

不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系形态生理特征的影响*

张智勇¹ 董秀秀¹ 王绍明^{1,2} 濮晓珍^{1,2**}

¹石河子大学生命科学学院 石河子 832003

²石河子大学药学院, 新疆植物药资源利用教育部重点实验室 石河子 832003

摘要 采用盆栽试验, 研究添加生物炭(BF)、施用有机肥(MF)、施用硫肥(SF)和轮作(CR)4种不同连作障碍消减措施对新疆棉花盛花期根系生理生化、生长形态以及土壤养分的影响。结果显示, 不同的消减措施对棉花根系和土壤特征的影响存在差异。添加生物炭显著提高了土壤pH值和62.48%的土壤速效钾含量, 降低了有效磷含量, 并显著提高了棉花根系活力、根系长度和平均直径($P < 0.05$)。与对照相比, 轮作增加了土壤有机质、全氮和碱解氮含量, 增加程度分别为31.79%、40.28%及32.43%, 降低了土壤有效磷和速效钾的含量, 并显著降低了根系丙二醛含量的积累($P < 0.05$), 且根系长度、根系表面积、根长密度和比根长最大。土壤速效钾和有效磷含量在施用有机肥处理下显著增加, 分别增加了53.75%和16.75%, 且根系平均直径显著增加($P < 0.05$), 这将提高根系与土壤的接触面积, 有利于膜下滴灌下异质性养分的吸收。本研究区域施用硫肥对土壤养分提高以及棉花根系生理活性、根系生长的改善效果不显著($P < 0.05$), 并且施用硫肥具有最小的根冠比(0.499), 不利于棉花根系自身的生长以及水分和养分的吸收。综上所述, 添加生物炭、施用有机肥和轮作可通过影响根系形态或生理特征来提高根系功能的发挥, 有利于养分的高效利用, 可作为该区域可持续绿色农业的有效管理措施。(图1 表5 参51)

关键词 棉花; 生物炭; 有机肥; 轮作; 土壤养分; 根系; 形态生理特征

CLC S157.4 : S562

Influence of different control measures of continuous cropping obstacle on morphological and physiological characteristics of cotton roots in Xinjiang*

ZHANG Zhiyong¹, DONG Xiuxiu¹, WANG Shaoming^{1,2} & PU Xiaozhen^{1,2**}

¹ College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, China

² Pharmacy School, Shihezi University/Key Laboratory of Xinjiang Phytomedicine Resource and Utilization, Ministry of Education, Shihezi 832003, China

Abstract The aim of this study was to investigate the changes in morphological and physiological characteristics of cotton roots under different control measures of continuous cropping obstacle. The effects of four control measures on the physiological and biochemical patterns, growth patterns, and soil nutrients of cotton roots in Xinjiang during the flowering stage were studied with pot experiments. The four controlled measures were: addition of biochar (BF), application of organic fertilizer (MF), application of sulfur fertilizer (SF), and crop rotation (CR). The effects of the different reduction measures on cotton roots and soil characteristics were significantly different ($P < 0.05$). The biochar addition increased the soil pH and the available soil potassium by 62.48%. However, it decreased the available phosphorus and cotton root activity, as well as root length and average diameter. Crop rotation increased soil organic matter, total nitrogen, and alkali nitrogen content. The proportions were 31.79%, 40.28%, and 32.43%, respectively. It reduced the content of available soil phosphorus and potassium. It also decreased the accumulation of malondialdehyde in the roots. Furthermore, the root length (L), root surface area (A), root length density (RLD), and specific root length (SRL) had maximal value. The application of organic fertilizer significantly increased the available potassium and phosphorus in the soil by 53.75% and 16.75%, respectively. Root diameter increased significantly, which increased the contact area between roots and the soil and facilitated the absorption of heterogeneous nutrients under mulched drip irrigation. The application of sulphur fertilizer in this study had no significant improvement in soil nutrients, and physiological activity and development of cotton roots ($P < 0.05$), further resulted in smallest root-shoot ratio (0.499), which was not beneficial to the growth and development of cotton roots, as well as the absorption of water and nutrients. In conclusion, adding biochar, applying organic fertilizer, and practicing crop rotation can improve the function of

收稿日期 Received: 2018-09-01 接受日期 Accepted: 2019-01-04

*国家自然科学基金项目(31660361)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31660361)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: xzh86936@163.com)

the root system. These measures affect the root morphology or physiological characteristics; thus, soil nutrients can be used more efficiently by cotton. Consequently, the effective management measures for sustainable green agriculture in the studied region were: biochar addition (BF), organic fertilizer application (MF), and crop rotation (CR).

Keywords cotton; biochar; organic fertilizer; crop rotation; soil nutrient; root system; morphological and physiological characteristics

棉花是新疆的第一大经济作物,至2016年,新疆植棉面积和总产量占全国的比例高达53.97%和67.3%,实现了棉花产量占我国棉花总产“半壁江山”的历史性突破^[1],因此新疆棉花生产在中国棉业发展中具有举足轻重的地位。然而,受经济利益驱动,新疆棉花种植模式单一、种植年限长,长期以来棉花连作现象严重。在棉花长期连作条件下,棉田土壤环境恶化、土壤养分失调、微生物多样性下降、土壤酶学特征发生改变,影响棉花生长发育,致使棉花产量和经济收益降低,制约了新疆棉花种植业的健康持续发展^[2-3]。

对于棉花连作障碍,学者们已经做了大量的研究。针对棉花连作障碍采取科学有效的消减措施,如轮作、添加生物炭等,能够有效缓解甚至改善棉花连作障碍问题,最终增加棉花产量和经济效益^[4-5]。连作棉田中,施用生物炭提高了土壤有机炭、全氮含量以及相关转化酶的活性,进而促进了植物氮素吸收和干物质积累。而且,生物炭还使得土壤微生物群落功能多样性和特殊功能菌属的相对丰富度显著提升^[6]。轮作能够增加土壤微生物数量,调节有益菌群的平衡且微生物活性显著提高^[7]。连续3年施用有机肥,连作棉田土壤的有机质、酶活性均有不同程度的提高,促进了棉花对养分的吸收,增加棉花地上生物量和产量^[8]。然而,目前较多的研究结果多集中在土壤和植物地上部分。任何农田管理措施导致的土壤微环境的改变都将首先引起根系发生不同程度的变化,根系的变化又会反馈于植物的地上部分甚至整个生态系统^[9]。

