文章编号:1000-7601(2019)04-0276-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.37

糜子对铁矿复垦生土施肥的生物学响应

王 慧1,2,李永山1,2,董 鹏1,2,孙泰森3

(1.山西省农业科学院棉花研究所,山西 运城 044000;2.运城农业科学院,山西 运城 044000; 3.山西农业大学资源与环境学院,山西 太谷 030801)

摘 要:以襄汾溃坝区复垦生土为栽培基质,采用盆栽试验的方法,研究了施肥对糜子生长及生理生态效应的影响。结果表明:在施钾的基础上施用 N、P、NP 及有机肥均有利于糜子的生长,表现为株高分别增加了 6.1%、42.0%、52.7%、45.1%,叶面积分别增加了 197.6%、207.7%、261.6%、232.5%,地上部干重分别增加了 46.3%、159.1%、186.6%、148.2%,根重分别增加了 13.8%、65.9%、75.7%、67.1%,总根长分别增加了 5.0%、68.4%、99.8%、91.6%,根系总吸收面积分别增加了 24.9%、50.8%、68.3%、62.2%,活性吸收面积分别增加了 46.9%、57.7%、96.9%、58.9%。糜子的旗叶净光合速率、叶绿素含量、可溶性糖含量、根系超氧化物岐化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量等各项生理指标与糜子的生长状况表现出高度的一致性。并最终表现为施用各种肥料均有利于糜子产量的提高,施用 N、P、NP 及有机肥分别比对照增产 80.6%、200.1%、266.8%、230.6%。比较不同处理的增产效果可以发现,在本试验条件下,施磷的效果好于氮,磷是所用生土肥力形成的首要因素,也是糜子产量形成的限制因子。磷、氮、钾三要素之间表现出明显的正交互效应。单施有机肥,在糜子生长前期(拔节期),对糜子的生长有明显的促进作用,但在后期(抽穗期)因缺氮而表现出效果不及其他处理。糜子根际土壤磷酸酶以及脲酶的活性与根系的生长状况表现为显著的正相关关系,表明发达的根系可以促使根际微生物群落的迅速生长和繁殖,并进而提高了根际土壤酶的活性,使得根际原来的生土不断向着熟化的方向发展。在施用一定肥料的前提条件下,矿区复垦生土地上种植糜子,当年便可获得较为正常的产量,并获得较好的经济效益,是当地可选的先锋杂粮作物之一。

关键词:复垦区生土; 施肥;糜子;生长;土壤酶;土壤微生物

中图分类号:S516 文献标志码:A

Physiological effect of fertilizer on the growth and yield of proso in the reclamation of iron mining area

WANG Hui^{1,2}, LI Yong-shan^{1,2}, DONG Peng^{1,2}, SUN Tai-sen³

(1.Institute of Cotton, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Yuncheng, Shanxi 044000, China;

2. Yuncheng Academy of Agricultural Sciences, Yuncheng, Shanxi 044000, China;

3. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: The effects of fertilization on the growth and physiological and ecological responses on proso were studied by pot experiment with the cultivated soil in Xiangfen dam-break area. The results showed that the applications of nitrogen (NK), phosphorus (PK), combination of N and P (NPK), and organic fertilizers with potassium were beneficial to the growth of proso. Plant height increased by 6.1%, 42.0%, 52.7%, and 45.1%; leaf area increased by 197.6%, 207.7%, 261.6%, and 232.5%; dry weight of shoot increased by 46.3%, 159.1%, 186.6%, and 148.2%; root weight increased by 13.8%, 65.9%, 75.7%, and 67.1%, respectively. Total root length increased by 5.0%, 68.4%, 99.8%, and 91.6%; total root absorption area increased by 24.9%, 50.8%, 68.3%, and 62.2%, active absorption area increased by 46.9%, 57.7%, 96.9%, and 58.9%, respectively. The physiological indexes such as net light rate, chlorophyll content, soluble sugar content, root superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, and malondialdehyde (MDA) content were highly consistent with the growth

