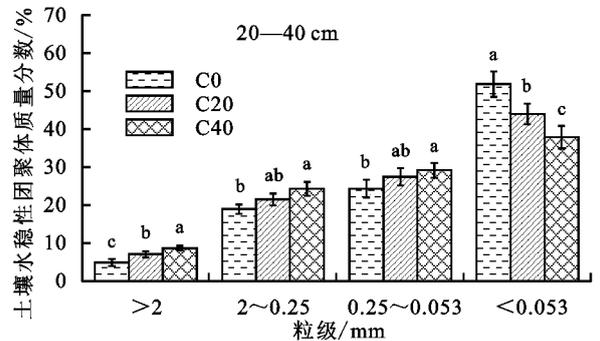
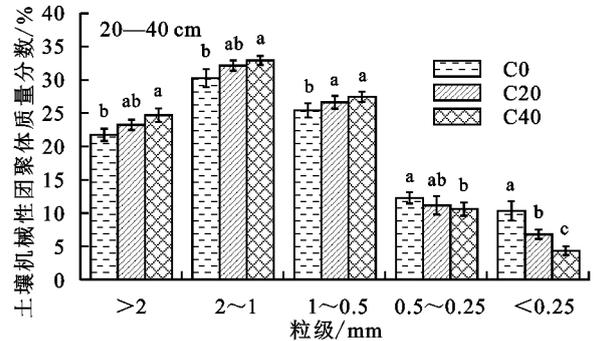


图 2 不同生物炭施用量处理下土壤水稳性团聚体分布



2.1.3 施用生物炭对不同土层 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 的影响 由图 3 可知,除 20—40 cm 土层 C20 处理 $DR_{0.25}$ 含量与 C0 无显著差异以外($P>0.05$),C20 和 C40 处理土层的 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 含量均显著增加($P<0.05$)。在 0—20 cm 土层,C20 和 C40 处理下 $DR_{0.25}$ 含量分别较对照

增加 3.78%和 6.83%;在 20—40 cm 土层,C40 处理下 $DR_{0.25}$ 含量较对照增加 6.67%。在 0—20 cm 土层,C20 和 C40 处理下 $WR_{0.25}$ 含量分别较对照增加 31.00%和 49.45%;在 20—40 cm 土层,C20 和 C40 处理下 $WR_{0.25}$ 含量分别较对照增加 19.83%和 38.19%。

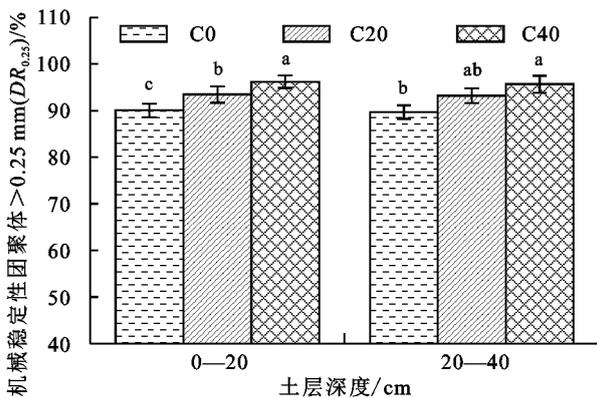


图 3 不同生物炭施用量处理下土壤的 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$

2.2 施用生物炭对不同土层团聚体稳定性的影响

从图 4a 和图 4b 可以看出,在 0—20 cm 土层, C20 和 C40 处理下土壤不稳定团粒指数(E_{LT})和土壤团聚体破坏率(PAD)显著降低($P<0.05$), E_{LT} 分别较 C0 降低 4.30%和 6.85%,PAD 分别较 C0 降低 9.71%和 14.77%;在 20—40 cm 土层,C40 处理下 E_{LT} 和

PAD 显著降低,分别较 C0 降低 5.17%和 10.71%, C20 处理与 C0 相比对降低 E_{LT} 和 PAD 未达到显著水平($P>0.05$)。

从图 4c 和图 4d 可以看出,生物炭处理显著提高土壤团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)($P<0.05$),在 0—20 cm 土层,C20 和 C40 处理

下的 MWD 分别较 C0 增加 28.44% 和 45.34%, GMD 分别较 C0 增加 32.04% 和 54.92%; 在 20—40 cm 土层, C20

