第37卷第5期
2019年9月

干旱地区农业研究
Agricultural Research in the Arid Areas

Vol.37 No.5
Sept. 2019

文章编号:1000-7601(2019)05-0176-06　　**doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.26

施肥对复垦土壤微生物代谢功能与苗期玉米生长的影响

张变华[1,2],靳东升[2],张　强[2],郜春花[2],李建华[2],卢晋晶[2],籍晟煜[2]

(1.忻州师范学院,山西 忻州 034000;2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所,山西 太原 030031)

摘　要:利用Biolog-ECO技术、WinRHIZO扫描仪及其图像分析技术,研究了对照CK(施肥量为0)、施复合肥F(施肥量为600 kg·hm^{-2})、施有机肥O(施肥量为7 500 kg·hm^{-2})、有机无机肥配施OF(施肥量为复合肥300 kg·hm^{-2}+有机肥3 750 kg·hm^{-2})处理下煤矸石复垦区土壤微生物群落代谢功能及苗期玉米根系形态等特征,结果表明:不同施肥处理下煤矸石复垦区土壤微生物群落功能多样性差异显著,OF处理下土壤微生物多样性Shannon-wiener指数与Simpson指数最高,分别为3.22和0.96, Eveness指数最低,为0.21,而CK处理与之相反,Shannon-wiener指数与Simpson指数最低,分别为3.07和0.95,Eveness指数最高,为0.23;影响该区域土壤微生物群落代谢功能多样性的关键碳源包括6种氨基酸(L-精氨酸、L-天冬酰胺酸、L-苯基丙氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸、甘氨酰-L-谷氨酸)、4种酯(D-半乳糖酸γ内酯、丙酮酸甲酯、吐温40、吐温80)、1种胺(腐胺)、5种酸(D-半乳糖醛酸、2-羟苯甲酸、4-羟基苯甲酸、r-羟基丁酸、D-苹果酸)、3种糖(ß-甲基D-葡萄糖苷、葡萄糖-1-磷酸盐、a-环状糊精)、3种醇(I-赤藻糖醇、D,L-a-甘油、D-甘露醇);OF处理下玉米根系形态参数如根长、根体积、根系分形维数及玉米生物性状如生物量、茎粗、株高等与CK处理差异最为显著,说明OF处理有利于煤矸石复垦土壤质量的恢复与提高,利于煤矸石复垦区玉米生长。

关键词:煤矸石复垦土壤;施肥;土壤微生物功能多样性;玉米生长

中图分类号:S14;S154.4　　**文献标志码**:A

Effects of fertilization on metabolic function of microorganisms and growth of maize at seedling stage in reclaimed soil

ZHANG Bian-hua[1,2], JIN Dong-sheng[2], ZHANG Qiang[2], GAO Chun-hua[2], LI Jian-hua[2], LU Jin-jing[2], JI Shen-yu[2]

(1. *Xinzhou Teachers College*, *Xinzhou*, *Shanxi* 034000, *China*;
2. *Institute of Agricultural Resources and Environment*, *Shanxi Academy of Agricultural Sciences*, *Taiyuan*, *Shanxi* 030031, *China*)

Abstract: In this paper, Biolog-ECO technology, WinRHIZO scanner and image analysis technology were used to study metabolic function of soil microbial community and root morphology of maize at seedling stage in the reclamation of coal gangue under CK (0 fertilizer), compound fertilizer F (600 kg·hm^{-2}), organic fertilizer O (7 500 kg·hm^{-2}), organic-inorganic compound fertilizer OF (300 kg·hm^{-2}+3 750 kg·hm^{-2}) treatments. The results showed that the Shannon-wiener index and the Simpson index were the highest at 3.22 and 0.96, respectively, and the Eveness index of 0.21 was the lowest under OF treatment while CK was opposite, Shannon-wiener index and the Simpson index were the lowest at the values of 3.07 and 0.95, respectively, the Eveness index peaked at 0.23. The key carbon source that affected the metabolic function diversity of microbial communities mainly included six kinds of amino acids (L-arginine, L-asparagine, L-phenylalanine, L-serine, L-threonine and glycyl-L-glutamic acid), four kinds of esters (D-galactosate gamma-lactone, methyl pyruvate, Twain 40, Twain 80), one a-