收稿日期:2018-10-09

condition of the proso. Compared with the control, the application of NK fertilizer, PK fertilizer, NPK, and organic fertilizers increased the yield by 80.6%, 200.1%, 266.8%, and 230.6%, respectively. The applications of all kinds of fertilizers were beneficial to the increase of proso yield. Among all treatments, the effect of PK was better than that of NK, P was the primary factor of fertility formation of raw soil used in this experiment, and it was also the limiting factor of the formation of proso yield. Phosphorus, N, and potassium showed significant positive additive effects. The application of organic fertilizer alone could promote the growth of the proso in the early stage of growth (jointing stage), but at the late stage (heading stage), the effect was not as good as that of other treatments because of N deficiency. The activities of phosphatase and urease in rhizosphere soil were positively correlated with the growth of root system, which indicated that the developed root system could promote the rapid growth and reproduction of rhizosphere microbial community. Furthermore, the enzyme activity of rhizosphere soil was improved, which made the original rhizosphere soil develop to the maturation. Under the precondition of applying certain fertilizer, planting proso in the reclaimed land in the mining area obtained relatively normal yield and good economic benefit in that year, and it is one of the local crops which can be selected as pioneer grain.

Keywords: reclaimed land; fertilization; proso; growth; soil enzyme; soil microorganism

矿区土地复垦是对在矿区生产建设过程中因 挖损、塌陷、压占等造成破坏的土地采取整治措施, 使其恢复到可供利用状态的活动。山西是一个资 源大省,矿区土地复垦是该省充分利用土地资源、 防止环境破坏、减少土地浪费、缓解土地供求矛盾 的重要措施,研究矿区复垦土壤的肥力提升及其有 效利用具用重要的理论与现实意义[1-3]。2008年9 月8日,山西省襄汾县新塔矿业公司尾矿库发生特 大溃坝事故,泄容量达 26.8 万立方米,大量的磁铁 矿尾矿覆盖在了下游的农田之上,除了可能给土壤 带来大量的 Fe、Cu 等金属的污染之外,在救灾过程 中因为使用大型机械翻动而在原有土壤表层形成 了由溃坝物与土壤混合而成的生土层,因其养分含 量低且理化性质恶化,严重影响了农作物的生长, 甚至绝收,已不适合种植原有的小麦、玉米等作 物[4]。因此,亟待寻求土壤的培肥措施及筛选适宜 的替代作物。

糜子(Panicum miliaceum)是黄土高原旱薄区主要的抗逆度荒作物之一,因其营养价值较高、抗逆性强且生长周期较短而深受当地农民的喜爱^[5-7]。前人的研究结果表明^[5],糜子也是生土地上种植面积较大的先锋作物,在其它作物几乎无法获得收获的生土地上种植糜子,仍然可以获得一定的产量,表现出极强的耐旱与耐瘠薄特性。如前所述,襄汾县溃坝覆盖区土壤质量的调查与评价结果表明,溃坝覆盖区土壤存在的主要问题是由溃坝物与土壤混合而成的生土层中氮磷等养分缺乏及土壤的物理性质变差^[4]。那么种植糜子这种耐瘠性很强的杂粮作物,并施用一定的肥料,是否可以在改良土壤的同时,也获得一定的经济效益?综观前人有关

糜子施肥的研究可以发现,已有的研究多集中在正常条件下的肥料施用^[8-10],而有关生土地上糜子施肥的研究尚不多见^[11]。为此,试验以襄汾溃坝覆盖后的表层生土为栽培基质,研究了不同施肥处理对该区土壤的改良作用及其对糜子生长及产量的影响,尤其是对糜子根系的生长及与之有关的土壤微生物和酶活性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于2014年4—10月在山西农业大学校农 场内进行。盆栽试验采用直径 20 cm、高 30 cm 的 聚乙烯塑料桶为试验用盆,每盆装土 14 kg,供试土 壤取自襄汾溃坝覆盖后的尾矿与表土的混合物,其 养分含量为:有机质 4.72 g·kg⁻¹,全氮 0.021 g· kg⁻¹, 速效磷 3.24 mg·kg⁻¹, 速效钾 98.84 mg·kg⁻¹。 阳离子代换量 23.6 cmol·kg⁻¹,pH 值为 7.49。试验 所用的糜子品种为当地农家品种"黄糜黍",由当地 农户提供。试验设 CK、NK、PK、NPK、有机肥(OM) 共5个处理。CK 为对照,P 代表施用磷肥(P,O,0.1 g·kg⁻¹),N 代表施用氮肥(N 0.15 g·kg⁻¹)、K 代表 施用钾肥(K,O 0.12 g·kg⁻¹),OM 代表施用有机肥 (牛粪 21.4 g·kg⁻¹, N、P, O₅、K, O 含量分别为 1.89%、1.78% 和 0.73%),肥料全部用作基肥,氮肥 用尿素,磷肥用过磷酸钙,钾肥用氯化钾,分别于播 种前一次性施入。4月28日播种,出苗后每盆留均 匀一致的苗6株。各试验处理分别重复9次,共45 盆。在抽穗期和拔节期,各取3个重复,用于测定相 关生理生态数据和指标,最后剩余的3次重复实验, 用于收获计产和考种。

