

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19391

膨润土-腐植酸与氮肥配施对科尔沁沙地土壤无机氮淋溶和生物有效性的影响

郑毅^{1, 2*}, 李丰义², 刘庭玉², 刘景辉¹

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 利用改进提取方法(温度由 25℃ 升至 60℃, 振荡时间由 1 h 提高至 2 h)和离子交换膜法, 设置 3 种改良剂水平和 3 种氮肥水平, 研究了膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施对西辽河平原沙质土壤氮素淋溶和养分有效性的影响。结果表明, 不施氮肥只施膨润土-腐植酸改良剂对春玉米产量和土壤无机氮残留量无显著影响。20 t·hm⁻² 膨润土-腐植酸改良剂与 120 kg·hm⁻² 氮肥配施效果最好, 玉米籽粒产量和地上生物量分别提高了 19.1% 和 18.5%, 土壤 NO₃-N 残留量减少 14.5%; 施用 240 kg·hm⁻² 氮肥不仅对玉米产量无显著影响, 还增加了氮素淋溶的风险。在同一处理下, 与标准提取方法相比, 改进方法对土壤 NH₄⁺-N 含量影响较小, 还提高了土壤 NO₃-N 提取量。施用膨润土-腐植酸改良剂可吸附滞留在土壤中的 NO₃-N, 这不仅降低淋溶风险, 同时也降低生物有效性。20 t·hm⁻² 膨润土-腐植酸改良剂与 120 kg·hm⁻² 氮肥配施是一种既能提高土壤氮素有效性又能减少氮素淋溶的最佳组合。

关键词: 膨润土-腐植酸改良剂; 沙质土壤; 玉米; 氮素淋溶; 生物有效性

膨润土作为土壤改良剂已广泛用于改善土壤性质和调节植物生长^[1-4]。膨润土属于黏土, 具有较好的持水性能, 可提高土壤保水保肥能力, 减少肥料损失, 尤其是土壤氮素的损失, 从而提高土壤肥力^[5-6]。腐植酸作为一种有机添加物也常被应用于土壤改良与保育, 它是土壤有机质的重要组成部分, 施入土壤后可提高土壤有机碳含量, 有利于土壤微生物的生长, 能促进有机质形成, 起到了提高肥力的作用^[7-8]。

膨润土和腐植酸作为土壤改良剂在改土提质中已取得了一系列的研究成果, 例如, 孙荣国等^[9]将作物秸秆、膨润土和聚丙烯酰胺按一定比例配制后作为改良材料, 研究秸秆改良材料种类、改良材料剂量与配比、土培时间等因素对改良材料改良效应的影响, 结果表明, 秸秆改良材料可以改善沙质土壤团粒结构。卢其明等^[10]通过淋溶和蒸发试验研究了聚合物-膨润土复合材料在土壤中的水肥

调控性能。结果表明, 聚合物-膨润土复合材料具有显著的保水性能。Xu^[11]等在干旱半干旱地区施用腐植酸, 在无灌溉的条件下, 施用腐植酸的处理明显的改善了土壤水分状况。宋明元等^[12]同样在科尔沁沙地的风沙土上按不同比例添加黏土、有机肥和腐植酸, 发现在风沙土中添加有机物料和黏土明显提高了风沙土的持水能力。但是, 关于施用膨润土和腐植酸对土壤无机氮生物有效性和淋溶损失方面的研究较少, 且多数试验均是通过短期(<6 个月)模拟培育或土柱实验获得, 长期田间定点观测研究目前尚不多见^[13-14], 尤其是在沙土中的研究。另外, 单施膨润土和腐植酸作为土壤改良剂的研究多, 对两者混合加工施用的报道少, 因为通过添加一定量的腐植酸制备出颗粒状改性膨润土产品在膨胀性、分散性、悬浮性、流变性上均得到显著改善^[15], 对土壤改良效果可能更好。

此外, 在以往的研究中一般土壤无机氮通常是在室温(25℃)条件下由 2 mol·L⁻¹ KCl 振荡 1 h 浸提测定^[16], 但是该方法不能完全提取吸附在膨润土内部的 NO₃-N^[16-17], 50% 以上的 NO₃-N 仍然可被继续提取^[18]。因此, 本研究利用改进提取方法(2 mol·L⁻¹ KCl, 60℃ 振荡 2 h)明确膨润

收稿日期: 2019-08-23; 录用日期: 2019-09-22

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费: 东北地区黑土保育有机质提升关键技术与示范(201303126)。