收稿日期:2018-12-25　　**修回日期**:2019-08-24

基金项目:国家重点联合基金课题(U1710255-6);山西省农业科学院省政府重点工作项目(YCX2017D2501);忻州师范学院学科建设项目(xk201407)

作者简介:张变华(1976-),女,山西偏关人,讲师,主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail:sxdxzbh@126.com
靳东升(1979-),山西偏关人,副研究员,主要从事矿区复垦与生态重建研究。E-mail:sxdxjds@126.com

通信作者:张强(1965-),男,山西浑源人,研究员,主要从事植物营养和生态环境研究。E-mail:sxsnkytfs@163.com

mine (humus), five kinds of acids (D-galactosonic acid, 2-hydroxybenzoic acid, 4-hydroxybenzoic acid, r-hydroxybutyric acid, D-malic acid), three kinds of sugars (Methyl-glucoside, glucose-1-phosphate, a-cyclic dextrin), three kinds of alcohols (I-alginol, D, L-a-glycerol, D-mannitol); OF treatment had great differences from CK on the aspects of maize root morphology such as root length, root volume, root fractal dimension and its biological traits such as biomass, stem thickness and height. It was indicated that OF treatment had the best effects on corn growth, and improved soil quality in the coal gangue reclamation.

Keywords: coal gangue reclamation soil; fertilization; soil microbial functional diversity; maize growth

土壤微生物是土壤中的活性有机体,是表征土壤肥力高低的指标,其功能多样性能反映土壤微生物的生态特征,对土壤生态系统的健康可持续发展有重要的影响。施肥是影响土壤质量和土壤可持续发展的措施之一[1],与土壤微生物种群特性的变化有密切的关系[2-3]。研究表明,施肥制度的变化可能会导致土壤微生物多样性产生较大差异。如孙凤霞等[4]发现施用有机肥可以提高红壤中土壤微生物碳源利用能力,保持作物高产;邓文悦[5]发现有机无机配施处理下江西稻田土壤微生物群落丰富度指数、均匀度指数、碳源利用丰富度指数都高于其他处理;Li 等[6]发现施肥显著提高了水稻土的微生物功能多样性,而过量的肥料使菜地土壤微生物多样性显著降低。

植物根系与环境进行着物质和能量交换[7],既是植物体吸收水分、养分、矿质元素的主要器官,又是合成和分泌植物激素、有机酸等部分物质的重要场所[8,9]。根系分布状况直接影响其拥有营养空间的大小和对土壤养分的利用能力[10-11],进而影响地上部的生长发育及产量[12-13],同时会影响到植物的改土效果[14]。崔佩佩等[15]发现养分不同配比下高粱根系形态不同,姜琳琳等[16]、武永军等[17]发现土壤中缺氮时玉米的总根长和总根表面积显著增加。

综上可见,施肥对一般土壤微生物群落代谢功能及作物生长状况的研究[18]较多,但在煤矸石复垦区开展类似的研究却相对较少,因此,本研究以山西省古交屯兰煤矸石复垦区定位施肥试验为研究对象,通过分析不同施肥处理对复垦土壤微生物功能多样性、苗期玉米生长特征的影响,为矿区土壤复垦和生态重建工作提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区位于山西省古交市屯兰矿煤矸石排放区(北纬 37°53′15″,东经 112°6′42″),2012 年煤矿排矸结束后,就近取土覆盖,自然恢复 2 a,2014 年复垦为农田,土壤类型为新成土,母质为黄土,根层土壤质地为粉砂壤土,本区年均气温约 9.5℃,年均降水量约 460 mm。本试验设置 4 个施肥处理,分别为对照处理(CK)、复合肥处理(F)、有机肥处理(O)、有机无机肥配施处理(OF)。CK 处理施肥量为 0,其他处理按照等氮量施肥 150 kg·hm^{-2},复合肥 N∶P_2O_5∶K_2O=18∶12∶10,有机肥为平遥县国青同盈禽业有限公司生产的“传康”牌商品有机肥(有机质含量 53.48%,含氮 2.2%),OF 处理施肥量为 50%F+50%O,种植作物为玉米,品种为金苹 618。