和 C40 处理下的 MWD 分别较 C0 增加 19.38% 和 35.97%, GMD 分别较 C0 增加 20.89% 和 41.99%。

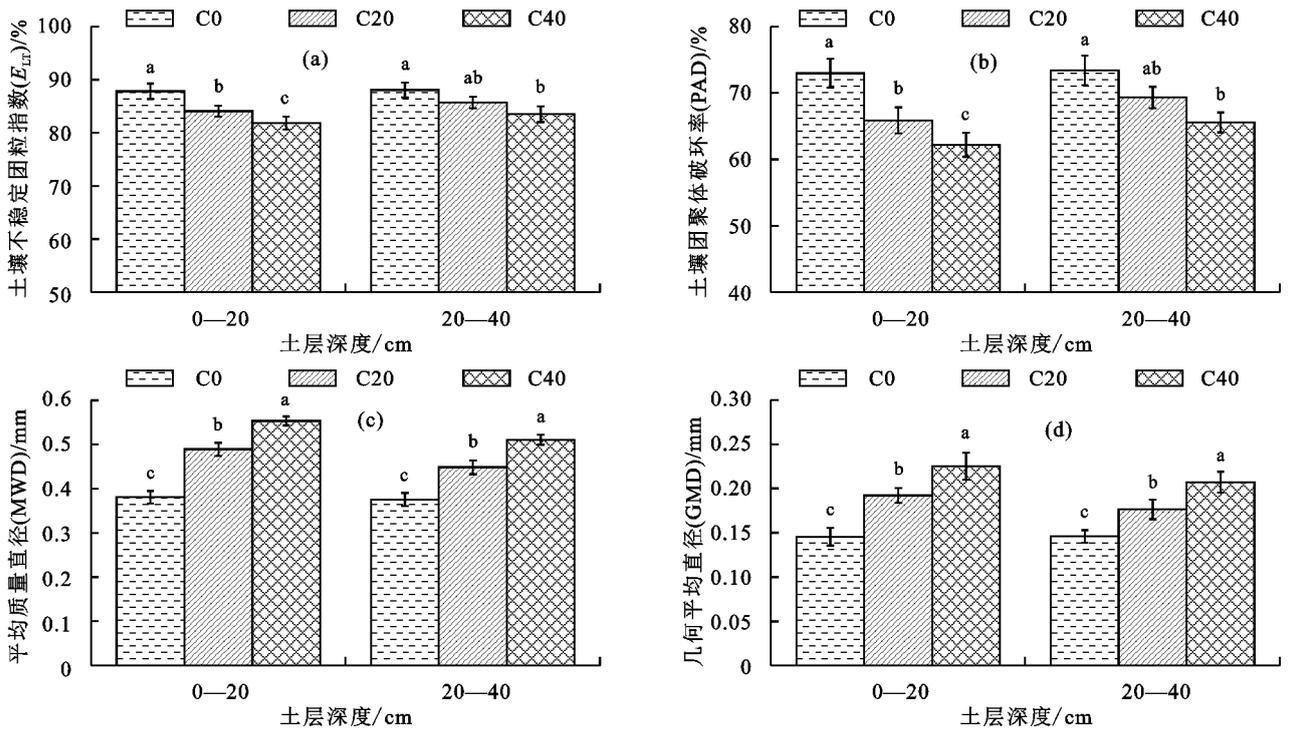


图 4 不同生物炭施用量处理下土壤团聚体的 E_{LT} 、PAD、MWD 和 GMD

2.3 施用生物炭对土壤团聚体中有机碳分布的影响

2.3.1 各粒级土壤团聚体中有机碳含量

从表 1 可以看出, 施加生物炭提高了土层不同粒级的有机碳含量, 0—20, 20—40 cm 土层中均以 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中有机碳含量最高, 其次是 <0.053, 2~0.25 mm 粒级, >2 mm 粒级的有机碳含量最低, 各粒级有机碳含量表现为 0—20 cm > 20—40 cm。随着生物炭施用量的增加, 土层各粒级有机碳含量表现为 C40 > C20 > C0。在 0—20 cm 土层, 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中有机碳含量不同处理间具有显著性差异 ($P < 0.05$), C40 处理下 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级的有机碳含量分别较 C0 提高 20.73%, 40.00%, 56.28% 和 63.61%; 在 20—40 cm 土层, C40 处理下 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级的有机碳含量分别较 C0 提高 29.86%, 28.72%, 46.83% 和 50.61%。