根系不仅起到固着、支持和吸收养分的功能,更是植物与土壤首先直接接触的器官,任何土壤环境的变化,都将直接作用于根系,进而影响植物地上部分的生长^[10]。前人研究表明,植物根系在不同的农田管理措施下,表现出不同的根系构型、根系活力等形态和生理特征。郑亚萍等研究表明,施磷肥显著改变了土壤的酸碱性及养分含量,使得花生根长、根表面积和根尖数显著增加,有助于根系发育,从而促进了根系的吸收功能^[11]。另外,张伟明等研究显示,土壤中施入生物炭能增加水稻生育前期根系的主根长、根体积和根生物量及根系吸收面积,使得水稻全生育期根系活力显著提高^[12]。而发达的根系(如根的生物量、根长、根体积或根面积)与作物的高产、高效有着密切的联系^[13]。褚光等研究表明,合理的农田管理措施,可有效地改善作物根系生物量、根系吸收表面积、根系氧化力等形态生理特征,进而通过改善根系功能来提高作物产量^[14]。

添加生物炭、施用有机肥、施用硫肥和轮作均能有效改善棉花连作障碍,但是仅限于对土壤物理化学性质及地上部分的影响,恰恰缺少因消减措施而改变的土壤物理化学性质对于棉花根系的影响。因此,本研究以新疆棉花根系为切入点,通过监测根系生长、形态和生理特征、结合土壤养分变化,从根系的角度探讨4种不同连作障碍消减措施对新疆棉花根系的影响,揭示不同消减措施对棉花连作障碍的消减

机理,研究结果对于深入理解棉花对连作障碍消减措施的响应机制和科学制定合理的连作障碍消减措施将有着重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

采用盆栽试验,样地设置在石河子大学农学院试验站(44°19'N, 86°03'E)。该区域年平均降水量210.6 mm,年平均蒸发量1 664.1 mm,无霜期约170 d,年平均气温7.0℃,年日照时数为2 861.2 h。试验共设5个处理,分别为连作(CK)、添加生物炭(BF)、施用有机肥(MF)、施用硫肥(SF)和轮作(CR),以连作为对照;每个处理重复10次,共50盆。所有试验用土均采自新疆乌苏市夹河子乡,其中,对照、添加生物炭、施用有机肥和施用硫肥处理的基础土壤均取自连作28年且已经出现严重连作障碍的棉田土壤(产量下降40%左右)。轮作土壤采自同一块棉田,在连作棉田进行棉花-玉米的轮作处理,即采集土壤前一年,此块棉田部分种植玉米,种植玉米后的土壤为轮作处理。土壤为表层耕作土(0-30 cm),土样采集后,立即带回实验室,去除动植物残体、石块后,过2 mm筛备用。土壤类型为灰漠土,质地为砂壤土。基础土壤理化性质为有机质含量17.33 g/kg,全氮0.88 g/kg,全磷1.10 g/kg,全钾39.36 g/kg,碱解氮67.08 mg/kg,有效磷3.41 mg/kg,速效钾30.62 mg/kg, pH 8.21。

花盆白色,高60 cm,直径30 cm,每盆装风干土25 kg。施用生物炭处理中生物炭购自石河子大学农学院试验站,由棉花秸秆在450℃下限氧热解6 h制得,其基本养分特征如下: pH 10.04,全氮0.89 g/kg,全磷6.9 g/kg,全钾23.7 g/kg。生物炭施用前在75℃下烘干,并过2 mm筛,以1%(m/m)的比例在播种前施入土壤,每盆添加生物炭0.25 kg。施用有机肥处理中有机肥为附近农家干鸡粪,养分特征为有机质235.2 g/kg,全氮17.8 g/kg,全磷13.7 g/kg,全钾21.8 g/kg。施用前充分晒干,并过2 mm筛,施用量为1%(m/m),折合每盆施用量为0.25 kg。施用硫肥处理中,所施硫肥为CaSO₄,施用量为0.35 g/kg,每盆施用硫肥8.75 g。轮作处理在连作土壤上进行轮作,轮作模式为棉花-玉米-棉花。4种消减处理在装土前均充分混匀,按照容重1.30 g/cm³装土。生物炭、有机肥、硫肥在装土前与供试土壤充分混匀,按照容重1.30 g/cm³装土。

为了更好地模拟大田灌溉环境,试验采用膜下滴灌灌溉,毛管平铺在花盆上方,滴头固定在花盆顶端中心位置,每个花盆由1个滴头供水,并且采用地膜覆盖花盆,试验期间严格控制用水量。除了处理的差异外,整个棉花生育期所化学肥料折合纯N 440 kg/hm²、P₂O₅ 420 kg/hm²、K₂O 270 kg/hm²,其中播种前基施20% N、100% P₂O₅和100% K₂O。剩余氮

肥作为追肥使用,分5次在棉花生长期随水滴施,各次占总量的15%、15%、20%、20%和10%的施肥量进行分别施用。棉花生长整个期间进行9次灌水,总灌溉量为520 mm。供试棉花为新陆早45号(*Gossypium hirsutum* L.),2017年4月20号播种,10月3号收获。每盆播5粒棉种,棉花幼苗长至两叶一心时定植,保留长势均匀的幼苗一株。除了处理的差异,其他管理按照当地高产田进行。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 棉花样品采集 在棉花的盛花期(2017年7月20日),每个处理随机选择5盆棉花,首先沿地径处将棉花地上部分剪下,将自来水阀门开到最大,使水流具较高能量,用该水流直接冲刷花盆中棉花土壤及根系,待大部分土壤被冲刷掉后,将每株棉花根系分别收集,放于容器中去离子水(4℃)小心清洗,除去附着的泥土等杂物。冲洗干净的根样放入4℃冰箱并在48 h内尽快完成根系生理指标和根系形态指标的测定。同时采集相应处理的土样(0-30 cm)测得土壤理化性质。

1.2.2 土壤养分含量测定 参考鲍士旦《土壤农化分析》^[7]:土壤全氮采用半自动凯氏定氮仪测定;采用H₂SO₄-HClO₄消煮,钼抗比色法测定土壤全磷;采用NaOH熔融,火焰光度计法测定土壤全钾;采用扩散法测定碱解氮;采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定速效磷;NH₄Ac浸提-火焰光度法测定速效钾;土壤pH采用酸度计测定。

1.2.3 棉花根系形态指标测定 先用根系扫描仪(HP Scan Jet 4C)将各处理中取得的单株完整根系进行扫描,然后采用WinRhizo™根系分析系统确定根直径、根长、根表面积、根系体积和根长密度(RLD)。采用烘干称重法测得相应根系生物量,于105℃烘箱中杀青30 min,在70℃烘干至恒重,称重。通过根长与生物量的比值计算得到比根长(SRL);根表面积与根生物量的比值计算得到比表面积(SSA);根系生物量和根系体积的比值计算得到根系组织密度(TMDr)。

1.2.4 棉花根系生理测定 取各处理小于2 mm的细根监测用于监测根系生理活性。参考李合生《植物生理生化实验原理和技术》^[8]:采用TTC法测定根系活力;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)反应测定;硝酸还原酶(NR)采用离体法测定;谷氨酰胺合成酶(GS)采用催化产物在酸性条件下与铁形成红色络合物,并在540 nm处测定吸光度。