1.2　根系与土样采集

于 2018 年 6 月 10 日在玉米苗期,按照对角线法采集不同施肥处理下 0~20 cm 的土壤样品,每个处理 3 次重复,将采集的土样混合均匀,放入灭菌袋,密封后(4℃保温箱)带回室内,未能及时做微生物培养试验的土样放在-80℃冰箱冷冻保存。

随机抽取各施肥处理下 5 株长势良好的玉米作为标准株,测其株高、叶绿素、茎粗、地上部生物量;利用挖掘法采集玉米根系,测定根系形态和根系生物量。

1.3　测定方法

(1)将玉米根系经纯水清洗干净,采用 WinRHIZO 型根系扫描仪及其数据分析软件,结合 Epson Expression 10000XL 图像扫描系统对根系平均直径、体积、总根长和分形维数进行分析。扫描完后,用滤纸包好,在 65℃下干燥至恒质量,用电子天平(±0.0001g)称量。叶绿素利用叶绿素测试仪进行测量,茎粗、株高用游标卡尺、直尺进行测量。

(2)Biolog-ECO:称取 10 g 矿区土壤,放入已灭菌的装有 90 mL 浓度为 0.85% NaCl 的带玻璃珠的三角瓶中,在旋转式摇床上以 250 r·min^{-1}充分震荡 30 min,连续 2 次 10 倍稀释后,在 Biolog-ECO 板的 96 个孔中加入 150 μL 土壤接种液,放入 28℃培养箱中进行培养,每隔 24 h 利用 Biolog 分析仪读取各孔的吸光值,连续测定 7 d。

1.4　数据处理

根密度(g·cm^{-3})=根系生物量(g)/根系总体积(cm^3)。施肥效应=(施肥处理/CK)-1。Biolog-

ECO 平板每孔的平均颜色变化率(average well color development,简写 AWCD)表示土壤微生物碳源利用率,利用香农维纳指数(Shannon-wiener)、优势度指数(Simpson)、均一度(Eveness)描述微生物群落多样性指数,计算方法参照杨永华等[19]的计算方法。

采用 SPSS 23 软件对玉米根系形态、生物性状等数据进行方差分析,采用 Duncan 多重检验法对进行差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理下矿区玉米根形态特征

从表 1 可以看出,不同施肥处理下玉米根密度差异不显著,但是 OF 处理下玉米根系分形维数、根体积、总根长均与 CK 处理差异显著,且均值最高,施肥效应最好。说明有机无机肥配施利于玉米根系生长及向周围土壤获取营养成分,进而促进其生物量增加。

2.2　不同施肥处理下矿区玉米生长特性

从表 2 可以看出,施肥处理下苗期玉米茎粗、株高、叶绿素含量、地下生物量与地上生物量均显著高于 CK 处理($P<0.05$),且 OF 处理下均值最大,施肥效应相对于 F、O 处理显著提高。说明有机无机肥配施处理对于提高玉米生物量效果显著高于单施有机肥或无机肥。

表 1　不同施肥处理下苗期玉米根形态特征及施肥效应

Table 1　Root morphology properties and fertilization effect of maize seedling under different fertilizer treatments