1.2 测定项目与方法

278

糜子植株氮含量的测定采用半微量凯氏定氮法^[12];糜子叶片光合速率测定采用光合仪^[12];两二醛(MDA)的测定采用硫代巴比妥酸法^[12];糜子根系及地上部的POD活性和SOD活性分别采用愈创木酚比色法测定和核黄素法^[13];糜子根系活性吸收面积与根系总吸收面积测定,采用次甲基蓝吸附法^[13];糜子的根长采用根系扫描仪法^[12];植株可溶性糖的测定采用蒽酮比色法^[12];糜子根际土壤微生物数量的测定采用稀释平板法^[14];土壤酶的测定采用分光光度法^[14]。

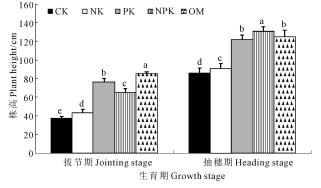
1.3 数据整理与分析

采用 Excel 整理试验所得数据,使用 SAS 数据分析软件对实验数据进行统计分析,并进行 1%显著性水平的 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 铁矿复垦生土施用不同肥料对糜子地上部生 长的影响

2.1.1 对糜子株高的影响 从图 1 可以看出,不同施肥处理均能使糜子的株高有所增加,其中施磷钾处理的效果明显高于氮钾处理,而且在拔节期施磷钾的效果甚至优于氮磷钾处理,表明在拔节期施磷的基础上施用氮,甚至影响了糜子株高的增加,这可能与所用的氮肥种类及数量有关。据有关资料报导,在作物幼苗期施用大量尿素,可能会抑制作物的生长[11]。但这种抑制作用,随着生育期的推后而减弱,到抽穗期施用氮磷钾处理高于施用磷钾处理。施用有机肥有利于糜子株高的增加,尤其是在前期,其对株高的促进作用最优,但抽穗期其作用不



注:不同字母表示在 P<0.05 水平下差异显著,下同。 Note: Different letter are significantly different at P<0.05 level,

图 1 不同施肥处理对糜子株高的影响

the same below.

Fig.1 The influence on plant height of proso by different fertilizer treatments in different periods 如氮磷钾处理,这可能与有机肥的施用量有关,本试验所用牛粪折合成氮、磷、钾养分的数量少于施用化肥中所含氮、磷、钾的含量,尤其是氮含量较低,导致糜子后期甚至出现了缺氮的症状。进一步采用 SAS 统计分析软件进行多重比较结果表明,不同生育期各处理间均达到了显著差异水平。

第 37 卷

2.1.2 对糜子叶面积的影响 图 2 结果表明,与施肥对糜子株高的影响类似,不同的施肥处理均能使糜子的叶面积有所增加,而且也同样表现出施磷钾处理的效果好于氮钾处理,在拔节期施磷钾的效果也优于氮磷钾处理,表明在拔节期施磷的基础上施用氮,不仅影响了糜子株高的增加,而且也影响到了糜子叶面积的增大。但这种抑制作用,也随着生育期的推后而减弱,同样表现出抽穗期时施用氮磷钾处理反超了施用磷钾处理的现象。施用有机肥对糜子叶面积的影响最大,尤其是在前期,但抽穗期其作用不如氮磷钾处理。统计分析结果表明,不同生育期各处理间均达到了显著差异水平。

2.1.3 对糜子地上千重的影响 从图 3 可以看出,除了拔节期施用氮钾处理之外,不同施肥处理均能使糜子的地上重有所增加,其中有磷的处理组合表现均有显著效果,表明在本试验条件下,磷是糜子生