1.3 数据分析

采用Microsoft Excel软件处理数据,对不同处理下的土壤和根系特征进行单因素方差分析(One-way ANOVA)(P

< 0.05),采用Duncan法判断各处理是否有显著差异,当方差不齐时,先将数据进行对数或平方根转化后再采用Duncan法进行比较。土壤养分和根系特征之间的相关性用皮尔森相关系数确定。所有统计分析采用SPSS 19.0软件进行($P < 0.05$)。作图采用Graph Pad Prism 5.0。

2 结果与分析

2.1 不同消减措施下土壤养分的变化

表1显示了4种消减措施下棉田土壤养分的变化。与连作(对照,CK)相比,4种消减措施中,施用生物炭显著增加土壤速效钾含量,显著降低了土壤有效磷含量($P < 0.05$)。有机肥施用显著增加了土壤有效磷和速效钾含量($P < 0.05$),但对全磷和全钾无影响($P > 0.05$)。土壤全磷含量在不同处理中均无显著差异($P > 0.05$)。施用硫肥除了降低有效磷的含量外对其他养分含量均无影响($P > 0.05$)。轮作显著增加了土壤有机质、全氮和碱解氮含量,并显著降低了土壤速效钾和有效磷含量($P < 0.05$)。与对照相比,添加生物炭和轮作显著增加土壤pH值($P < 0.05$),施用有机肥和硫肥则增加效果不显著($P > 0.05$)。添加生物炭、有机肥和硫肥的土壤有机质与对照相比差异均不显著。然而,由于新疆普遍实行秸秆还田,而轮作处理的上茬作物为玉米,玉米秸秆生物量以及腐解特性与棉花秸秆存在差异,故出现有机质显著增加的现象,导致轮作处理与对照差异显著。

2.2 不同消减措施下根系特征的变化

与对照相比,生物炭和硫肥的施用均显著增加了棉花根系活力($P < 0.01$),且增加的百分比分别为322.82%、131.26%,而施用有机肥和轮作对根系活力的影响均不显著(图1A)。除了硫肥,生物炭、有机肥和轮作均显著降低了根系MDA含量,且在生物炭处理中降低最多,降低的百分比为50.13%(图1B)。除施用硫肥,其他3种消减措施均显著增强棉花根系的硝酸还原酶活性(图1C)。与对照相比,施用有机肥和轮作均显著提高了棉花根系谷氨酰胺合成酶活性,而添加生物炭和施用硫肥的影响不显著(图1D)。

表2显示了不同消减措施下的棉花根系形态特征变化。与对照相比,4种消减措施中添加生物炭显著增加了总根长、表面积、平均直径、比根长和比表面积。施用有机肥显著增加了根系表面积、平均直径、根系体积;硫肥的施用下,除了根系直径增加外,其他形态特征均无变化。轮作显著增加了总

表1 不同消减措施对土壤养分的影响(平均值±标准误差)

Table 1 Effects of different reduction measures on soil nutrients (mean ± SE)

处理 Treatment	有机质 Organic matter (OM, w/g kg ⁻¹)	碱解氮 Avail. N (w/mg kg ⁻¹)	全氮 Total N (w/g kg ⁻¹)	有效磷 Avail. P (w/mg kg ⁻¹)	全磷 Total P (w/g kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K (w/mg kg ⁻¹)	全钾 Total K (w/g kg ⁻¹)	pH
BF	19.974 ± 1.843ab	71.750 ± 4.630b	0.831 ± 0.019b	8.698 ± 0.253c	1.123 ± 0.013a	48.628 ± 0.337a	31.346 ± 0.386c	8.19 ± 0.009a
MF	16.732 ± 0.406c	66.500 ± 1.750b	0.870 ± 0.022b	12.164 ± 0.429a	1.244 ± 0.066a	46.017 ± 0.115b	33.710 ± 0.685b	7.92 ± 0.004c
SF	15.811 ± 0.382c	68.250 ± 2.021b	0.772 ± 0.014b	8.680 ± 0.323c	1.186 ± 0.027a	31.423 ± 0.264c	35.743 ± 0.726ab	7.93 ± 0.007c
CR	22.737 ± 0.040a	85.750 ± 2.021a	1.083 ± 0.061a	8.540 ± 0.345c	1.223 ± 0.025a	24.577 ± 0.134d	37.037 ± 0.630a	8.06 ± 0.010b
CK	17.253 ± 0.905bc	63.417 ± 1.333b	0.772 ± 0.010b	10.419 ± 0.243b	1.131 ± 0.026a	29.929 ± 1.134c	35.634 ± 0.945ab	7.96 ± 0.003c

BF: 添加生物炭; MF: 施用有机肥; SF: 施用硫肥; CR: 轮作; CK: 对照(连作)。a、b、c、d表示各处理之间差异显著($P < 0.05$);相同字母表示两处理之间差异不显著。

BF: Adding biochar; MF: Manure fertilizer; SF: Sulfur fertilizer; CR: Crop rotation; CK: Control. a, b, c and d denote significant difference between treatments ($P < 0.05$); the same letters denote insignificant difference between the two treatments.

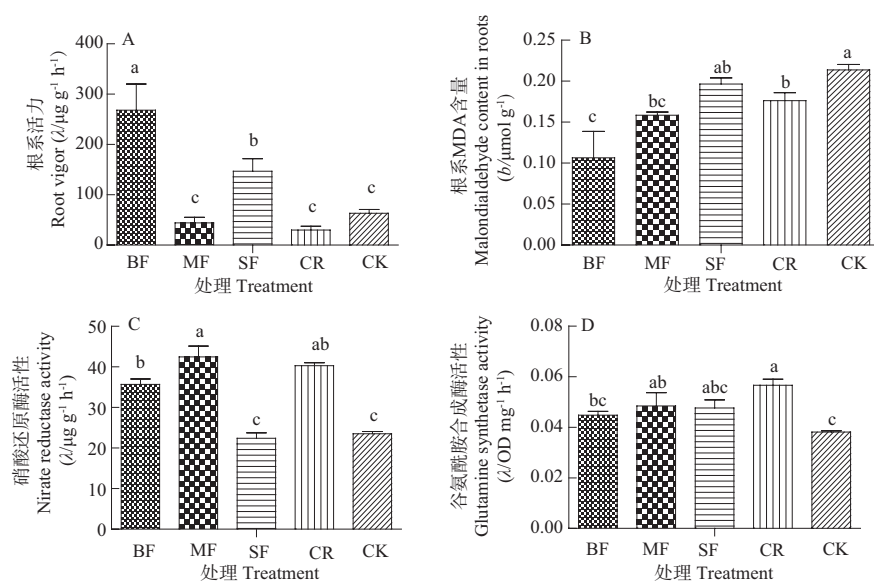


图1 不同消减措施对棉花根系生理的影响 (平均值±标准误差)。BF: 添加生物炭; MF: 施用有机肥; SF: 施用硫肥; CR: 轮作; CK: 对照 (连作)。a、b、c、d表示各处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 相同字母表示两处理之间差异不显著。

Fig. 1 Effect of different reduction measures on root physiological characteristics (mean ± SE). BF: Adding biochar; MF: Manure fertilizer; SF: Sulfur fertilizer; CR: Crop rotation; CK: Control. a, b, c and d denote significant difference between treatments ($P < 0.05$); the same letters denote insignificant difference between the two treatments.

