

土壤改良剂对土壤紧实度及燕麦生长状况的影响

刘慧军^{1,2}, 刘景辉¹, 于健³, 徐胜涛¹, 史吉刚³

(1. 内蒙古农业大学 燕麦产业研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2. 内蒙古赤峰市翁旗农业局, 内蒙古 赤峰 024500; 3. 内蒙古水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 研究了不同土壤改良剂(聚丙烯酸钾, 聚丙烯酰胺, 腐殖酸钾, 聚丙烯酸钾+腐殖酸钾, 聚丙烯酰胺+腐殖酸钾)对土壤紧实度及燕麦生长状况的影响。结果表明, 各改良剂处理均能减小土壤紧实度, 表现为: 聚丙烯酸钾+腐殖酸钾>聚丙烯酰胺+腐殖酸钾>聚丙烯酸钾>聚丙烯酰胺>腐殖酸钾>对照, 土壤紧实度均随着土壤深度增加而增加; 土壤改良剂对燕麦株高和干物质质量具有显著的提高作用, 复配处理株高优于其他单施处理; 土壤改良剂处理下籽粒产量均显著高于对照, 其中聚丙烯酸钾+腐殖酸钾和聚丙烯酰胺+腐殖酸钾籽粒产量较其他处理高, 分别为 4 694.2 和 4 566.9 kg/hm², 较对照增产 21.66% 和 18.36%, 生物产量的增产效果表现同籽粒产量; 各土壤改良剂处理水分利用效率均显著高于对照, 其变化趋势与产量变化趋势一致, 复配处理效果更佳。

关键词: 土壤改良剂; 土壤紧实度; 燕麦生长状况; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0130-05

中图分类号: S512.6, S278

Effects of Soil Amendments on Soil Compaction and Growth Status of Oat

LIU Hui-jun^{1,2}, LIU Jing-hui¹, YU Jian³, XU Sheng-tao¹, SHI Ji-gang³

(1. Industry Research Center of Oat, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot,

Inner Mongolia 010019, China; 2. Agriculture Bureau of Ongniud Banner, Chifeng 024500, China;

3. Water Resources Research Institute of Inner Mongolia, Huhhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: Effects of different soil amendments on soil compaction and growth status of oat were studied. Results showed that all the soil amendments could reduce soil compaction; the order of them was potassium polyacrylate + potassium humate > polyacrylamide + potassium humate + potassium humate > potassium polyacrylate > polyacrylamide > potassium humate > CK; and soil compaction increased with the increase of soil depth. Soil amendments significantly increased plant height of oat and dry matter weight, and the height for the mixed use was higher than the single use. Grain yields under the amendment treatments were significantly higher than that under the control. The yields for potassium polyacrylate + potassium humate and polyacrylamide + potassium humate were higher than that for the single use, being 4 694.2 and 4 566.9 kg/hm² with the increments of 21.66% and 18.36%, respectively. Biological yield had the same effect as grain yield. The WUE under the amendment treatments was significantly higher than that under the control, and the WUE under mixed amendment was higher than that under other soil amendments.

Keywords: soil amendment; soil compaction; growth status of oat; water use efficiency

土壤紧实度是土壤重要的物理性状之一, 它是衡量土壤中三相物质存在状态和容积比例的重要指标, 对土壤的水、肥、气、热及其物理、化学和生物学过程等因素具有调控作用^[1], 进而对植物养分吸收和根、叶等器官和植株的生长发育产生重要影响^[2]。燕麦

作为一种优质的粮饲兼用作物, 在内蒙古的栽培面积约为全国的 40%, 居全国之首。近年来, 由于干旱缺水导致该区土壤严重板结, 对燕麦生产造成直接的威胁。土壤改良剂能够有效地改善土壤理化性状^[3], 并对土壤微生物产生积极影响^[4], 从而提高退化土壤的

收稿日期: 2012-06-04

修回日期: 2013-03-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“抗旱保水材料蓄水保墒生态机制研究”(31160267); 内蒙古科技计划项目“燕麦超高产高效技术集成示范(20090708)”, “燕麦高产高效与绿色生产关键技术研究示范”(20100704); 内蒙古农业大学科技创新团队建设计划项目“燕麦种质资源创新与利用”(NDTD2010-8)

作者简介: 刘慧军(1985—), 男(汉族), 内蒙古乌海市人, 硕士研究生, 主要从事耕作制度与农业生态系统。E-mail: liuhuijun1144@163.com。