表 1 各粒级土壤团聚体的有机碳含量

土层深度/cm	处理	各粒级土壤团聚体的有机碳含量/($g \cdot kg^{-1}$)			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	C0	10.33b	11.39b	13.96c	10.41b
	C20	11.61a	14.07a	18.50b	14.59a
	C40	12.48a	15.95a	21.81a	17.03a
20—40	C0	9.25b	10.67b	12.55b	10.35c
	C20	11.20ab	12.61a	16.47a	13.58b
	C40	12.02a	13.74a	18.43a	15.58a

注: 同列不同小写字母表示同一粒级不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.3.2 各粒级土壤团聚体中有机碳的贡献率

从表 2 可以看出, 土层各粒级土壤水稳性团聚体表现为: <0.053 mm 粒级有机碳贡献率最高, 其次为 2~0.25 mm 粒级, >2 mm 粒级最低。随着生物炭施用量的增加 >2, 2~0.25, 0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率增加, <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率降低。在 0—20 cm 土层中, 与 C0 相比, C20 和 C40 处理显著提高 >2, 0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率 ($P < 0.05$), C20 和 C40 处理下 >2 mm 粒级有机碳贡献率分别较 C0 增加 12.93% 和 17.96%, 0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率分别较 C0 增加 21.54% 和 30.35%; C40 处理下 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率较 C0 显著降低 19.99%; C20 和 C40 处理下 2~0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率无显著变化。在 20—40 cm 土层中, 与 C0 相比, C20 和 C40 处理下, 0.25~0.053 mm 粒级有机碳贡献率显著提高, 分别较 C0 增加 17.30% 和 28.94%, 显著降低 <0.053 mm 粒级团聚体有机碳贡献率, 分别较 C0 降低 11.69% 和 19.43%; C40 处理下, >2, 2~0.25 mm 粒级有机碳贡献率显著提高, 分别较 C0 增加 22.08% 和 12.94%, 而 C20 处理对 >2, 2~0.25 mm 粒级团聚体有机碳贡献率无显著影响 ($P > 0.05$)。

2.4 施用生物炭对土壤团聚体中全氮分布的影响

2.4.1 各粒级土壤团聚体中的全氮含量

由表 3 可知, 施加生物炭提高了土层不同粒级的全氮含量, 2

个土层中全氮含量均以 0.25~0.053 mm 粒级最高, 2~0.25 mm 粒级次之, >2, <0.053 mm 粒级较低。2 个土层各粒级全氮含量表现为 0—20 cm>20—40 cm。随着生物炭施用量的增加 2 个土层各粒级全氮含量表现为 C40>C20>C0。在 0—20 cm 土层, 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中全氮含量各处理间均达到显著水平 ($P<0.05$), C40 处理下 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级的全氮含量分别较 C0 提高 27.53%, 31.00%, 22.66% 和 15.34%; 在 20—40 cm 土层, 2~0.25 mm 粒级团聚体中全氮含量各处理间均达到显著水平 ($P<0.05$), C40 处理下 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级的全氮含量分别较 C0 提高 26.33%, 50.58%, 43.77% 和 41.02%。

表 2 各粒级土壤团聚体有机碳贡献率

土层深度/cm	处理	各粒级土壤团聚体有机碳贡献率/%			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	C0	13.21b	17.04a	20.85b	36.74a
	C20	14.92a	19.26a	25.34a	33.47ab
	C40	15.59a	19.89a	27.18a	29.39b
20—40	C0	12.36b	18.32b	21.51b	37.82a
	C20	13.44ab	19.33ab	25.23a	33.40b
	C40	15.08a	20.69a	27.74a	30.47b

表 3 各粒级土壤团聚体全氮含量

土层深度/cm	处理	各粒级土壤团聚体全氮含量/(g·kg ⁻¹)			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	C0	0.72b	0.88b	1.04c	0.68b
	C20	0.81ab	1.05ab	1.15b	0.76a
	C40	0.92a	1.15a	1.28a	0.80a
20—40	C0	0.69b	0.75c	0.82b	0.64b
	C20	0.79ab	1.02b	1.07a	0.88a
	C40	0.88a	1.13a	1.17a	0.90a