表2 不同消减措施下的棉花根系变化 (平均值±标准误差)

Table 2 Changes of cotton root morphological characteristics under different reduction measures (mean ± SE)

处理 Treatment	总根长 Length (L/cm)	表面积 Surface area (A/cm ²)	平均直径 Root average diameter (RD/mm)	根长密度 Root length density (RLD/cm cm ⁻³)	根系体积 Root volume (V/cm ³)	比根长 Specific root length (SRL/cm g ⁻¹)	比表面积 Specific surface area (SSA/cm ² g ⁻¹)	组织密度 Root tissue mass density (TMDr/g cm ⁻³)
BF	41898.62 ± 205.068a	5407.27 ± 101.494a	10.39 ± 0.369a	749.68 ± 21.441b	55.99 ± 1.838ab	3109.06 ± 33.726a	401.08 ± 2.596a	0.24 ± 0.004c
MF	40180.13 ± 1992.122ab	5489.59 ± 191.886a	9.84 ± 0.240a	674.75 ± 20.512c	59.48 ± 1.213a	2647.27 ± 187.937ab	361.45 ± 20.323ab	0.26 ± 0.011b
SF	39578.44 ± 4274.900ab	5099.80 ± 582.607ab	10.07 ± 1.162a	757.10 ± 11.246b	52.45 ± 6.308ab	2692.57 ± 343.824ab	347.00 ± 46.236ab	0.29 ± 0.017ab
CR	46287.98 ± 1748.841a	5632.63 ± 252.885a	8.84 ± 0.383ab	846.46 ± 12.374a	54.77 ± 2.844ab	3179.40 ± 124.587a	386.90 ± 17.929a	0.27 ± 0.015b
CK	31664.23 ± 3391.946b	4114.37 ± 400.780b	7.49 ± 0.799b	719.04 ± 26.300bc	43.95 ± 3.872b	2182.96 ± 329.593b	283.41 ± 40.084b	0.32 ± 0.011a

BF: 添加生物炭; MF: 施用有机肥; SF: 施用硫肥; CR: 轮作; CK: 对照 (连作)。a、b、c、d表示各处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 相同字母表示两处理之间差异不显著。

BF: Adding biochar; MF: Manure fertilizer; SF: Sulfur fertilizer; CR: Crop rotation; CK: Control. a, b, c and d denote significant difference between treatments ($P < 0.05$); the same letters denote insignificant difference between the two treatments.

根长、表面积、根长密度、比根长和比表面积; 所有5种处理中, 轮作处理下的根系有最大的总根长、总表面积、根长密度和比根长。与对照相比, 4种消减措施均降低了根系组织密度, 降低程度为BF > MF > CR > SF。

2.3 土壤养分与根系特征间相关性分析

表3显示了土壤养分与棉花根系生理特征的相关性。数据显示: 棉花根系活力与土壤速效钾、土壤pH呈显著正相关; 根系丙二醛含量与土壤速效钾、土壤pH呈显著负相关; 根系硝酸还原酶与土壤碱解氮显著正相关; 根系谷氨酰胺合成酶与土壤养分均不相关。

表4显示了土壤养分与棉花根系形态特征的相关性。由表可知: 根长密度与土壤有机质、碱解氮之间呈显著正相关, 与土壤有效磷、速效钾之间呈显著负相关; 比根长与土壤有机质呈显著正相关; 而根系总根长、表面积、平均直径、根系体积、比表面积和根系组织密度均与土壤养分含量无相关关系。土壤pH与根系形态之间无显著相关性。

2.4 不同消减措施下棉花干物质积累的变化

表5显示了不同消减措施对棉花干物质积累的影响。与

对照相比, 添加生物炭后棉花地上部分干重显著降低, 但根系干重和棉花根冠比无影响; 施用硫肥后棉花地上部分干重显著增加, 根冠比降低; 施用有机肥和轮作处理对棉花根系干重、地上部分干重以及根冠比均无显著影响。此外, 施用有机肥后棉花有最大的根系干重 (15.225 g), 添加生物炭和施用硫肥分别有最大 (0.753) 和最小 (0.499) 的根冠比。

3 讨论与结论

3.1 不同消减措施对棉田土壤养分的影响

添加生物炭、施用有机肥和轮作因其在棉花连作障碍消减过程中, 能够有效改良土壤养分, 故作为有效的连作障碍消减措施而被普遍采用^[17-18]。土壤养分的有效含量对植物的生长发育至关重要。本研究中, 添加生物炭后速效钾含量显著增加, 可能是与生物炭中含有较高的钾有关 (23.7 g/kg), 施用后增强了土壤对易移动钾素的吸持能力。添加生物炭后有效磷含量降低, 这与不同测定时期土壤有效磷含量不同有关。本研究中基础土壤有效磷含量较低 (3.41 mg/kg),

表3 土壤养分与棉花根系生理特征的相关系数
Table 3 Correlation of cotton root physiological characteristics with soil nutrients

因子 Factor	根系活力 Root vigor	根系MDA含量 Malondialdehyde content in roots	根系硝酸还原酶 Nirate reductase activity	根系谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase activity
土壤有机质 OM	-0.031	-0.101	0.315	0.418
土壤碱解氮 Avail. N	-0.372	0.166	0.567*	0.335
土壤有效磷 Avail. P	-0.240	0.059	-0.038	0.233
土壤速效钾 Avail. K	0.738**	-0.667**	-0.398	0.371
土壤酸度 Soil pH	0.700**	-0.623*	0.310	-0.146

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

表4 土壤养分与棉花根系形态的相关系数
Table 4 Correlation of cotton root morphological characteristics with soil nutrients

因子 Factor	总根长 Length	表面积 Surface area	平均直径 Root average diameter (RD)	根长密度 Root length density (RLD)	根系体积 Root volume	比根长 Specific root length (SRL)	比表面积 Specific surface area (SSA)	组织密度 Root tissue mass density (TMDr)
土壤有机质 OM	0.500	0.344	0.013	0.659*	0.146	0.517	0.394	-0.264
土壤碱解氮 Avail. N	0.466	0.300	-0.121	0.663**	0.108	0.371	0.231	-0.088
土壤有效磷 Avail. P	-0.276	-0.077	-0.046	-0.677**	0.127	-0.354	-0.200	-0.019
土壤速效钾 Avail. K	0.004	0.203	0.450	-0.595*	0.391	0.073	0.246	-0.389
土壤酸度 Soil pH	0.359	0.281	0.198	0.338	0.184	0.509	0.460	-0.382