通信作者: 刘景辉(1965—), 男(汉族), 内蒙古通辽市人, 博士生导师, 教授, 主要从事耕作制度与农业生态系统研究。E-mail: cauljh@yahoo.com.cn。

生产力^[5],提高作物发芽出苗率,促进作物生长发育,最终提高作物产量,为解决上述问题提供了一个有效的途径。目前,国内外关于改良剂对土壤改良的研究较多,大多都集中在单一改良剂对作物和土壤性状的影响上,而不同土壤改良剂及其复配对燕麦土壤紧实度及其生长的研究较少。本文通过研究不同改良剂对燕麦土壤紧实度及燕麦生长变化情况,以期为该区域土壤改良和燕麦高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011年在内蒙古武川县大豆铺乡大田进行,该区属中温带大陆性季风气候,海拔1555 m,年均气温2.6℃,年均降水量358.3 mm,年均日照时数2787.9 h,无霜期约110 d。试验地土壤为沙壤,耕层土壤有机质含量8.8 g/kg,碱解氮含量32.4 mg/kg,速效磷含量6.6 mg/kg,速效钾含量54 mg/kg,pH值为7.6。

1.2 试验材料与设计

供试作物:燕麦,品种为燕科1号。土壤改良剂:聚丙烯酸钾(PAA-K),由东营华业新材料有限公司提供;聚丙烯酰胺(PAM),由唐山博亚公司提供;腐殖酸钾(HA-K),由内蒙古武川县农业局提供。所施肥料:磷酸二铵(N:P:K=18:46:0)。

试验设6个处理,分别为CK:不施改良剂;A₁:75 kg/hm² PAA-K; A₂:75 kg/hm² PAA-K + 1500 kg/hm² HA-K; A₃:75 kg/hm² PAM; A₄:75 kg/hm² PAM + 1500 kg/hm² HA-K; A₅:1500 kg/hm² HA-K;随机区组排列,重复3次,小区面积5 m×6 m。试验于2011年5月25日播种,9月25日成熟收获。播种前将不同土壤改良剂均匀撒施于各小区内,之后用旋耕机将其旋入地下,旋耕深度15 cm。旋耕后采用机播燕麦,播量150 kg/hm²,行距25 cm,以150 kg/hm²磷酸二铵作为基肥在播种时同时施入。全生育期内田间管理同当地常规大田,无追肥,无灌水。

1.3 测定项目与方法

在拔节期、抽穗期和灌浆期采用TJSD-750土壤紧实度仪分别测定0—10,10—20和20—40 cm土壤紧实度(重复6次);分别在燕麦各生育时期在田间取1 m样段燕麦植株内选取20株用卷尺测定株高;采用烘干称重法分别在各生育时期在田间取1 m样段燕麦植株内选取20株分别测定干物质重。在燕麦收获时每小区实收2 m²进行测产,并取20株进行考种;水分利用率[kg/(mm·hm²)] = 产量(kg)/耗水

量(mm)(1 m土层土壤水分利用效率),耗水量 = 播前土壤贮水量 + 生育期降水量 + 田间灌水量 - 成熟期土壤贮水量,土壤贮水量(mm) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm³) × 土壤质量含水量(%),用土钻钻取不同深度(0—10,10—20,20—40,40—60,60—80和80—100 cm)土层土壤,重复3次,采用烘干法测定土壤质量含水量。

1.4 数据处理

试验数据均采用Microsoft Excel和SPSS 13.0统计软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对土壤紧实度的影响

由图1可知,不同生育时期土壤紧实度均随着土壤深度增加而增加,即0—10 cm土层 < 10—20 cm土层 < 20—40 cm土层。各处理拔节期0—10,10—20和20—40 cm土壤紧实度大小分别为938.4~1182.5,1099.1~1698.3和1870.8~2314.7 kPa,抽穗期分别为672.7~950.0,796.3~1642.7和1555.3~2290.0 kPa,灌浆期分别为1028.3~1723.5,2667.6~3784.7和3569.1~4480.4 kPa。整体看,不同时期不同土层各土壤改良剂处理土壤紧实度均小于对照,大致表现为A₂ > A₄ > A₁ > A₃ > A₅ > CK,由于受外力和降水等因素的影响0—10 cm土层各处理差异不显著,10—20 cm土层较20—40 cm土层差异显著,拔节期、抽穗期和灌浆期10—20 cm土层A₁,A₂,A₃,A₄和A₅分别较对照减少318.5,521.3,275.3,598.2和240.8 kPa,581.7,846.3,567.3,822.4 kPa和375.1,414.7,1117.0,635.2,854.3和341.8 kPa,其中A₂平均表现较明显。可见土壤改良剂对0—40 cm各土层的土壤紧实度影响较大,尤其对10—20 cm和20—40 cm土层作用明显。