作者简介: 郑毅(1984-), 男, 内蒙古通辽人, 蒙古族, 讲师, 博士, 主要从事土壤改良研究。E-mail: zhengyi152301@163.com。同时为通讯作者。

土-腐植酸改良剂对土壤无机氮的固持能力,利用离子交换膜明确土壤残留无机氮的活性,在西辽河平原典型沙质土壤上进行了定位田间试验,研究膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施对西辽河平原沙质土壤氮素淋溶和养分有效性的影响,为西辽河平原沙质土壤改良和水肥调控性能改善提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

西辽河平原处于 $42^{\circ}18' \sim 44^{\circ}30' \text{ N}$, $119^{\circ}14' \sim 123^{\circ}42' \text{ E}$, 坐落于内蒙古自治区, 是西辽河及其支流冲刷下形成的冲积平原, 是我国春玉米生产的主要地区之一。西辽河平原属于典型的温带大陆性季风气候, 年度日照时间长, 雨热同季, 历年平均日照时数超过 3 100 h, 年均气温 6.5°C , 无霜期 140 ~ 160 d。总体来说, 西辽河平原地处世界春玉米生产的黄金地带, 光热资源丰富, 灌溉条件良好, 具有规模春玉米生产的天然优势。

供试土壤属风沙侵蚀砂壤土, 机械组成为: 砂粒为 82.8%, 粉粒为 12.16%, 黏粒为 5.04%。0 ~ 20 cm 土层土壤理化性质为土壤 pH 值 7.86、阳离子交换量 $10.03 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $48.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $5.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $71.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ $1.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ $1.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用电位法测定土壤 pH 值 (土水比为 1 : 2.5); 氯化铵-乙酸铵交换法测定土壤阳离子交换量; 碱解扩散法测定碱解氮含量; NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量; 醋酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量; $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 震荡 1 h 浸提土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, 流动分析仪测定土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量。

1.2 膨润土-腐植酸改良剂

本研究使用的钠基膨润土由内蒙古三岩矿业有限公司提供, 膨润土中的主要化学组分为: 73.2% SiO_2 , 11.4% Al_2O_3 , 2.67% CaO , 2.58% K_2O , 1.05% MgO , 0.31% Na_2O 和 0.29% Fe_2O_3 。腐植酸购买于内蒙古润泽源生物科技股份有限公司, 由褐煤提取而成。将膨润土和腐植酸以 10 : 1 的比例混合, 加入一定量的蒸馏水, 加热溶解成黏稠的液体, 随后通过制丸机挤压撞条造粒成 3 mm 的颗粒, 造粒后置于 100°C 的干燥箱中干燥, 制得膨润土-腐植酸改良剂。

1.3 试验设计

本研究采用双因素随机区组设计。试验设置 3 种膨润土-腐植酸改良剂水平和 3 种氮肥 (尿素) 水平, 膨润土-腐植酸改良剂水平分别为 0、20、 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 依次记为 A_0 、 A_1 和 A_2 ; 氮肥水平分别为 0、120、 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 依次记为 N_0 、 N_1 和 N_2 。共计 9 个处理, 重复 3 次。试验小区面积为 60 m^2 ($6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$)。小区间铺设宽为 0.5 m 小路以避免交叉污染和处理效应。供试作物为玉米 (郑单 958), 采用常规田间管理方法。试验实施的上一年秋季 (2016 年 10 月), 将膨润土-腐植酸改良剂均匀添加到耕层土壤 (0 ~ 20 cm)。在 2017 年, 随机取样的玉米植株地上部分在 65°C 下烘干至恒重以测定地上总生物量。为准确反映种植周期结束时 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的有效性, 于 2017 年 5 月将 3 对阴阳离子交换膜随机插到各小区 0 ~ 20 cm 土层中, 并于 2017 年 10 月移除。离子交换膜上积累的离子量通常会随着提取时间的延长而增加^[19], 因此长时间 (大于 3 个月) 提取能够准确预测土壤氮素平衡^[20]。本研究使用的离子交换膜购于上海凯思普科技有限责任公司。试验开始前先将大小为 $20 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 阴阳离子交换膜嵌入塑料管中, 交换膜上反离子分别为 Na^{+} 和 HCO_3^{-} 。

1.4 土壤取样和分析

2017 年春玉米收获后, 每个小区内随机选取 5 个采样点, 使用内径为 4 cm 的土钻采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、50 ~ 60 cm 6 个土层样品。在挑除根系和其他杂质后, 土壤样品过 2 mm 土筛。各小区中相应土层的 5 个样品混合后立刻保存在冰箱中供测定土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量。