2.4.2 各粒级土壤团聚体的全氮贡献率 由表 4 可知, 2 个土层各粒级土壤水稳性团聚体表现为 <0.053 mm 粒级全氮贡献率最高, 2~0.25 mm 粒级次之, >2 mm 粒级最低。随着生物炭用量的增加, >2, 2~0.25, 0.25~0.053 mm 粒级的全氮贡献率随之增加, <0.053 mm 粒级全氮贡献率降低; 随着土层的增加, >2, 0.25~0.053 mm 粒级的全氮贡献率降低, 2~0.25, <0.053 mm 粒级的全氮贡献率增加。在 0—20 cm 土层中, 与 C0 相比, C20 和 C40 处理显著提高 >2, 0.25~0.053 mm 粒级的全氮贡献率 ($P<0.05$), C20 和 C40 处理下 >2 mm 粒级全氮的贡献率分别较 C0 增加 29.43% 和 50.22%, 0.25~0.053 mm 粒级全氮贡献率分别较 C0 增加 16.14% 和 22.96%; C40 处理下 2~0.25 mm 粒级全氮贡献率较 C0 显著增加 31.15%; C20 和 C40 处理下 <0.053 mm 粒级全氮贡献率分别较 C0 显著降低 17.93% 和 32.13%。在 20—40 cm 土层中, 与 C0 相比, C20 和 C40 处理显著提高 2~0.25 mm 粒级

全氮贡献率, 分别较 C0 增加 21.01% 和 30.60%; C40 处理下显著提高 >2, 0.25~0.053 mm 粒级全氮贡献率, 分别较 C0 增加 17.44% 和 25.30%, 显著降低 <0.053 mm 粒级团聚体全氮贡献率, 较 C0 降低 24.80%, 而 C20 处理对 >2, 0.25~0.053, <0.053 mm 粒级团聚体全氮贡献率无显著影响 ($P>0.05$)。

表 4 各粒级土壤团聚体全氮贡献率

土层深度/cm	处理	各粒级土壤团聚体全氮贡献率/%			
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0—20	C0	12.82b	18.30b	21.61b	33.76a
	C20	16.59a	22.88ab	25.09a	27.71b
	C40	19.26a	23.99a	26.57a	22.91c
20—40	C0	13.70b	18.99b	20.67b	34.44a
	C20	13.84b	22.98a	24.07ab	31.48ab
	C40	16.09a	24.81a	25.90a	25.90b

3 讨论

土壤团粒结构是土壤结构的基本单元, 是土壤肥力的物质基础, 也是作物高产稳产的土壤条件之一^[7]。本研究发现, 生物炭处理增加了 0—20, 20—40 cm 土层 >2, 2~1, 1~0.5 mm 粒级的土壤机械性团聚体含量, 降低了 0.5~0.25, <0.25 mm 粒级的土壤机械性团聚体含量; 对于水稳性团聚体分布而言, 施加生物炭 0—20 cm 土层 >2, 2~0.25, 0.25~0.053 mm 粒级的水稳性团聚体显著增加, <0.053 mm 粒级的水稳性团聚体显著降低, 而对 20—40 cm 土层水稳性团聚体分布影响较小。Brodowski 等^[14]研究表明, 生物炭与土壤中的其他有机物、微生物等相互作用, 其作为土壤团聚体胶结的介质, 促进土壤团聚体的形成。Sun 等^[15]研究发现, 稻草生物炭显著增加了土壤 2~5, 0.25~0.5 mm 大团聚体的含量, 这与我们的研究结果相同。生物炭能够提高农田耕层土壤中 >0.25 mm 粒级的机械性团聚体和水稳性团聚体含量, 促进团聚体形成, 可能是因为: 一方面生物炭与土壤颗粒形成小团聚体和有机—无机复合体, 同时在团聚体的物理保护下生物炭得到长期固持^[16]; 另一方面, 生物炭的多孔结构为土壤微生物的生长提供了广阔的空间, 土壤微生物量和土壤生物的活动增加, 产生大量的分泌物使土壤微团聚体胶粘在一起逐渐向大团聚体过度, 从而有利于土壤大团聚体的形成^[2, 17]。Kelly 等^[18]研究表明, 不同的生物炭用量 (0, 25, 50, 100 g/kg) 处理, 对土壤团聚体的形成无显著变化, 这与本研究不同, 可能是因为一方面与试验所用的生物炭材料和土壤类型不同有关, 另一方面与生物炭和供试土壤相互作用的培养时间有关, 土壤小团聚体形成大团聚体需要适合的时间, 而许多试验为短期培养的室内试验。