2.2 土壤改良剂对燕麦株高的影响

株高是衡量作物生长状况的一项基本指标,是形成产量的基础。从图2可以看出,燕麦株高均随生育时期的推进呈上升趋势,从苗期到抽穗期,燕麦株高增长速度较快,此后增速减缓,灌浆之后较为缓慢。不同处理条件下燕麦株高均高于对照,各生育时期不同处理分别比对照增加了0.71%~7.09%,1.48%~5.65%,1.51%~6.38%,2.72%~5.60%和3.29%~5.60%。显著性分析结果表明,苗期与拔节期各处理间燕麦株高差异不显著;抽穗期A₂和A₄与CK和A₅差异显著,其他处理与CK差异不显著,A₂与A₄差异不显著与其他处理差异显著,A₁,A₃,A₅间和A₁,A₃,A₄间差异不显著;灌浆期A₁,A₂,

A₄ 与 CK 和 A₅ 差异显著, A₅ 与 CK 差异不显著, A₁, A₂, A₄ 间差异不显著; 成熟期各土壤改良剂处理均与 CK 呈显著差异, A₁, A₃, A₅ 之间, A₂, A₄ 之间

和 A₃, A₄, A₅ 之间差异不显著, A₂ 与除 A₄ 外的其他处理均差异显著。可以看出, A₂ 和 A₄ 处理的燕麦株高增长最快, 植株最高。

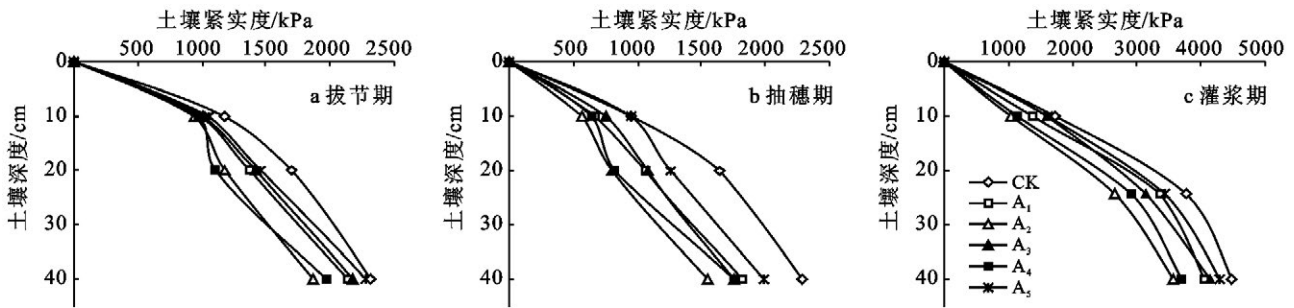


图 1 土壤改良剂对土壤紧实度的影响

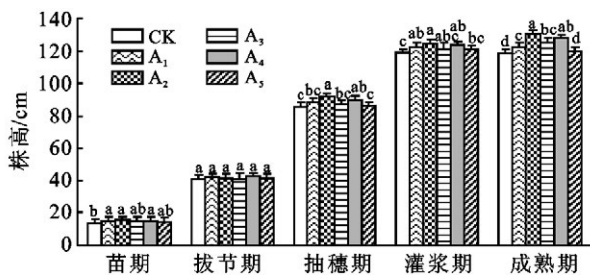


图 2 土壤改良剂对燕麦株高的影响

注: 不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。

2.3 土壤改良剂对燕麦干物质积累的影响

产量形成的物质基础是干物质的积累^[6], 对于任何一种作物来讲, 营养生长阶段所积累的干物质直接影响着作物生物产量和经济产量。由图 3 可知, 各处理积累量趋势一致, 随着生育期的推进而逐渐增大, 从苗期到抽穗期干物质积累最快, 之后增长趋于减缓, 到成熟期达到最大。从各生育时期干物质积累量来看, 抽穗期、灌浆期和成熟期各土壤改良剂处理干物质积累量分别比对照高 8.08%~12.86%, 5.1%~16.54% 和 6.59%~15.79%。可见, 各处理干物质积累量明显高于对照。通过方差分析可知, 苗期各处理间干物质积累量差异不显著; 拔节期 A₁ 和 A₄ 与 CK, A₃, A₅ 间存在显著差异, A₂ 与各处理差异均不显著; 抽穗期除 A₁ 与 CK 差异不显著, 其他处理均与 CK 差异显著, 除 CK 外其他处理之间差异均不显著; 灌浆期除 A₅ 外其他处理均与 CK 呈显著差异, A₂ 与 A₄ 差异不显著, 但与其他处理差异显著, A₄ 与 CK 和 A₅ 差异显著, 与 A₁, A₂, A₃ 差异不显著; 成熟期各处理均与 CK 差异显著, 其中 A₂ 与 A₁ 和 A₄ 差异不显著, 与 CK, A₃, A₅ 差异显著, A₁, A₃, A₄, A₅ 各处理间差异不显著。整体看来, 不同处理的干物质积累量明显高于对照, 其中 A₂ 处理积累量最高, 较对照高 15.06%; 其次为 A₄, 较对照高 12.08%; A₁, A₃ 次之,

A₅ 最低。说明聚丙烯酸钾与腐殖酸钾复配更能够提高土壤肥力, 促进燕麦生长, 进而有利于植株对养分的吸收。

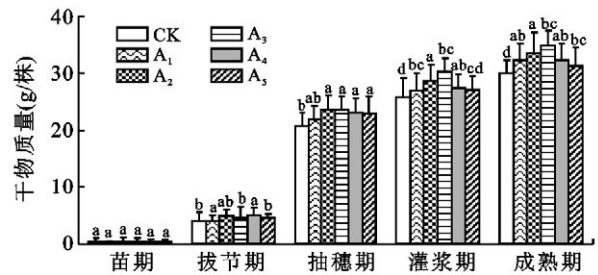


图 3 土壤改良剂对燕麦干物质积累的影响

2.4 土壤改良剂对燕麦产量及其构成的影响