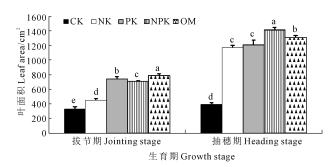


图 2 不同施肥处理对糜子单株叶面积的影响

Fig.2 The influence on leaf area of proso by different fertilizer treatments in different periods

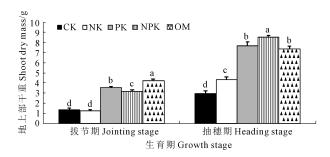


图 3 不同施肥处理对糜子地上部重的影响

Fig.3 The influence on aboveground weight of proso by different fertilizer treatments in different periods 长的最重要影响因子,磷的效果明显高于氮,这可能与本试验所用栽培介质中含磷较少有关,磷成了溃坝覆盖物影响区土壤肥力的最小养分,根据李比希的最小养分论推论,只有补充了最小养分,才有可能增加作物的产量。

2.2 铁矿复垦生土施用不同肥料对糜子根系生长 的影响

2.2.1 对糜子总根长的影响 根系是植物的吸收器官,作物生长所需要的水分与养分都是主要靠根系吸收的,作物的总根长直接影响着作物的吸收范围,所以对养分及水分的吸收起着至关重要的作用。从图 4 可以看出,不同施肥处理对糜子根长的增加均有一定的效果。统计分析结果表明,除了拔节期施用氮钾处理与对照未达显著差异水平之外,其余各处理间均达到了显著差异水平,表明施用各种肥料确实有利于增加溃坝物影响区土壤上糜子根长的增加。比较不同处理间增加的幅度可以看出,在施用钾肥的基础上,磷肥的施用效果明显好于氮,再次反映了磷可能就是该土壤限制因子。

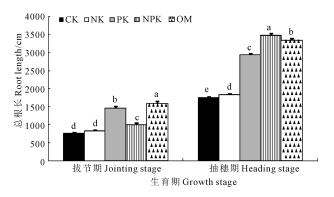
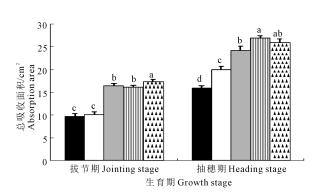
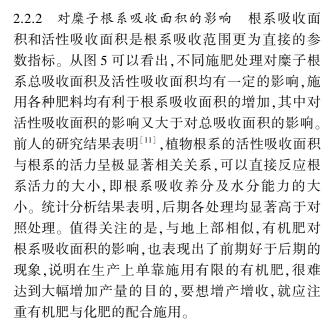


图 4 不同施肥处理对糜子总根长的影响

Fig.4 The influence on root length of proso by different fertilizer treatments in different periods





2.3 铁矿复垦生土施用不同肥料对糜子生理指标的影响

对糜子地上部生理指标的影响 2.3.1 为了研究 不同施肥处理组合对抽穗期糜子生理指标的影响, 在抽穗期分别对糜子旗叶叶绿素含量、可溶性糖含 量及净光合速率进行了测定。由图6可以看出,不 同处理对抽穗期糜子旗叶叶绿素含量及旗叶净光 合速率的影响表现出高度的一致性,凡是有氮的处 理,这两个指标都明显较高,突出体现出了氮对叶 绿素及光合效率的影响,氮对光合的影响大于磷的 影响。旗叶可溶性糖含量与前两个指标有所不同, 表现出受磷的影响大于氮,氮钾处理糜子旗叶中可 溶性糖的含量不及磷钾处理,磷素营养对糖的合成 影响高于氮素营养。要想获得高产,就必须做到氮 磷配合,均衡作物所需要的各种营养供应。与前述 形态指标吻合,有机质对糜子生理指标的影响也表 现出了后劲不足的情况,在抽穗期,单施有机肥已 不能完全满足糜子生长对各类养分的需求。

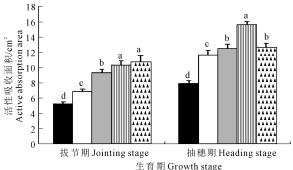


图 5 不同施肥处理对糜子根系总吸收面积和活性吸收面积的影响

Fig.5 The influence on total absorption area and active absorption area of proso root by different fertilizer treatments in different periods