处理 Treatment	根密度 Root density /($g\cdot cm^{-3}$)	施肥效应 Fertilization effect	分形维数 Fractal dimension	施肥效应 Fertilization effect	根体积/cm^3 Root volume	施肥效应 Fertilization effect	总根长/cm Total root length	施肥效应 Fertilization effect
CK	0.38±0.03a	–	1.70±0.06b	–	3.45±0.46b	–	1279±54c	–
F	0.43±0.06a	0.13	1.77±0.04ab	0.04	5.98±1.17a	0.73	2057±91b	0.61
O	0.38±0.03a	0	1.75±0.04ab	0.03	6.25±0.63a	0.81	2401±31a	0.87
OF	0.45±0.06a	0.18	1.83±0.02a	0.08	6.95±0.59a	1.01	2511±67a	0.96

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same below.

表 2　不同施肥处理下苗期玉米生长特性及施肥效应

Table 2　Growth properties and fertilization effect of maize seedling under different fertilizer treatments

处理 Treatment	茎粗/cm Stem diameter	施肥效应 Fertilization effect	株高/cm Plant height	施肥效应 Fertilization effect	叶绿素 Chlorophyll	施肥效应 Fertilization effect	地上生物量 Aboveground biomass/g	施肥效应 Fertilization effect	地下生物量 Underground biomass/g	施肥效应 Fertilization effect
CK	0.53b±0.05	–	34.00c±2.00	–	30.43c±1.28	–	6.80d±0.19	–	1.30c±0.05	–
F	0.75a±0.04	0.41	43.33b±2.52	0.27	34.33b±1.00	0.23	11.57b±0.49	0.70	2.48b±0.15	0.91
O	0.76a±0.03	0.43	47.00a±1.00	0.38	46.17a±1.20	0.46	9.51c±0.42	0.40	2.33b±0.11	0.79
OF	0.81a±0.02	0.51	47.67a±4.93	0.40	47.07a±0.60	0.52	13.69a±0.42	1.01	3.10a±0.16	1.38

2.3　不同施肥处理下矿区复垦土壤的碳源利用率

从图 1 可以看出,不同施肥处理下矿区复垦土壤利用碳源率随着时间呈动态变化,0~24 h 内,不同处理间差异不大,24~48 h 内,土壤微生物 AWCD 值均为 F> OF>O>CK,48 h 后,处理间差异变率增大,72~168 h 后,AWCD 值呈现 OF> O> F>CK,说明 OF 处理下矿区土壤微生物活性较大,对碳源利用能力较强。

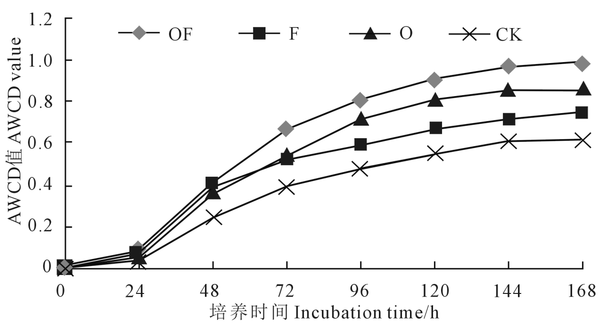


图 1　不同施肥处理下矿区复垦土壤碳源利用率的动态变化

Fig.1　Dynamic changes of carbon source utilization rate under different fertilizer treatments

2.4　不同施肥处理下复垦土壤的微生物多样性

利用 96 h 不同施肥处理下土壤微生物的 AWCD 值,计算矿区土壤微生物的香浓-维纳指数、优势度指数及均一度指数。从表 3 可以看出,施肥处理与 CK 相比,明显增加了工矿复垦区土壤微生物的香浓-维纳和优势度指数,而降低了均一度指数,且 OF 处理下香浓-维纳指数和优势度指数最高,均一度指数最低。