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

表5 不同消减措施对棉花干物质积累的影响 (平均值 ± 标准误差)
Table 5 Effect of different reduction measures on dry matter accumulation of cotton (mean ± SE)

处理 Treatment	根系干重 Dry weight of root (w/g plant ⁻¹)	地上部分干重 Dry weight of shoot (w/g plant ⁻¹)	根冠比 The ratio of root to shoot
BF	13.481 ± 0.204b	18.022 ± 0.121c	0.753 ± 0.036a
MF	15.225 ± 0.332a	25.718 ± 0.596ab	0.610 ± 0.044ab
SF	14.790 ± 0.386ab	31.544 ± 0.345a	0.499 ± 0.035c
CR	14.560 ± 0.226ab	25.927 ± 0.833ab	0.567 ± 0.040b
CK	14.707 ± 0.256ab	22.429 ± 0.859b	0.673 ± 0.019ab

BF: 添加生物炭; MF: 施用有机肥; SF: 施用硫肥; CR: 轮作; CK: 对照 (连作). a、b、c、d表示各处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 相同字母表示两处理之间差异不显著.

BF: Adding biochar; MF: Manure fertilizer; SF: Sulfur fertilizer; CR: Crop rotation; CK: Control. a, b, c and d denote significant difference between treatments ($P < 0.05$); the same letters denote insignificant difference between the two treatments.

盛花期时由于磷肥施用过量, 土壤有效磷较基础土壤明显升高 (10.419 mg/kg), 添加生物炭可能促进钙磷化合物的形成. Xu等也发现, 添加小麦秸秆炭后, 土壤有效磷在磷浓度较低时 (20 mg/L) 表现为增加, 在磷浓度较高时 (100 mg/L和240 mg/L) 表现为降低^[19]. 有机肥料既可以直接向土壤输送大量的速效磷, 也可以通过有机物质进入土壤矿化分解释放速效磷^[20], 因此土壤速效磷的含量显著增加. 本研究中施用有机肥后棉田土壤中速效钾的含量比连作棉田显著高, 这与杨春璐等的研究结果^[21]一致, 表明有机肥显著增加了土壤中钾的有效性并减少土壤对新施用钾肥的固定量.

大量研究表明, 施用硫肥可通过降低土壤pH值来实现释放土壤中被固定的磷素, 进而增加土壤有效磷的含量. 本研究的结果与之不同, 可能与棉花生育期的土壤有效磷本身偏高 (10.419 mg/kg), 土壤中的 SO_4^{2-} 与 H_2PO_4^- 之间存在拮抗作用有关^[22]. 轮作显著增加了土壤有机质、碱解氮和全氮含量, 说明轮作能够改善土壤有机质状况, 提高土壤供N的容量和强度. 刘冬碧等研究表明, 小麦-棉花轮作后土壤有效磷显著增加, 速效钾显著降低^[23]; 罗新宁等研究表明, 水稻-棉

花的短期轮作对土壤有效磷和速效钾无影响^[24]; 而王林娜等在研究苜蓿-棉花轮作后土壤速效养分的变化中显示土壤有效磷和速效钾含量均升高^[25], 这说明轮作对棉田土壤有效磷和速效钾含量的影响与轮作作物特性和土壤类型有很大关系.

3.2 不同消减措施对棉花根系的影响

良好的土壤环境促进了根系的生长和对养分的吸收能力. 长期连作棉田导致土壤理化环境恶化、养分严重失衡、自毒物质积累等土壤微环境的变化会不同程度地限制根系生长并使之处于胁迫环境中^[26]. 植物生理生化指标的变化是植物对逆境条件的适应性反应, 可反映植物生长状况及受伤害的程度. 作物对养分的吸收与利用很大程度取决于作物根系在土壤中的生长和形态, 另一方面, 根系形态等特征又是其对土壤环境中养分状况和微环境变化的响应结果. 本研究中连续28年单一种植棉花后根系MDA含量达到较高水平, 根系活力、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性以及总根长、表面积、根长密度、根系体积、比根长和比表面积数值最低, 根系生理活性和生长状况受到限制.

根系是植物吸收水分和养分的主要部位, 其生长状态与获取土壤中矿质养分和水分能力有关, 扩大作物根系系统能够增强根系综合能力^[27]. Arredondo等指出根长可以在一定程度上用于表征根系对土壤的探索效率^[28]. 高的比根长 (SRL) 能增加根-土接触面积和根系吸收潜力. 一般来说, SRL的变化包括根系直径 (RD) 和组织密度 (TMDr) 的变化^[29], 因为SRL在数学公式上可转换为 $\text{SRL} = [1/(\text{TMDr} \times \text{RD}^2)] \times 4\pi$. 这表明SRL的增加可能是由于TMDr或RD的降低. 本研究中, 添加生物炭和轮作处理下棉花SRL显著增加, RD显著增加 (添加生物炭) 或不变 (轮作), 而TMDr均显著降低了, 且添加生物炭处理的TMDr最低, 说明通过增加SRL, 棉花可降低单位根长根系在构造上的C消耗; 加之棉花根系的根长、表面积、比表面积和根长密度都显著增加, 说明棉花通过降低根系在构造上的C消耗来发展一个更加庞大 (或密集) 的根系系统^[30], 这为根系功能的发挥提供了良好的条件, 有利于棉

花根系对土壤的探索和养分的获取。根系活力是反映植物根系生命活动的一个重要的生理指标,与呼吸作用相关联^[31]。根系吸收运输作物所需的养料及水分的能量由根系部分细胞的呼吸提供。硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)是养分代谢过程中的关键酶,不仅能反映作物吸收和转化养分能力的强弱,还对作物的碳代谢和能量代谢有重要的影响。本研究中添加生物炭和轮作显著促进了根系活力或(和)NR、GS活性,说明处理后的棉花根系能量代谢旺盛、养分的利用率提高。

很多研究指出施肥对作物的影响是通过调控根系的形态来实现的^[32],且形态的变化伴随着生理的可塑性。张永清等在研究中指出,施用有机肥有利于土壤中根重、根长密度及根系活性的提高^[33]。李絮花等研究证实,施用有机肥可促进小麦根系的根长和体积,使小麦根系的生物量明显增加^[34]。张向前等研究表明施用有机肥显著增加了根系总根长、根表面积、根体积、总根尖数、根干重^[35]。本研究发现,施用有机肥增加了根系的表面积、平均直径、体积以及NR和GS的活性,根系活跃吸收面积和养分利用率增加。由于根系体积更大、直径更粗,根系生物量也显著增加。这可能与有机粪肥中含有较高的有机质及促生菌,能够有效定殖于植物根际和根表面有关^[36]。有报道指出,促生微生物可以通过活化土壤养分(如固氮、解磷、解钾等,表1)、调节植物类激素水平(如分泌有益激素及降低有害激素水平等)、产生挥发性促生物质等提高根系的生长^[37-38]。另外,有机粪肥腐解过程中产生的活性有机物质,可参与根细胞的合成,也会促进根系生长^[39]。