Fig.6

0

CK

PK

NK

NPK

2.3.2 对糜子根系生理指标的影响 抽穗期糜子根系的 SOD、POD 活性及 MDA 含量测定结果表明(图7),该时期根系的 SOD 活性与地上部生长形态指标表现出了一致性,凡是地上及地下生长好的处理,根系的 SOD 活性也较高。糜子根系 MDA 含量也与根系的 SOD 活性表现出一致性的规律,SOD 活性高的处理 MDA 含量就较低。值得关注的是不同处理对糜子根系中 POD 活性的影响与根系 SOD 活性的变化趋势并不一致,不同处理糜子根系中过氧化物酶活性的变化规律性不明显,尤其是对照处理

根系中 POD 活性还高于了其他处理,甚至与施用磷钾处理间达到了显著差异水平,其原因有待于进一步进行探究。

2.4 施用不同肥料对溃坝物影响区糜子产量及其构成因素的影响

由表 8 可以看出:在施用钾肥的基础上施用磷、氮、氮磷及单施有机肥均可以增加糜子的产量,统计分析结果表明,各处理间均达到了显著差异水平。比较不同处理可以看出,糜子产量的增加与其生长状况表现出高度的一致性,在施钾的基础上,施

0

NK PK

处理 Treatment

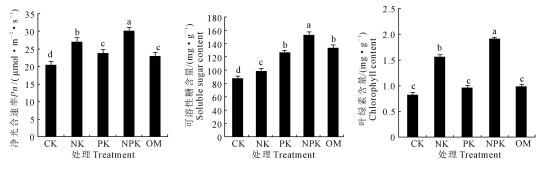
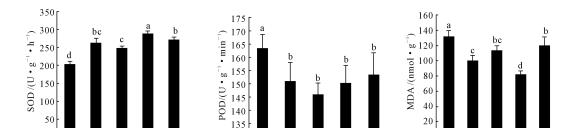


图 6 不同施肥处理对糜子抽穗期旗叶生理指标的影响

The influence on physiological indexes of proso flag leaf by different fertilizer treatments at heading stage



处理 Treatment 处理 Treatment 处理 Treatment 图 7 不同施肥处理对抽穗期糜子根系生理指标的影响

130

Fig. 7 The influence on physiological indexes of proso root by different fertilizer treatments at heading stage

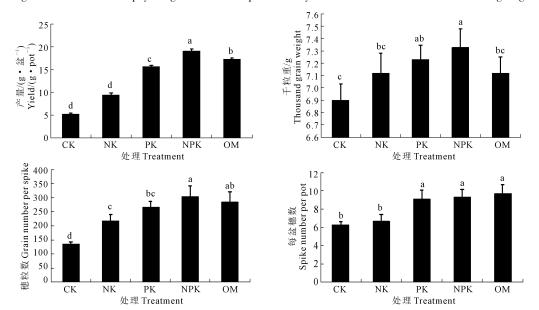


图 8 不同施肥处理对糜子产量及其构成因子的影响

Fig.8 The influence on yield and yield component factors of proso by different fertilizer treatments

磷的效果明显好于施氮,施磷处理糜子的穗粒数、 千粒重及每盆穗数均明显高于施氮处理,再次证 明,磷确实是本试验所用土壤增产的关键限制因 子。由图 8 还可以看出,单施有机肥对当季糜子产 量增加的效果不如施用氮磷钾化肥,这可能与所选 有机肥的养分含量,尤其是氮素养分含量较低,导 致了糜子后期缺肥有关。图 8 结果表明,单施有机 肥处理的糜子盆穗数并没有减少,甚至还略高于施 用氮磷钾处理,但千粒重和穗粒数均明显低于氮磷 钾处理,表明单施有机肥处理在前期生长及分蘖成 穗过程中没有受到影响,只是后期因缺肥而导致了 穗粒数与千粒重有所下降,并最终使糜子的产量有 所降低。这也提醒我们,如果在单施有机肥处理糜 子的生长后期能及时补充氮及其他营养元素,可以 形成更高于单施氮磷钾肥产量的效果,生产中应坚 持有机肥与无机肥配合的施肥原则。