利用标准方法测定土壤 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量。10 g 土壤样品加入 40 mL 的 KCl ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液, 在 25°C 条件下以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速震荡 1 h, 随后过滤上清液, 采用流动注射分析仪测定滤液中 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量。滤液中 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 总含量即为土壤无机氮 (SIN) 含量。

利用改进方法测定耕层土壤 (0 ~ 20 cm) 样品中 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量。10 g 土壤样品中加入 40 mL 的 KCl ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液, 在 60°C 条件下以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速震荡 2 h, 随后过滤上清液。当温度大于 50°C 时, 水在多孔颗粒中从二维表面流动转为三维孔隙流动^[16, 20]。因此, 本研究所使用的

试验条件能够缩短平衡时间,促进膨润土向提取液中释放被其捕获的土壤无机氮。

用蒸馏水冲洗粘附在离子交换膜上的土壤颗粒,随后将干净的离子交换膜放入 50 mL KCl ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液,在 25°C 条件下以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速震荡 1 h,利用流动注射分析仪测定提取液中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量。

玉米成熟后,每个处理选择 2 m^2 进行测产,每个处理重复 3 次,玉米地上部生物量为秸秆和籽粒之和。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013、Origin 8.0 及 SPSS 19.0 软件进行数据处理与分析,并绘制图表。处理间的差异显著性采用 Duncan 方法标注字母。对于正态分布数据,采用 Pearson's correlation 进行相关分析;对于非正态分布数据,采用 Spearman's correlation 进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 春玉米籽粒产量和地上生物量

膨润土-腐植酸改良剂(A)、氮肥(N)及

改良剂与氮肥互作($A \times N$)对春玉米籽粒产量和地上生物量的增长趋势基本一致,达到显著增产效应(图1)。单独施用膨润土-腐植酸改良剂(N_0)表现出增产趋势,但没有显著差异。施用氮肥水平为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1) 条件下,改良剂(A)表现出显著增产效果, A_1N_1 、 A_2N_1 比 A_0N_1 春玉米籽粒产量和地上生物量分别提高了 19.1%、18.5% 和 10.2%、1.2%,表明在施氮肥基础上配施膨润土-腐植酸改良剂能够提高土壤养分利用,并提高春玉米籽粒产量和地上生物量。当施用氮肥水平为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2) 时,春玉米籽粒产量表现出先升后降趋势, A_1N_2 比 A_0N_2 籽粒产量和地上生物量分别提高了 14.3% 和 13.5%;但 A_2N_2 比 A_1N_2 籽粒产量和地上生物量却分别降低了 14.1% 和 14.8%。表明膨润土-腐植酸改良剂施用量对春玉米籽粒产量和地上生物量存在阈值,过量施用会引起产量下降。 A_2 处理中改良剂的施用量已超过阈值,未体现出改良剂应有的作用, A_1 处理中改良剂的施用量在阈值合理范围之内,并与氮肥配施达到了显著增产效果。

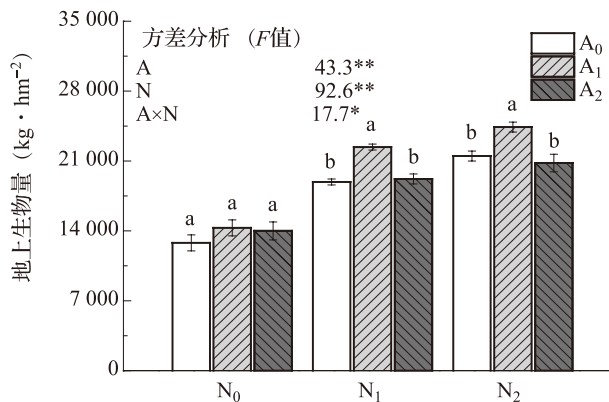
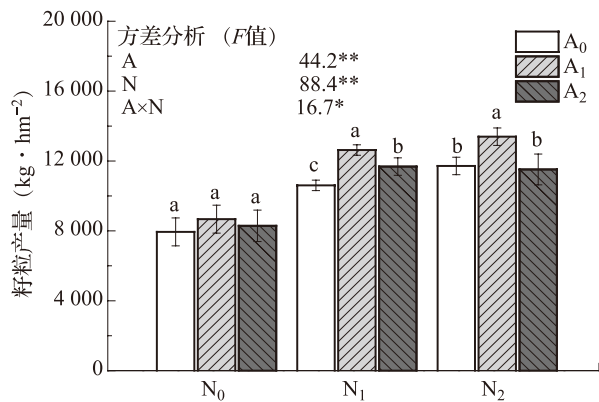