众多研究已经表明硫肥可通过与其他养分元素的交互作用来促进作物对氮磷钾等的吸收^[40-41]。目前关于硫肥对缓解连作障碍的机理研究多集中于植株养分积累和分配上,如王墨等揭示硫肥提高了黄河流域棉区连作棉花生殖器官的干物质积累,主要是因为它提高了棉花生殖器官对氮磷钾的积累^[42]。关于施用硫肥对根系的研究,目前报道极少。阿依夏木·沙吾尔等在新疆天山北麓的草甸盐土上(碱性土)开展试验,发现施用硫肥显著增加了甘草根长、根表面积、平均直径和根干重^[43]。但在灰漠土上还未见有报道。本研究显示硫肥除了增加了根系活力和平均直径外,对根系其他生理和形态指标均无影响。但通过增加的地上生物量和降低的根冠比可以看出土壤中充足或过量的硫(基础土壤硫水平:20.5 μg/mg)使地上部分过度生长,这或许导致根系不能吸收足够的养分和水分而限制作物生长^[44]。前人研究认为硫肥对作物生长的影响因基础土壤硫水平、土壤酸碱性、以及作物的类型不同而表现出促进、抑制或者无影响^[45-47],在本研究区域硫肥对根系的影响不明显。

3.3 土壤养分与根系特征间的相关性分析

韩春丽等对长期连作棉田土壤养分变化的研究显示,随连作年限的增加,新疆棉田土壤速效钾含量呈下降趋势,且少施或不施钾肥,致使新疆棉田土壤中的氮、磷、钾比例失调^[48]。此外,连作导致棉田土壤酸化。本研究显示,土壤速效钾、pH与根系活力显著正相关,与根系丙二醛含量显著负相关。表明连作棉田土壤中钾的有效养分含量缺少和土壤酸化,造成棉花根系受损,根系活力下降,影响棉花根系功能

的发挥,造成连作障碍。硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶是氮素同化的关键酶,其活性高低与植物体内氮同化能力密切相关,可直接影响作物对氮的同化速率。孙永健等研究发现,随施氮量的提高,水稻功能叶各生育期NR、GS活性有提高的趋势^[49]。本研究显示,土壤碱解氮含量与根系硝酸还原酶活性、根长密度呈显著正相关(表3),且连作土壤碱解氮含量低于消减措施处理(表1),表明土壤氮素有效性匮乏造成棉花根系酶活力低下,根系的养分吸收和生长受到抑制。

综合土壤养分、根系生理、根系形态以及相关分析,初步探索不同消减措施的连作障碍消减机理。4种消减措施均通过提高土壤氮素水平,增强棉花根系对氮素的利用效率。此外,除施用硫肥,其他3种消减措施通过改善连作土壤养分状况,提高棉花根系生理代谢活性和塑造适宜的根系构型,但不同消减措施的消减策略存在差异。其中,根长密度和比根长均与土壤有机质之间有显著正相关关系,且轮作土壤的有机质含量最高,可能说明轮作是通过增加土壤有机质含量提高根长密度,使得根系生长的更加密集,高效利用有限空间内的土壤养分。施用生物炭主要通过增加土壤速效钾含量和土壤pH,增强棉花根系活力;施用有机肥通过增加土壤氮素有效性,提高棉花根系总根长,使棉花根系具有较好的空间延展性,更好地发挥根系对空间养分的获取能力。

在新疆高度集约的种植压力下,过量施用化肥、农药和除草剂、土壤残膜的滞留等导致的土壤环境的恶化严重限制了土壤的生产力;加之,膜下滴灌的精准灌溉技术对根区水分和养分等微环境及根系生长、功能等的影响差异于常规漫灌且作用更显著^[50],这使得根系功能的发挥以及后续的发展显得尤为重要。连作障碍导致棉田土壤微环境改变、土壤养分失衡、根系生长受限、根系活性降低,任何改良土壤的管理措施都将通过调控根系活动来影响作物的生长甚至整个农田生态系统。本研究得到添加生物炭、轮作和有机肥有利于根系生长,提高根系生理活性,促进其功能的发挥。后续的研究还应监测不同生育期棉花根系动态,因为众多研究都表明越到生育后期这些管理措施的作用会更加突出^[51];同时为了更好地探究根系变化的内在机制,将来的研究还因考虑根系的异质性,因为同一植株不同分枝的根系具有高度的结构和功能的异质性,它们或许会对不同甚至同一农田管理措施有差异响应。

参考文献 [References]

- 1 卢秀茹,贾肖月,牛佳慧.中国棉花产业发展现状及展望[J].中国农业科学,2018,51(1):26-36 [Lu XR, Jia XY, Niu JH. The present situation and prospects of cotton industry development in China [J]. *Sci Agric Sin*, 2018, 51 (1): 26-36]
- 2 曹晶晶.棉秆还田对连作棉田土壤团聚体养分及有机炭组分的影响[D].石河子:石河子大学,2016 [Cao JJ. Effect of returning straw into field on the soil aggregates nutrients, organic carbon components [D]. Shihezi: Shihezi University, 2016]
- 3 刘建国.新疆棉花长期连作的土壤环境效应及其化感作用的研究[D].南京:南京农业大学,2008 [Liu J G. Effects on soil environments of long-term succession cropping and allelopathy mechanism of cotton in Xinjiang [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008]