土壤团聚体的稳定性直接影响土壤的质量和肥气热状况^[19]。土壤 E_{LT} 和 PAD 是衡量土壤团聚体稳定性的重要指标,对提高土壤抗侵蚀能力和降低土壤氮、磷淋失具有重要意义^[20],土壤 MWD 和 GMD 常被用来反映土壤团聚体大小分布状况和评价其稳定性^[21]。本研究结果显示,生物炭处理下显著降低 E_{LT} 和 PAD,增加土壤 MWD 和 GMD,说明施加生物炭对提高农田土壤团聚体的稳定性及改善土壤结构具有积极作用。这与 Sun 等^[15]和米会珍等^[3]的研究结果类似,可能是由于生物炭较土壤中的其他有机碳组分更易嵌入土壤微团聚体中,从而降低土壤有机质的分解,增强团聚体的稳定性^[14];另外生物炭的性质稳定,其高芳香族 C 结构有利于与原生有机质结合,抵御外界物理化学及生物影响的能力较强,提高土壤团聚体的凝聚作用,从而增加团聚体的稳定性^[22-23]。

土壤团聚体是有机碳存在的场所,有机碳是团聚体形成的重要胶结物质,二者相互促进,密不可分^[24]。本研究表明,施用生物炭可提高各粒级土壤团聚体有机碳含量和全氮含量,随着土层深度的增加,有机碳和全氮含量降低,且以 0.25~0.053 mm 粒级有机碳和全氮含量最高。这可能是由于生物炭高的有机碳含量和较强的吸附保护作用能够固持有机碳,抑制土壤有机碳的分解,从而增加土壤有机碳含量^[25]。Xu 等^[26]研究发现,生物炭提高了土壤纤维素分解菌和固氮菌的数量,增加了土壤有机氮的矿化速率,从而土壤肥力增强。生物炭施入土壤,使土壤的通气性增加,含氧量增加,抑制了土壤反硝化作用,从而减少了氮氧化物气体的排放,同时生物炭对土壤氮素有较强的吸附作用,从而使氮素的淋失量降低^[27-28]。此外,土壤全氮含量与有机碳含量呈正相关关系,土壤有机碳含量增加是导致全氮含量增加的重要因素^[29]。本研究发现,与 C0 相比,随生物炭施用量增加,>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳和全氮贡献率增加,<0.053 mm 粒级团聚体有机碳和全氮贡献率降低,说明施加生物炭土壤养分随着团聚体的形成逐渐向大团聚体转化;同时,在一定程度上改变了农田的土壤结构、增加了土壤碳、氮养分含量,提高了土壤肥力。这可能是由于施用生物炭增强了微生物分解能力,微生物通过分解作用产生的有机物优先分配进入大团聚体^[30]。

4 结论

(1)通过 5 年的田间试验发现,生物炭显著增加 >0.25 mm 土壤大团聚含量,土壤团聚体分布由小团聚体向大团聚体转化,改善了土壤结构,其中对 0—20 cm 土层的改善效果好于 20—40 cm 土层。同时施用生物炭降低了土壤不稳定团粒指数和土壤团聚

体破坏率,增加了土壤团聚体的平均质量直径和几何平均直径,增强了团聚体的稳定性。

(2)生物炭能够显著增加各土层不同粒级团聚体中的有机碳和全氮含量,提高 >2,2~0.25,0.25~0.053 mm 粒级团聚体有机碳和全氮贡献率,降低 <0.053 mm 粒级微团聚体有机碳和全氮贡献率。40 t/hm² 的生物炭施用量对豫西丘陵地区的土壤具有较好的培肥效果。

参考文献:

- [1] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [2] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等.生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J].农业工程学报,2018,34(3):159-165.
- [3] 米会珍,朱利霞,沈玉芳,等.生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1550-1556.
- [4] 王淑君,夏桂敏,李永发,等.生物炭基肥和水分胁迫对花生产量、耗水和养分吸收的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):288-293.
- [5] Šimansk V, Igaz D, Horak J, et al. Response of soil organic carbon and water-stable aggregates to different biochar treatments including nitrogen fertilization [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2018, 66(4):429-436.
- [6] 刘领,悦飞雪,李继伟,等.秸秆生物炭和鸡粪对铅胁迫下玉米生长和生理特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):264-269.
- [7] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):248-253.
- [8] Khademalrasoul A, Naveed M, Heckrath G, et al. Biochar effects on soil aggregate properties under no-till maize[J].Soil Science,2014,179(6):273-283.
- [9] Liu Z X, Chen X B, Jing Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J].Catena,2014,123:45-51.
- [10] 侯晓娜,李慧,朱刘兵,等.生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):705-712.
- [11] Zhou H, Fang H, Zhang Q, et al. Biochar enhances soil hydraulic function but not soil aggregation in a sandy loam[J].European Journal of Soil Science, 2019, 70:291-300.
- [12] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版