从表 1 中可以看出, 土壤改良剂处理下燕麦穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量和生物产量都高于对照, 各土壤改良剂处理穗数除 A₃ 和 A₅ 差异与 CK 差异不显著外, 其他处理均与 CK 差异显著, 其中 A₂ 最高; 从穗粒数看, 除 A₁, A₃, A₅ 外其他处理均显著高于 CK, 其中 A₄ 较高; 对于千粒重, 除 A₅ 外各处理均与 CK 呈显著差异, 各处理比对照增加了 0.9~2.7 g, 大小顺序为 A₂>A₄>A₃>A₁>A₅>CK; 对照的穗数、穗粒数和千粒重都低于其他处理, 根据单位面积产量=单位面积穗数×穗粒数×千粒重的关系因而导致产量之间的差异, 各土壤改良剂处理籽粒产量均显著高于对照, 其中复配 A₂ 和 A₄ 籽粒产量较其他单施处理高, 分别为 4 694.2, 4 566.9 kg/hm², 较对照增产 21.66% 和 18.36%, A₁, A₃ 和 A₅ 分别比对照增加 16.91%, 11.66% 和 8.01%; 各处理生物产量 A₁, A₂, A₄ 显著高于对照, 其他处理与对照差异不显著, 各处理表现为 A₂>A₄>A₁>A₃>A₅>CK。由此可知, 土壤改良剂能够显著提高燕麦产量, 也说明聚丙烯酸钾和聚丙烯酰胺与腐殖酸钾混施不仅不影

响各自的增产效果,还能够产生交互作用,增产效果更加明显。

表 1 土壤改良剂对燕麦产量及其构成的影响

处理	穗数/ ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒 数/粒	千粒 重/g	籽粒产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	生物产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	374.7c	50.3c	19.4c	3 858.5d	12 833.3c
A ₁	397.0ab	51.7bc	20.5b	4 335.3b	13 266.7b
A ₂	409.6a	56.4a	22.1a	4 694.2a	14 066.7a
A ₃	389.4bc	51.4bc	20.7b	4 221.9bc	13 033.3bc
A ₄	405.6a	54.4ab	21.9a	4 566.9a	13 800.0a
A ₅	381.9bc	50.0c	20.3bc	4 120.1c	12 900.0c

表 2 土壤改良剂对燕麦水分利用效率的影响

处理	播前贮水量/ mm	收获贮水量/ mm	生育期降水量/ mm	耗水量/ mm	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
CK	175.42	124.09	178.6	229.93	3 858.5d	16.78d
A ₁	175.42	130.58	178.6	223.44	4 335.3b	19.40b
A ₂	175.42	133.92	178.6	220.10	4 694.2a	21.33a
A ₃	175.42	125.92	178.6	228.10	4 221.9bc	18.51bc
A ₄	175.42	122.94	178.6	231.08	4 566.9a	19.76a
A ₅	175.42	123.16	178.6	230.86	4 120.1c	17.85c