- 4 马云艳, 徐万里, 唐光木, 顾美英, 薛泉宏. 生防链霉菌配施棉秆炭对连作棉田土壤微生物区系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25** (3): 400-409 [Ma YY, Xu WL, Tang GM, Gu MY, Xue QH. Effect of cotton stalk biochar application on soil microflora of continuous cotton cropping under use of antagonistic actinomycetes [J]. *Chin J Eco-agric*, 2017, **25** (3): 400-409]
- 5 李琦, 廖娜, 张妮, 茹思博, 侯振安. 棉花秸秆及其生物炭对滴灌棉田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33** (10): 1987-1994 [Li Q, Liao N, Zhang N, Ru SB, Hou ZA. Effects of cotton stalk and its biochar on ammonia volatilization from a drip irrigated cotton field [J]. *J Agro Environ Sci*, 2014, **33** (10): 1987-1994]
- 6 廖娜. 生物炭对滴灌棉田土壤微生物的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2016 [Liao N. Effects of biochar on soil microorganisms in a drip-irrigated cotton field [D]. Shihezi: Shihezi University, 2016]
- 7 张静文. 连作和轮作棉田土壤微生物多样性分析及PGPR菌株筛选[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2009 [Zhang JW. Soil microbial diversity analysis in cotton continuous fields under continuous and rotation cropping systems and screening of plant-growth promoting rhizobacteria strains [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009]
- 8 田小明, 李俊华, 王成, 褚贵新, 危常州, 郑倩, 邓世伟. 连续3年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤, 2014, **46** (3): 481-488 [Tian XM, Li J H, Wang C, Chu GX, Wei CZ, Zheng Q, Deng SW. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil nutrients, microbial biomass and enzyme activity [J]. *Soils*, 2014, **46** (3): 481-488]
- 9 Erica AH, David M, Gary M. Root stress and nitrogen deposition: consequences and research priorities [J]. *New Phytologist*, 2013, **197**: 712-719
- 10 Brian F, Helena L. The nutritional control of root development [J]. *Plant Soil*, 2001, **232**: 51-68
- 11 郑亚萍, 信彩云, 王才斌, 孙秀山, 杨伟强, 万书波, 郑永美, 冯昊, 陈殿绪, 孙学武, 吴正锋. 磷肥对花生根系形态、生理特性及产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, **37** (8): 777-785 [Zheng YP, Xin CY, Wang CB, Sun XS, Yang WQ, Wan SB, Zheng YM, Feng H, Chen DX, Sun XW, Wu ZF. Effects of phosphorus fertilizer on root morphology, physiological characteristics and yield in peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37** (8): 777-785]
- 12 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 范淑秀, 陈温福. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, **39** (8): 1445-1451 [Zhang WM, Meng J, Wang JY, Fan SX, Chen WF. Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice [J]. *Acta Agro Sin*, 2013, **39** (8): 1445-1451]
- 13 程建峰, 戴廷波, 荆奇, 姜东, 潘晓云, 曹卫星. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收[J]. 土壤学报, 2007, **44**: 266-272 [Cheng JF, Dai TB, Jing Q, Jiang D, Pan XY, Cao WX. Root morphological and physiological characteristics in relation to nitrogen absorption efficiency in different rice genotypes [J]. *Acta Pedol Sin*, 2007, **44**: 266-272]
- 14 褚光, 周群, 薛亚光, 颜晓元, 刘立军, 杨建昌. 栽培模式对杂交粳稻常优5号根系形态生理性状和地上部生长的影响[J]. 作物学报, 2014, **40** (7): 1245-1258 [Chu G, Zhou Q, Xue YG, Yan XY, Liu LJ, Yang JC. Effects of cultivation patterns on root morph-physiological traits and aboveground development of japonica hybrid rice cultivar Changyou 5 [J]. *Acta Agron Sin*, 2014, **40** (7): 1245-1258]
- 15 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002 [Bao SD. Soil Agriculturalization Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002]
- 16 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000 [Li HS. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000]
- 17 田长彦. 新疆棉产业可持续发展面临的挑战与科技对策[J]. 干旱区研究, 2001 (4): 62-67 [Tian CY. Some problems and their scientific and technological countermeasures for sustainable development of cotton production in Xinjiang [J]. *Arid Zone Res*, 2001 (4): 62-67]
- 18 茹思博. 不同生物炭和秸秆用量对滴灌棉花水氮利用率的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2013 [Ru SB. Effects of biochar and cotton straw application rates on WUE and NUE in cotton under drip irrigation conditions [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013]
- 19 Xu G, Sun JN, Shao HB. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity [J]. *Ecol Eng*, 2014, **62** (1): 54-60
- 20 宫亮, 安景文, 邢月华, 刘艳, 孙文涛. 连年深松和施用有机肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 土壤, 2016, **48** (6): 1092-1099 [Gong L, An JW, Xing YH, Liu Y, Sun WT. Effects of continuous subsoiling and organic fertilization on corn yield and soil fertility [J]. *Soils*, 2016, **48** (6): 1092-1099]
- 21 杨春璐, 梁成华, 孙铁珩, 陈新之, 杜立宇. 施用有机肥对棕壤和草甸土固钾作用的影响研究[J]. 生态学杂志, 2004, **23** (5): 228-231 [Yang CL, Liang CH, Sun TH, Chen XZ, Du LY. Effect of organic manure application on the fixation of potassium in brown soil & meadow soil [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23** (5): 228-231]
- 22 陈铭. 红壤对 SO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 的吸附与竞争吸附研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1996, **5** (2): 85-89 [Chen M. Research on adsorption and competitive adsorption of SO_4^{2-} and H_2PO_4^- by red soil [J]. *Trop Subtr Soil Sci*, 1996, **5** (2): 85-89]
- 23 刘冬碧, 余延丰, 范先鹏, 熊桂云, 陈防, 杨永成, 殷辉. 湖北潮土区不同轮作制度下土壤养分平衡状况与评价[J]. 土壤, 2009, **41** (6): 912-916 [Liu DB, Yu YF, Fang XP, Xiong GY, Chen F, Yang YC, Yin H. Soil nutrient balance status and evaluation under different cropping rotations in alluvial soil regions of Hubei [J]. *Soils*, 2009, **41** (6): 912-916]
- 24 罗新宁, 朱友娟, 张宏勇, 万素梅. 塔里木绿洲种植制度对棉田土壤养分性状的影响[J]. 干旱区农业研究, 2012, **30** (3): 114-118 [Luo XY, Zhu YJ, Zhang HY, Wang SM. [J]. Research on characteristics of nutrient uptake and operation of oilseed sunflower in alkaline soil [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2012, **30** (3): 114-118]
- 25 王林娜, 景春梅, 张玲, 席琳乔. 不同种植年限紫花苜蓿和棉花轮作对土壤理化性质的影响新疆农业科学[J]. 2017, **54** (8): 1523-1530 [Wang LN, Jing CM, Zhang L, Xi LQ. Effects of different cultivation years alfalfa and rotation cotton on soil physical & chemical properties [J]. *Xinjiang Agric Sci*, 2017, **54** (8): 1523-1530]
- 26 李锐, 刘瑜, 褚贵新, 高慧. 棉花连作对北疆土壤酶活性、致病菌及拮抗菌多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23** (4): 432-440 [Li R, Liu Y, Chu GX, Gao H. Response of soil enzyme activity and microbial community structure, diversity to continuous cotton cropping in northern Xinjiang [J]. *Chin J Ecol Agric*, 2015, **23** (4): 432-440]
- 27 丁红, 张智猛, 戴良香. 水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48** (5): 872-881 [Ding H, Zhang ZM, Dai LX. Effect of water and nitrogen interaction on peanut root growth and yield