2.5　不同施肥处理下复垦土壤的微生物碳源利用类型

从图 2 可以看出,土壤微生物对 6 类碳源类型利用程度不同,不同施肥处理下土壤微生物对糖

类、胺类、酯类的利用较高,酸类的利用最差。OF 处理下土壤微生物对糖类、氨基酸、醇类、酸类的利用能力最强,而 O 处理下土壤微生物对酯类、胺类的利用能力最强,CK 处理下土壤微生物对各类碳源的利用能力均为最低。

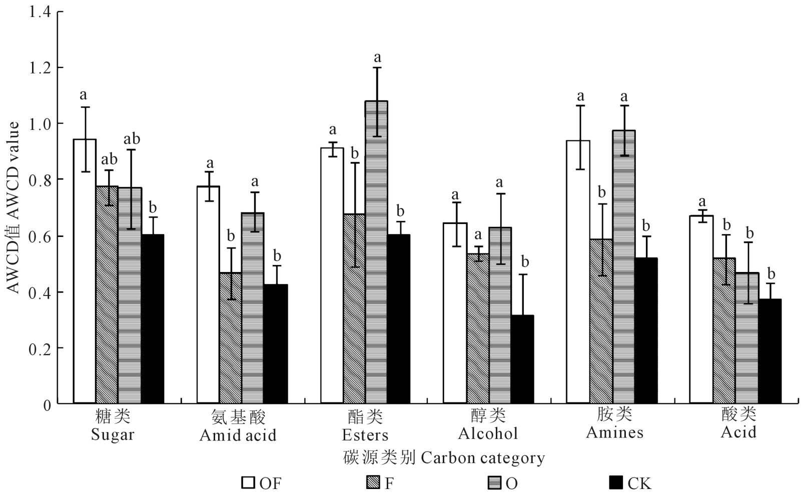
2.6　不同施肥处理下工矿复垦区土壤微生物碳源利用特征

利用 96 h 的 AWCD 值,对不同施肥处理下土壤微生物的 31 种碳源利用特征进行主成分分析,31 种碳源中,特征值大于 1 的共有 7 个成分,累计方差贡献率达 92.9%。其中第一主成分的特征根为 10.55,方差贡献率为 34.05%,第二主成分的特征根为 5.97,方差贡献率为 19.27% 。选取 PC1 和 PC2 分析不同施肥处理下矿区土壤微生物碳源利用情况,从图 3 可以看出,土壤微生物多样性的 31 种碳源中

表 3　不同施肥处理下矿区复垦土壤微生物多样性指数

Table 3　Microorganism diversity index of reclaimed soil in mining area under different fertilization treatments

处理 Treatment	香浓-维纳指数 Shannon-Wiener	优势度指数 Simpson	均一度指数 Eveness
CK	3.07±0.06b	0.94±0.00b	0.23±0.01a
F	3.12±0.11ab	0.95±0.01ab	0.22±0.01ab
O	3.15±0.04ab	0.95±0.00ab	0.22±0.01ab
OF	3.22±0.04a	0.96±0.00a	0.21±0.00b

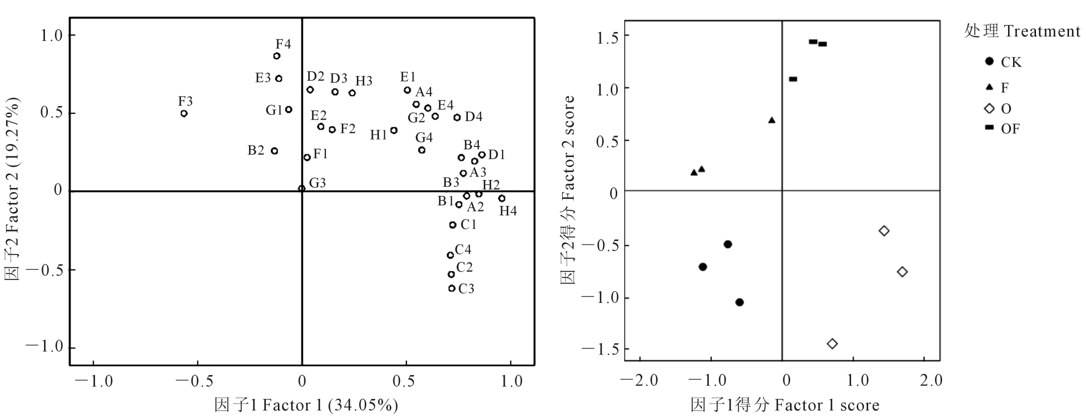


注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note:Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among different treatments (P<0.05).