3 结论与讨论

本研究认为,各改良剂处理均能降低土壤紧实度,不同生育时期土壤紧实度均随着土壤深度增加而增加,各处理表现为聚丙烯酸钾+腐殖酸钾>聚丙烯酰胺+腐殖酸钾>聚丙烯酸钾>聚丙烯酰胺>腐殖酸钾>对照,与张燕等^[7]结果相符,在 40 cm 土层以内,土壤紧实度随着土壤深度的增加而增加,但 40 cm 之后,紧实度随着土壤深度增加而减小,以秸秆和煤矸石为原料的两种土壤改良剂均对 0—20 cm 土层土壤紧实度作用明显,在 20 cm 以下,差异不明显。

聚丙烯酰胺保水剂能显著增加小麦株高,随着生育期的推进,株高逐渐增加,且从拔节到孕穗增加幅度相对较大,而孕穗到灌浆株高变化不太明显^[8]。聚丙烯酸钾混合物能显著提高马铃薯株高,同时对生育前期和生育后期的地上部干物质重与块茎干物质重有显著影响^[9]。黄占斌等^[10]认为聚丙烯酸钠的施用效应与土壤水分含量有关,聚丙烯酸钠对玉米生长的影响主要出现在生长的中后期,但干旱情况下株高的效应时期会提前。腐殖酸促进植物生长前期细胞的分裂与伸长,明显增加生长前后期干物质积累^[11]。本研究认为聚丙烯酸钾、聚丙烯酰胺、腐殖酸钾、聚丙烯酸钾+腐殖酸钾和聚丙烯酰胺+腐殖酸钾对燕麦

2.5 土壤改良剂对燕麦水分利用效率的影响

作物水分利用效率是由耗水量和作物产量共同决定的。由表 2 看出,各处理耗水量均低于对照。各土壤改良剂处理水分利用效率均显著高于对照,其变化趋势与产量变化趋势一致。A₁, A₂, A₃, A₄ 和 A₅ 较对照分别提高了 15.61%, 27.12%, 10.31%, 17.76% 和 6.38%, 说明不同改良剂均能抑制水分蒸发,保持土壤水分,显著提高燕麦土壤水分利用效率,其中 A₂ 和 A₄ 处理效果最佳,显著高于其他处理,且二者之间差异不显著,说明聚丙烯酸钾和聚丙烯酰胺与腐殖酸复配比它们各自单施能更好地降低燕麦全生育期耗水,使土壤水分得到更多的补充。

株高具有显著的提高作用,各生育时期不同处理分别比对照增加了 0.71%~7.09%, 1.48%~5.65%, 1.51%~6.38%, 2.72%~5.60% 和 3.29%~5.60%, 聚丙烯酸钾+腐殖酸钾和聚丙烯酰胺+腐殖酸钾对株高的影响优于其他改良剂;对于干物质积累具有同样的作用,不同处理的干物质积累量明显高于对照,其中聚丙烯酸钾+腐殖酸钾积累量最高,较对照高 15.06%;其次为聚丙烯酰胺+腐殖酸钾,较对照高 12.08%;聚丙烯酸钾、聚丙烯酰胺次之,腐殖酸钾最低。研究表明,聚丙烯酸钾与腐殖酸钾复配更能够提高土壤肥力,促进燕麦生长,进而有利于植株对养分的吸收。

不同土壤改良剂都能改善土壤环境,增加土壤中作物可利用养分与水分,为作物生长发育提供良好的土壤环境条件,为作物优质高产打下良好的基础。在本研究中,聚丙烯酸钾、聚丙烯酰胺、腐殖酸钾及其复配对燕麦产量及产量构成因素均有显著影响,各土壤改良剂处理籽粒产量均显著高于对照,其中聚丙烯酸钾+腐殖酸钾和聚丙烯酰胺+腐殖酸钾籽粒产量较高,分别为 4 694.2 和 4 566.9 kg/hm^2 , 较对照增产 21.66% 和 18.36%;生物产量也明显高于对照,效果最佳为聚丙烯酸钾+腐殖酸钾,其次为聚丙烯酰胺+腐殖酸钾,可以看出聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺与腐殖