- 社,2000.
- [14] Brodowski S, John B, Flessa H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil[J].*European Journal of Soil Science*,2006,57(4):539-546.
- [15] Sun F F, Lu S G. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil[J].*Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,2014,177(1):26-33.
- [16] 张磊,柳璇,韩俊杰,等.生物炭对土壤团聚体及结合态碳库影响研究进展[J].*山东农业科学*,2016,48(9):157-161.
- [17] 陈心想,耿增超,王森,等.施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J].*农业环境科学学报*,2014,33(4):751-758.
- [18] Kelly C N, Benjamin J, Calderon F C, et al. Incorporation of biochar carbon into stable soil aggregates: The role of clay mineralogy and other soil characteristics[J].*Pedosphere*,2017,27(4):694-704.
- [19] 徐爽,王益权.湿筛过程中分散液的质量对土壤团聚体稳定性的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(4):1012-1020.
- [20] 何玉亭,王昌全,沈杰,等.两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J].*中国农业科学*,2016,49(12):2333-2342.
- [21] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China[J].*Soil and Tillage Research*,2008,100(1/2):34-41.
- [22] Wang D Y, Fonte S J, Parikh S J, et al. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J].*Geoderma*,2017,303:110-117.
- [23] 王月玲,耿增超,王强,等.生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J].*环境科学*,2016,37(9):3634-3641.
- [24] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J].*中国生态农业学报*,2011,19(2):447-455.
- [25] 郭天雷,史东梅,卢阳,等.几种保护措施对紫色丘陵区坡耕地土壤团聚体结构及有机碳的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(2):200-206.
- [26] Xu N, Tan G C, Wang H Y, et al. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J].*European Journal of Soil Biology*,2016,74:1-8.
- [27] Ameloot N, Maenhout P, De Neve S, et al. Biochar-induced N₂O emission reductions after field incorporation in a loam soil[J].*Geoderma*,2016,267:10-16.
- [28] 李帅霖,上官周平.生物炭对不同水氮条件下小麦产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2018,36(2):8-15.
- [29] 贾树海,张佳楠,张玉玲,等.东北黑土区旱田改稻田后土壤有机碳、全氮的变化特征[J].*中国农业科学*,2017,50(7):1252-1262.
- [30] 吕元春,薛丽佳,尹云锋,等.外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J].*土壤学报*,2013,50(3):534-539.
- (上接第 264 页)
- [11] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].*生态学报*,1995,15(3):268-277.
- [12] 陈廷贵,张金屯.十五个物种多样性指数的比较研究[J].*河南科学*,1999(增刊 1):62-64.
- [13] 邢亚蕾,魏天兴,葛根巴图.鹫峰国家森林公园残次林物种多样性及生态位特征[J].*植物研究*,2015,35(6):915-922.
- [14] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].*生态学报*,2019(15):1-9.
- [15] 袁勇,李小英,刘晓梅,等.纳板河自然保护区不同坡向和坡位的常绿阔叶林土壤养分[J].*东北林业大学学报*,2016,44(3):12-15.
- [16] 伍艳,杨忠芳,刘慧,等.砒砂岩物质组成及其对养分含量的影响[J].*人民黄河*,2016,38(6):18-21.
- [17] 张巧琴.山地阴阳坡生态因子的分析[J].*湖南林业科技*,1982(2):27-32.
- [18] 吴昊.秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J].*自然资源学报*,2015,30(5):858-869.
- [19] 魏巍,周娟娟,白玛嘎翁,等.西藏不同草地类型群落根系分布特征与土壤因子的关系[J].*中国草地学报*,2018,40(6):33-38,46.
- [20] 张顺平,乔杰,孙向阳,等.坡向、坡位对泡桐人工林土壤养分空间分布的影响[J].*中南林业科技大学学报*,2015,35(1):109-116.
- [21] 刘鑫,满秀玲,陈立明,等.坡位对小叶杨人工林生长及土壤养分空间差异的影响[J].*水土保持学报*,2007,21(5):76-81.
- [22] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J].*水土保持学报*,2008,22(1):7-12.