2.5 铁矿复垦生土施用不同肥料对糜子根际微生物及土壤酶活性的影响

为了探明本试验条件下施肥对所用供试土壤(溃坝覆盖物与土壤的混合物)生物活性的影响程度,在糜子生长后期,对其根际土壤细菌、真菌、放线菌及土壤脲酶、磷酸酶活性进行了测定(图9~10)。由图9可以看出,不同施肥处理对三大微生物数量均有一定的影响,但不同类群有所不同,对根际土壤的细菌数量而言,在施钾的基础上施用氮处理与施磷处理间没有显著差异,氮对真菌数量的提高效果优于磷,但施肥对根际土壤中放线菌数量影响的效果又相反。单施有机肥对根际土壤微生物数量的影响表现为更有利于促进真菌数量的增加,表现为各处理中效果最佳,说明为了尽快恢复土壤的肥力,施用有机肥是非常必要的。由图10也可以看出单施有机肥对根际土壤酶活性的良好效果。

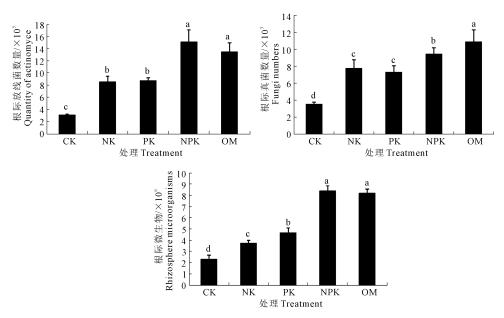


图 9 不同施肥处理对糜子根际微生物数量的影响

Fig. 9 The influence on number of rhizosphere microorganisms of proso by different fertilizer treatments

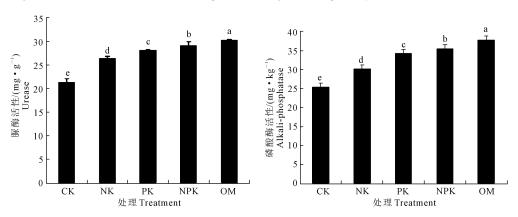


图 10 不同施肥处理对糜子根际土壤酶活性的影响

Fig. 10 The influence on soil enzymes of proso rhizosphere by different fertilizer treatments

结合前述不同施肥处理对糜子根系各生长与生理 指标的影响可以看出,不同施肥处理对糜子根际土 壤微生物数量及土壤酶活性的影响表现出与其地 上和地下生长指标对肥反应的基本一致性。糜子 地上部生长越好、根系越发达、根长越长、根重越 大、根系活性吸收面积越多、活力越强,其根际土壤 酶活性就越高,微生物的数量也越多。

3 讨论与结论

土地复垦是我国实现耕地总量动态平衡、缓解 人地矛盾的重要途径,培肥土壤是改良复垦土壤的 一项有效措施,也是矿区土地复垦的最终目标[3,15]。 目前,土壤培肥研究已经开展较多,但研究对象侧 重于低产田或退化土地[16-17]等未受扰动的土地,从 矿区土地复垦领域特殊性的角度考虑,复垦地的土 壤培肥研究相对较少[18]。已有的复垦土壤培肥研 究也多集中在关于直接覆盖于矿区之上的母质性 土壤[19]。关于掺杂有铁矿溃坝物的母质性土壤(生 土)的研究尚未见报道。前人关于氮、磷、钾三要素 的研究结果多数认为氦为作物产量增加的首要因 子,其次是磷,再次是钾。本试验结果表明,在氮磷 均缺的情况下(全氮 0.021 g·kg⁻¹,速效磷 3.24 mg ·kg⁻¹),磷的作用大于氮,是本试验供试土壤的首 要限制因子,尤其是在糜子生长的前期,仅施氮钾 而不施用磷的处理及对照处理,糜子生长速度远低 于有磷的处理。拔节期糜子的株高、叶面积、地上 部生物量、根重、根长和根系吸收面积等形态指标 及叶绿素含量、净光全速率、可溶性糖含量、根系 SOD 活性、POD 活性等均表现为有磷的处理好于无 磷的处理,这可能与本试验所用土壤中速效磷更为 缺乏的特点有关。

在施用钾肥的基础上施用磷、氮、氮磷及单施有机肥均可以增加糜子的产量,磷的增产效果优于氮,而氮与磷配合的效果最佳。单施有机肥对当季糜子产量增加的效果不如施用氮磷钾化肥,这可能与所选有机肥的养分含量较低有关,尤其是氮素养分含量较低有关。试验结果表明,单施有机肥处理的糜子每盆穗数并没有减少,甚至还略高于施用氮磷钾处理,但千粒重和穗粒数均明显低于氮磷钾处理,表明单施有机肥处理在前期生长及分蘖成穗过程中并没有受到影响,只是后期因缺肥而导致了穗粒数与千粒重有所下降,并最终使得糜子的产量有所降低。这也提醒我们,如果在单施有机肥处理糜子的生长后期能及时补充氮及其他营养元素,可以形成更高于单施氮磷钾肥产量的效果,生产中应坚