图 2　不同施肥处理下复垦土壤碳源利用分类特征

Fig.2　Classification characteristics of carbon source utilization in reclaimed soil under different fertilization treatments



注:图中 31 种碳源分别为:B1(丙酮酸甲酯);C1(吐温 40);D1(吐温 80);E1(a-环状糊精);F1(肝糖);G1(D-纤维二糖);H1(a-D-乳糖); A2(ß-甲基 D-葡萄糖苷);B2(D-木糖);C2(I-赤藻糖醇);D2(D-甘露醇);E2(N-乙酰基-D-葡萄胺);F2 (D-氨基葡萄糖酸);G2(葡萄糖-1-磷酸盐);H2(D,L-a-甘油);A3(D-半乳糖酸 γ 内酯);B3(D-半乳糖醛酸);C3(2-羟苯甲酸);D3(4-羟基苯甲酸);E3(r-羟基丁酸);F3(衣康酸);G3(a-丁酮酸);H3(D-苹果酸);A4(L-精氨酸);B4(L-天冬酰胺酸);C4(L-苯基丙氨酸);D4(L-丝氨酸);E4(L-苏氨酸);F4(甘氨酰-L-谷氨酸);G4(苯乙基胺);H4(腐胺)。

Note:31 kinds of carbon source are respectively in the figure:B1(Methyl pyruvate);C1(Twain 40);D1(Twain 80);E1(A-cyclodextrin);F1(Glycogen);G1(D-cellobiose);H1(a-D-lactose); A2(ß-Methyl-D-glucoside);B2(D-xylose);C2(I-gibberellin);D2(D-mannitol);E2(N-acetyl-D-grapevine);F2 (D-glucosaminic acid);G2(Glucose-1-phosphate);H2(D, L-a-glycerol);A3(D-galactose gamma lactone);B3(D-galacturonic acid);C3(2-hydroxybenzoic acid);D3(4-hydroxybenzoic acid);E3(r-hydroxybutyric acid);F3(Itaconic acid);G3(a- butanone acid);H3(D-Malic Acid);A4(L- arginine);B4(L-asparaginic acid);C4(L-Phenylalanine);D4(L-serine);E4(L-threonine);F4(Glycyl-L-glutamic acid);G4(Phenethyl amine);H4(Putrescine).

图 3　不同施肥处理下矿区复垦土壤碳源利用主成分分析

Fig.3　Principal component analysis of carbon source utilization in reclaimed soil under different fertilization treatments

对第一主成分贡献率大于50%的主要包括氨基酸(L-精氨酸、L-天冬酰胺酸、L-苯基丙氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸)5种、酯类(D-半乳糖酸γ内酯、丙酮酸甲酯、吐温40、吐温80)4种、胺类(腐胺)1种、酸类(D-半乳糖醛酸、2-羟苯甲酸)2种、糖类(ß-甲基D-葡萄糖苷、葡萄糖-1-磷酸盐)2种、醇类(I-赤藻糖醇、D,L-a-甘油)2种;对第二主成分贡献率大于50%的碳源包括糖类(a-环状糊精)1种、醇类(D-甘露醇) 1种、酸类(4-羟基苯甲酸、r-羟基丁酸、D-苹果酸) 3种、氨基酸类(甘氨酰-L-谷氨酸)1种。