- [J]. *Sci Agric Sin*, 2015, **48** (5): 872-881]
- 28 Arredondo JT, Johnson DA. Allometry of root branching and its relationship to root morphological and functional traits in three range grasses [J]. *J Exp Bot*, 2011, **62** (15): 5581-5594
 - 29 Olmo M, Alburquerque JA, Barrón V, Campillo MCD, Gallardo A, Fuentes M, Villar R. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions [J]. *Biol Fertil Soils*, 2014, **50** (8): 1177-1187
 - 30 Olmo M, Villar R, Salazar P, Alburquerque JA. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development [J]. *Plant Soil*, 2016, **399** (1-2): 1-11
 - 31 刘海龙, 郑桂珍, 关军锋, 李广敏. 干旱胁迫下玉米根系活力和膜透性的变化[J]. 华北农学报, 2002, **17** (2): 20-22 [Liu HL, Zheng GY, Guan JF, Li GM. Changes of root activity and membrane permeability under drought stress in maize [J]. *Acta Agric Bor-Sin*, 2002, **17** (2): 20-22]
 - 32 Flavel RJ, Guppy CN, Tighe MK. Quantifying the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) root system architecture to phosphorus in an oxisol [J]. *Plant soil*, 2014, **385** (1-2): 303
 - 33 张永清, 李华, 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J]. 土壤, 2006, **38** (1): 110 [Zhang YQ, Li H, Miao GY. Effect of fertilization depth on distribution on late senescence of root system of spring wheat [J]. *Soil*, 2006, **38** (1): 110]
 - 34 李絮花, 杨守祥, 于振文, 余松烈. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11** (4): 467 [Li XH, Yang SX, Yu ZW, Yu SL. Effects of organic manure application on growth and senescence of root in winter wheat [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2005, **11** (4): 467]
 - 35 张向前, 曹承富, 陈欢, 乔玉强, 杜世州, 李玮, 赵竹, 徐云姬. 长期定位施肥对砂姜黑土小麦根系性状和根冠比的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, **37** (3): 382-389 [Zhang XQ, Cao CF, Chen H, Qiao YQ, Du SZ, Li W, Zhao Z, Xu YX. Effect of long-term fertilization on root traits and root-shoot ratio of wheat in lime concretion black soil [J]. *J Triticeae Crops*, 2017, **37** (3): 382-389]
 - 36 伍从成, 姜海波, 赵静文, 范学山, 董彩霞, 沈其荣, 徐阳春. 连续5年施用生物有机肥对梨树根系形态及分布的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, **40** (3): 473-480 [Wu CC, Jiang HB, Zhao JW, Fan XS, Dong CX, Shen QR, Xu YC. Effect of continuous application of bio-organic fertilizer for five years on the morphology and distribution of pear roots [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2017, **40** (3): 473-480]
 - 37 Bhattacharyya PN, Jha DK. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2012, **28** (4): 1327-1350.
 - 38 Valdespino-Castillo PM, Merino-Ibarra M, Jiménez-Contreras J. Community metabolism in a deep (stratified) tropical reservoir during a period of high water-level fluctuations [J]. *Environ Monit Ass*, 2014, **186** (10): 6505-6520
 - 39 Akhtar MJ, Asghar HN, Shahzad K. Role of plant growth promoting rhizobacteria applied in combination with compost and mineral fertilizers to improve growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Pak J Bot*, 2009, **41**: 381-390
 - 40 王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领. 硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, **36** (5): 1878-1887 [Wan D, Li X, Wan DZ, Rao W, Du GH, Yang J, Hua DL. Influence of sulfur on the formation of Fe-Mn plaque on root and uptake of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environ Sci*, 2015, **36** (5): 1878-1887]
 - 41 郑诗樟, 姜冠杰, 胡红青. 不同硫肥对油菜养分吸收和分配的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, **36** (2): 265-271 [Zheng SZ, Jiang GJ, Hu HQ. Effects of different rates and forms of sulphur fertilizers on nutrient uptake and distribution of oilseed rape [J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2014, **36** (2): 265-271]
 - 42 王翌. 连作对棉花生长生理效应及硫肥对连作调控效应的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013 [Wang Z. Effects of continuous cropping on growth and physiological characteristics in cotton and controlling effect of sulphur fertilizer on continuous cropping [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013]
 - 43 阿依夏木·沙吾尔, 张凯, 胡雨彤, 穆特力铺·吐热克. 硫肥类型和不同用量对甘草苗根系生长特征的影响[J]. 中药材, 2018, **41** (10): 2015-2019 [A Yi Xia Mu SWE, Zhang K, Hu YT, Mu Te Li Pu TRK. Effects of different sulfur fertilizer types and amount on root growth characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* during seedling stage [J]. *J Chin Med Mat*, 2018, **41** (10): 2015-2019]
 - 44 武荣, 李援农. 水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2013, **44** (6): 963 [Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on root distribution, root/shoot ratio and yield of winter wheat [J]. *J S Agric*, 2013, **44** (6): 963]
 - 45 耿计彪, 张超, 李强, 胡恒宇, 田芮, 马晓丽. 硫肥对小油菜产量、品质及生理特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (4): 121-125 [Geng JB, Zhang C, Li Q, Hu HY, Tian R, Ma XL. Effects of sulfur fertilizer on yield, quality and physiological characteristic of rape (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Soil Fertil Sci*, 2018 (4): 121-125]
 - 46 单玉琳. 不同水平氮硫肥配施对小麦淀粉累积及品质的影响[J]. 土地开发工程研究, 2018 (4): 59-64 [Shan YL. Effects of different ratios of nitrogen and sulfur fertilizer on the accumulation and quality of wheat starch [J]. *Land Devel Eng Res*, 2018 (4): 59-64]
 - 47 曹殿云, 王宏伟, 徐晓旭. 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25** (9): 1298-1305 [Cao DY, Wang HW, Xu XX. Effect of sulfur on nitrogen/sulfur uptake/distribution and yield of maize [J]. *Chin J Eco-agric*, 2017, **25** (9): 1298-1305]
 - 48 韩春丽, 刘梅, 张旺锋, 刘娟, 干秀霞, 郝全胜. 连作棉田土壤剖面钾含量变化特征及对不同耕作方式的响应[J]. 中国农业科学, 2010, **43** (14): 2913-2922 [Han CL, Liu M, Zhang WF, Liu J, Gan XX, Hao QS. The depth variation characteristics of soil potassium in continuous cotton field and its changes with different cultivation practice [J]. *Sci Agric Sin*, 2010, **43** (14): 2913-2922]
 - 49 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 郭翔, 马均. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, **35** (11): 2055-2063 [Sun YJ, Sun YY, Li SY, Guo X, Ma J. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction [J]. *Acta Agro Sin*, 2009, **35** (11): 2055-2063]
 - 50 Kong QH, Li GY, Wang YH, Huo HX. Bell pepper response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels [J]. *Irrigation Science*, 2012, **30** (3): 233-245.
 - 51 陈懿, 陈伟, 高维常, 程建中, 林叶春, 潘文杰. 烟秆生物炭对烤烟根系生长的影响及其作用机理[J]. 烟草科技, 2017, **50** (6): 27-32 [Chen Y, Chen W, Gao WC, Cheng JZ, Lin YC, Pan JW. Effects of tobacco stalk biochar on root growth of flue-cured tobacco and its action mechanism [J]. *Tobacco Sci Technol*, 2017, **50** (6): 27-32]