持有机肥与无机肥配合的施肥原则。

前人的研究结果表明,土壤中细菌、真菌、放线 菌等微生物的数量可以在一定程度上反映土壤的 肥力水平或肥沃程度。土壤中各种酶的活性也可 以反映土壤微生物及土壤的肥沃水平[20]。本试验 结果表明,不同施肥处理对三大微生物数量均有一 定的影响,但对不同类群的影响程度还有所不同。 对根际土壤的细菌数量而言,在施钾的基础上施用 氮处理与施磷处理间没有显著差异,氮对真菌数量 的提高效果优于磷,但施肥对根际土壤中放线菌数 量影响的效果又相反,反映出了事物本身的复杂 性。单施有机肥对根际土壤微生物数量的影响表 现为更有利于促进真菌数量的增加,表现为各处理 中效果最佳,说明为了尽快恢复土壤的肥力,施用 有机肥是非常必要的。结合前述不同施肥处理对 糜子根系各生长与生理指标的影响可以看出,不同 施肥处理对糜子根际土壤微生物数量及土壤酶活 性的影响表现出与其地上和地下生长指标对肥反 应的基本一致性。糜子地上部生长越好、根系越发 达、根长越长、根重越大、根系活性吸收面积越多、 活力越强,其根际土壤酶活性就越高,微生物的数 量也越多。施肥不仅有利于促进糜子的生长,而且 能明显增加根际土壤酶活性及微生物的数量,而后 者数量的增加又有利于进一步活化土壤中的养分, 促进了生土快速熟化和作物的生长发育,最终形成 一个良性的土壤生态循环系统。

糜子起源于我国,又称为黍子、糜黍、黍稷等, 因其营养价值较高,适口性好,且抗逆性强及生育 期短而成为了黄土高原旱薄区主要的抗逆渡荒作 物之一。前人的研究结果表明,糜子可以作为生土 地上种植的先锋作物。本试验结果表明,在襄汾县 溃坝覆盖区由溃坝物与土壤混合而成的生土层上 种植糜子,确实可以实现改良土壤并在当季获得一 定效益,如果能配合施用一定的肥料,尤其是磷肥 及有机肥,不仅可以提高糜子产量,而且有利于土 壤中微生物及土壤酶活性的提高。

参考文献:

- [1] 陈倩,刘善江,白杨,等.山西矿区复垦土壤中解磷细菌的筛选 及鉴定[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1505-1516.
- [2] 许剑敏.生物菌肥对矿区复垦土壤磷、有机质、微生物数量的影响[J].山西农业科学,2011,39(3);250-252.
- [3] 高继伟,谢英荷,李廷亮,等.不同培肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(5);6-11.
- [4] 王慧, 孙泰森. 不同水分条件下先锋植物博落回对氮磷胁迫的 生物学响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1320-1327.

- [5] 柴岩.中国小杂粮产业发展报告[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [6] Zhou X, Hao T, Zhou Y L.Relationships between antioxidant compounds and antioxidant activities of tartary buckwheat during germination [J] Journal of Food Science and Technology, 2015, 52 (4):2458-2463.
- [7] Huang X Y, Zeller F J, Huang K F. Variation of major minerals and trace elements in seeds of tartary buckwheat [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2014, 61(3):567-577.
- [8] 杨文耀,刘建设,门果桃,等.尿素、磷酸二铵作种肥对糜子单位面积苗数、单位面积成穗数、单位面积产量的影响[J].内蒙古农业科技,2013,(3):60-62.
- [9] 王君杰, 陈凌, 张盼盼, 等.硼、锌肥对糜子干物质积累与分配和产量的影响[J].中国农学通报, 2013, 29(30):124-129.
- [10] 王君杰,曹晓宁,王海岗,等.施氮时期对糜子产量和氮素利用效率的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(12):20-25.
- [11] 张永清,苗果园.生土施肥对黍子根系生长及生理生态效应的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):158-161,169.
- [12] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社, 1992:88-93.