从图3中的因子得分图可以看出,不同处理间综合利用碳源能力差异显著。OF处理位于第一象限,F与O处理分别位于第二、四象限,CK处理位于第三象限。说明OF处理与第一二主成分均呈正相关性,而CK处理与第一、二主成分均呈负相关。

3 讨 论

土壤微生物在土壤养分循环与能量传输中有重要作用,施肥制度会影响土壤微生物群落多样性,进而影响土壤有机质中的碳氮含量。AWCD吸光值可以反映土壤中微生物对碳源的利用能力和代谢活性强度。本研究利用AWCD结果,对6类碳源、31种碳源综合利用能力分析的结果表明,有机无机肥配施处理下煤矸石复垦土壤微生物的代谢活性最强,碳源利用综合能力也最强,CK处理下碳源利用能力最差。说明有机肥配施无机肥可以显著增加土壤微生物种类,增强微生物活性,提高微生物群落的多样性。这与刘恩科等[20]、顾美英等[21]的研究结果一致。表明单施有机肥或单施无机肥可能导致矿区复垦土壤某些元素缺乏,对土壤微生物群落的多样性产生负效应。但是施肥处理下土壤微生物均一度指数均显著低于CK处理,说明施肥可能导致土壤中微生物个体分布不均匀,也可能促进某种微生物的生长而抑制了其他种类的微生物代谢,这与张恩平等[22]对沈阳番茄根际土壤微生物的研究结果一致。

根系的分形维反映根系在土体空间中的发育程度及占据土体空间的能力[23],表征植物利用土壤水肥的能力强弱[24]。植物根系分形维数高,说明根系的发育程度好,根系分支多[23],利用水肥能力越强。本研究表明OF处理下玉米根系的分形维数显著高于CK处理,根体积、根长也增加显著,表明OF处理对玉米吸收养分、水分效果最好,促进生物量增加。根据本研究试验结果,确实OF处理相对于其他处理而言,对于玉米生长性状,如株高、茎粗等施肥效应最高。

4 结 论

本研究探讨了不同施肥处理下煤矸石复垦区土壤微生物群落功能多样性及玉米生长特征,结果表明有机无机配施处理下土壤微生物综合利用碳源能力最强,施肥效应最高,最有利于复垦土壤微生物活性的提高,群落代谢功能多样性的增加,从而有利于玉米根系分形维数增加,吸取土壤中水肥能力增强,进而提高玉米生物量。

参 考 文 献:

[1] Hai L, Li X G, Li F M, et al. Long-term fertilization and manuring effects on physically-separated soil organic matter pools under a wheat-wheat-maize cropping system in an arid region of China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2):253-259.

[2] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30(2):195-207.

[3] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. 土壤, 1997, 29 (2): 61-69.

[4] 孙凤霞,张伟华,徐明岗,等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J].应用生态学报,2010,21(11):2792-2798.

[5] 邓文悦. 长期施肥对江西稻田土壤有机质与土壤微生物功能多样性的影响[D].西安:西北大学,2017.

[6] Li Z P, Wu X C, Chen B Y. Changes in transformation of soil organic C and functional diversity of soil microbial community under different land uses [J]. Agricultural Sciences In China, 2007, 6(10): 1235-1245.

[7] 安慧,韦兰英,刘勇,等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(4):611-619.

[8] 蔡昆争.作物根系生理生态学[M]. 北京:化学工业出版社,2011:25-36.

[9] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学,2011, 44(1):36-46.

[10] 赵忠,李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报,2002,16(1):96-100.

[11] 李鹏,赵忠,李占斌. 渭北黄土区刺槐根系空间分布特征研究[J]. 生态环境,2005,14(3):405-409.

[12] Bonser A M, Lynch J P, Snapp S. Effect of phosphorus defi-ciency on growth angle of basal roots in Phaseolus vulgaris [J]. New Phytologist, 1996, 132(2):281-288.