酸混施不仅不影响各自的增产效果,还能够产生交互作用,增产效果更加明显。结果与 Wallace 等^[12]和符云鹏^[13]等结果一致。

作物水分利用效率是由耗水量和作物产量共同决定的。通过增加产量可以提高作物水分利用效率,降低土壤及作物水分的无效蒸发和蒸腾也能达到同样的目的。亢秀丽等^[14]认为自然降水中有 60%~70%会形成无效蒸发,将这 60%~70%的无效降水变为作物可利用水是提高水分利用率的关键。本试验表明各土壤改良剂处理水分利用效率均显著高于对照,其变化趋势与产量变化趋势一致,聚丙烯酸钾、聚丙烯酸钾+腐殖酸钾、聚丙烯酰胺、聚丙烯酰胺+腐殖酸钾和腐殖酸钾分别较对照提高了 15.61%, 27.12%, 10.31%, 17.76%和 6.38%,其中复配处理燕麦水分利用效率效果最佳,说明复配能够更好地降低燕麦全生育期耗水,使土壤水分得到更多的补充。

[参 考 文 献]

- [1] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1996:126-130.
- [2] Buttery B R, Tan C C, Drury C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean[J]. Can. J. Plant Sci., 1998, 78(4):571-576.
- [3] 王久志. 土壤结构改良剂覆盖改土作用的研究[J]. 干旱

地区农业研究, 1991(2):48-56.

- [4] 叶协锋, 凌爱芬, 张斌, 等. 腐殖酸对烤烟土壤性状及烟叶品质的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(5):170-173.
- [5] 吴增芳. 土壤结构改良剂[M]. 北京:科学出版社, 1976: 24-34.
- [6] 刘洋, 张玉焯, 王学华, 等. 覆盖方式对旱作水稻干物质积累的影响[J]. 作物研究, 2010, 24(1):83-86.
- [7] 张燕, 冯浩, 吴普特, 等. 新型土壤改良剂对夏玉米生理生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5):110-112.
- [8] 杨永辉, 武继承, 李宗军, 等. 保水剂对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3):173-178.
- [9] 廖佳丽, 徐福利, 赵世伟. 不同保水剂对宁南山区马铃薯生长发育和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(1): 238-242.
- [10] 黄占斌, 朱元骏, 李茂松, 等. 保水剂聚丙烯酸钠不同施用方法对玉米生长和水分利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5/6):576-579.
- [11] 徐和德. 腐殖酸类肥料的刺激作用[J]. 化学通报, 1978(6):38-42.
- [12] Wallace A, Abouzamam A M. Interactions of soil conditioner with other limiting factors to achieve high crop yields[J]. Soil Soc., 1986, 141(5):343-345.
- [13] 符云鹏. 腐殖酸和生物钾对烤烟的效应研究[J]. 河南农业科学, 1999(8):14-15.
- [14] 亢秀丽, 王娟玲, 马爱平, 等. 冬小麦田间集雨模式对土壤水分动态和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):167-170.

(上接第 52 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5):1158-1165.
- [2] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社, 1998:112-119.
- [3] Fox T R, Comerford N B. Influence of oxalate loading on phosphorus and aluminum solubility in spodosols [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(1):290-294.
- [4] 陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应[J]. 土壤, 2003, 35(4):298-303.
- [5] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 6(6):1034-1038.
- [6] 于群英, 李孝良. 土壤对硅的吸附与解吸特性研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999, 13(3):1-6.
- [7] 刘新程, 董元华. 金霉素在不同耕作土壤中的吸附-解吸行为[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):861-868.
- [8] 钱多, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融作用对棕壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):279-283.
- [9] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,

2009, 15(6):1303-1310.

- [10] 熊毅. 土壤胶体:土壤胶体研究法(第 2 册)[M]. 北京:科学出版社, 1985:515-528.
- [11] 曹志洪, 李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3):218-226.
- [12] Holford I C R, Mattingly G E G. The high-and low-energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils [J]. J. of Soil Sci., 1975, 26(4):407-417.
- [13] Brennan R F, Bolland M D A, Jeffery R C, et al. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25(15/16):2785-2795.
- [14] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11):1369-1374.
- [15] 胡红青, 贺纪正, 李学垣, 等. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(1):37-42.
- [16] 郭晓东, 张雪琴, 杨玲. 甘肃省主要农业区土壤对磷的吸附与解吸特性[J]. 西北农业学报, 1997, 6(2):7-12.
- [17] Anderson D L, Snyder G H, Warren J D. Availability of phosphorus in calcium silicate slag[J]. Commun. in Soil Sci. and Plant Anal., 1992, 23(9/10):907-918.