- [13] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报, 1983, 9(1):77-84.
- [14] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[J].北京: 科学出版社,2008.
- [15] 鲁叶江,李树志,张春娜.东部平原矿区不同培肥处理对复垦土壤特性的影响[J].中国农学通报,2012,28(05):221-225.
- [16] 许学前,吴敬民.不同施肥组合的土壤培肥效果研究[J].土壤通报,2000,31(1):27-29.
- [17] 胡诚,曹志平,叶钟年,等.不同的土壤培肥措施对低肥力农 田土壤微生物生物量碳的影响[J].生态学报,2006,26(3): 808-814.
- [18] 鲁叶江,李树志,张春娜.东部平原矿区不同培肥处理对复垦土壤特性的影响[J].中国农学通报,2012,28(05):221-225.
- [19] 刘鑫,韩鹏远,王立革,等.山西省采煤沉陷地土地破坏及复垦土壤培肥研究现状[J].山西农业科学,2008,36(11):97-99.
- [20] 钱奎梅,王丽萍,李 江.矿区复垦土壤的微生物活性变化 [J].生态与农村环境学报,2011,27(6):59-63.

(上接第275页)

- [8] Day S J, Norton J B, Strom C F, et al. Gypsum, langbeinite, sulfur, and compost for reclamation of drastically disturbed calcareous saline-sodic soils [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018,16(1):295-304.
- [9] Sun J N, Yang R Y, Li W X, et al. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil [J]. Journal of Soils and Sediments. 2018, 18(11):3271-3279.
- [10] Santini T C, Fey M V. From tailings to soil: long-term effects of a-mendments on progress and trajectory of soil formation and in situ remediation in bauxite residue [J]. J Soils Sediments, 2018, 18: 1935-1949.
- [11] Yazdanpanah N, Mahmoodabadi M. Reclamation of calcareous salinesodic soil using different amendments; Time changes of soluble cations in leachate [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6 (7): 2519-2528.
- [12] Seenivasan R, Prasath1 V, R Mohanraj. Sodic Soil reclamation in a semi-arid region involving organic amendments and vegetative remediation by Casuarina equsetifolia and Erianthus arundinaceus [J]. Environ. Process., 2016, 3(2):431-449.
- [13] Yan Y, Liu J, Liu C M. Effect of organic materials on the chemical properties of saline soil in the Yellow River Delta of China[J]. Front. Earth Sci., 2015,9(2):259-267.
- [14] Fan Y, Ge T, Zheng Y, et al. Use of mixed solid waste as a soil a-mendment for saline-sodic soil remediation and oat seedling growth improvement [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(21):21407-21415.
- [15] Dai H C, Chen Y Q, Yang X L, et al. The effect of different organic materials amendment on soil bacteria communities in barren sandy loam soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(30):24019-24028.

- [16] 张翼夫,李洪文,胡红,等.打孔灌沙促进漫灌下盐碱土水分下 渗提高脱盐效果[J].农业工程学报,2017,33(6):76-83.
- [17] 褚琳琳, 康跃虎, 陈秀龙, 等. 喷灌强度对滨海盐碱地土壤水盐 运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 76-82.
- [18] 张俊华, 孙兆军, 贾科利, 等. 燃煤烟气脱硫废弃物及专用改良剂改良龟裂碱土的效果[J]. 西北农业学报. 2009, 18(5): 208-212.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [20] Sakai Y, Matsumoto S, Sadakata M. Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of mental content in corn grains [J]. Soil Sediment Contamination, 2004, 13(1): 65-80.
- [21] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版 社,1993.
- [22] 李茜, 孙兆军, 秦萍, 等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱 土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70-73.
- [23] Pei G P, Li Y X, Zhu Y E, et al. Immobilization of lead by application of soil amendment produced from vinegar residue, stainless steel slag, and weathered coal [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(28):22301-22311.
- [24] 刘杰. 向日葵对碱胁迫和盐胁迫适应机制比较[D]. 长春: 东北师 范大学,2011.
- [25] Shahid M, Dumat C, Silvestre J, et al. Effect of fulvic acids on lead-induced oxidative stress to metal sensitive Vicia faba L. plant [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(6):689-697.
- [26] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, et al. The potential of residues of furfural and biogas as calcareous soil amendments for corn seed production [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (7):6217-6226.