[13] 马献发,宋凤斌,张继舟.根系对土壤环境胁迫响应的研究进展[J].中国农学通报, 2011,27(5): 44-48.

[14] 党晓宏,高永,汪季,等. 砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用[J]. 中国水土保持科学,2012,10(4):45-50.

[15] 崔佩佩, 刘鹏, 刘佳琪,等. 不同养分配比对高粱根系生长及养分吸收的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(11):1643-1652.

[16] 姜琳琳,韩立思,韩晓日,等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011, 17(1):

247-253.
[17] 武永军, 沈玉芳, 颜秦峰, 等. 缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(12): 61-64.
[18] Marschner H, Kirkby E, Cakmak L. Effect of mineral nutri-tional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients [J]. Journal of ExperimentalBotany, 1996, 47(S1):1255-1263.
[19] 杨永华,姚健,华晓梅. 农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 微生物学杂志,2000,20(2):23-25.
[20] 刘恩科,梅旭荣,赵秉强,等. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].中国农业大学学报,2009,14(3):63-68.
[21] 顾美英,徐万里,茆军,等. 新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性[J]. 生态学报,2012,32(10):3031-3040.
[22] 张恩平,田悦悦,李猛,等. 长期不同施肥对番茄根际土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报,2018,38(14):5027-5036.
[23] 汪洪,金继运,山内章. 以盒维数法分形分析水稻根系形态特征及初探其与锌吸收积累的关系[J]. 作物学报,2008,34(9):1637-1643.
[24] Wang H, Siopongco J, Wade L J, et al. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(3):338-344.

(上接第 148 页)

参 考 文 献:
[1] 李少昆,王克如,谢瑞芝,等.实施密植高产机械化生产 实现玉米高产高效协同[J].作物杂志,2016,(4):1-6.
[2] 李少昆.我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J].石河子大学学报(自科版), 2017,35(3): 265-272.
[3] 柳枫贺,王克如,李健,等.影响玉米机械收粒质量因素的分析[J].作物杂志,2013,(4):116-119.
[4] 谢瑞芝,雷晓鹏,王克如,等.黄淮海夏玉米子粒机械收获研究初报[J].作物杂志,2014,(2):76-79.
[5] 赵明,李少昆,董树亭,等. 美国玉米生产关键技术与中国现代玉米生产发展的思考——赴美国考察报告[J].作物杂志,2011,(2):1-3.
[6] 李少昆, 王崇桃. 玉米高产潜力・途径[M]. 北京: 科学出版社, 2010:1-53.
[7] 王磊.早熟耐密宜机收玉米品种筛选与示范[D].咸阳:西北农林大学,2016.
[8] 柴宗文,王克如,郭银巧,等.玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J].中国农业科学, 2017,50(11): 2036-2043.
[9] 王克如,李少昆,王延波,等.辽宁中部适宜机械粒收玉米品种的筛选[J].作物杂志,2018,(3):97-102.
[10] 王克如,李少昆.玉米机械粒收破碎率研究进展[J].中国农业科学,2017,(11): 2018-2026.
[11] Hadi G, Kasa S, Racz F. Changes in the water content of maize varieties after physiological maturity [J]. Acta agronomica hungarica, 2009, 57(1):41-46.
[12] Plett S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment [J]. Canada Journal of Plant Science, 1994, 74(3):543-544.
[13] Chowdhury M H, Buchele W F. The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines [J]. Transactions of the ASAE, 1978, 21(4):610-614.
[14] Paulsen M R. Corn breakage susceptibility as a function of moisture content [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1983, 83:3071-3078.
[15] Hall G E, Johnson W H. Corn kernel crackage induced by mechanical shelling [J]. Transactions of the ASABE, 1970, 13(1): 51-55.
[16] 宋卫堂,封俊,胡鸿烈. 北京地区夏玉米联合收获的试验研究[J]. 农业机械学报,2005,36(5):45-48.