图1 不同处理下春玉米籽粒产量及地上生物量变化

注: * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$); 不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 土壤中残留的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮

由方差分析可见,膨润土-腐植酸改良剂(A)、氮肥(N)及改良剂与氮肥互作($A \times N$)显著影响了土壤剖面中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮(SIN)的含量(表1)。Spearman 相关分析显示膨润土-腐植酸改良剂施用量(A)与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮均呈负相关,且与 NO_3^- -N 达到显著水平;施氮肥(N)与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮相关程度相近,均呈中等正相关,表明施用膨润

土-腐植酸改良剂能够改善土壤的微环境,抑制 NO_3^- -N 离子的反硝化作用,有利于提高土壤肥力。Pearson 相关分析表明土壤无机氮与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 呈正相关,且 NO_3^- -N 达到显著水平,而 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 呈负相关关系,表明随土壤无机氮含量的增加, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 随之会增加,在一定的条件下, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 彼此之间相互转化,而膨润土-腐植酸改良剂的介入会影响这种此消彼长的依存关系。

表1 土壤中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮含量的分析

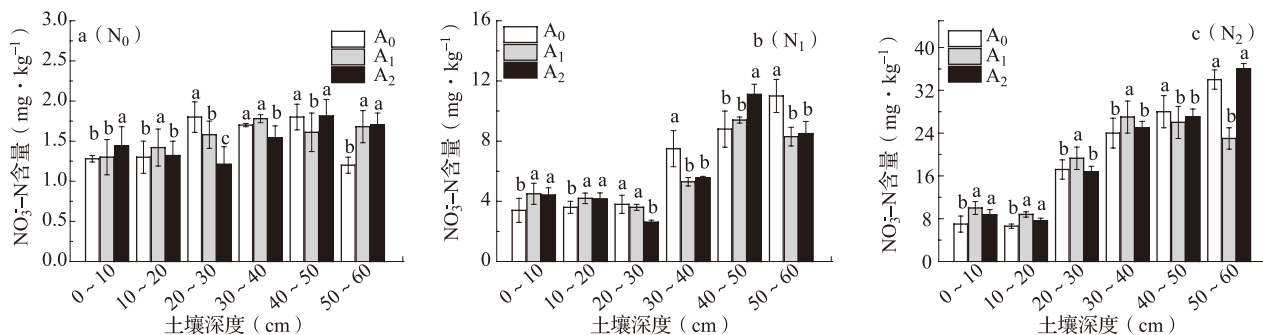
含量	方差分析 (F 值)			Spearman 相关分析		Pearson 相关分析		
	A	N	A × N	A	N	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	SIN
NO_3^- -N	5.84*	21.84**	18.46**	-0.708*	0.583	1	-0.326	0.892*
NH_4^+ -N	10.86**	9.36**	3.90*	-0.438	0.353		1	0.513
SIN	10.32**	16.89**	6.53**	-0.486	0.436			1

注: * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

2.2.1 土壤中残留 NO_3^- -N 含量

由图2可见, NO_3^- -N 的残留量随氮肥施用量的增加而增加。施用膨润土-腐植酸改良剂使耕层土壤 (0 ~ 20 cm) NO_3^- -N 含量略有增加, 但总体来说对下层土壤 (20 ~ 60 cm) NO_3^- -N 总量影响不大, 主要体现在垂直方向上分布规律差异较大。施用氮肥水平为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1) 时, 土壤中残留 NO_3^- -N 的含量随着改良剂的施用而降低, 与单独施用氮肥处理相比 (A_0N_1), A_1N_1 处理中下层土壤 NO_3^- -N 含量下降 14.5%。施用氮肥水平为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2) 时, 与单独施用氮肥处

理相比 (A_0N_2), A_1N_2 处理中下层土壤 NO_3^- -N 含量下降 7.7%, A_1N_2 土壤中的 NO_3^- -N 主要集中在更容易被植物利用的 (20 ~ 40 cm) 土层。但是 A_1N_2 处理中下层土壤 NO_3^- -N 含量大约是 A_1N_1 处理的 3.5 倍, 且产量没有明显提高。表明膨润土-腐植酸改良剂具有极高吸附力, 当膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施后, 改变了耕层土壤的微环境, 抑制 NO_3^- -N 离子的反硝化作用, 减少土壤氮素排放损失。 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2) 的氮肥水平时超过改良剂能承受的量, 过量的氮肥淋溶到土壤深层。

图2 土壤剖面中 NO_3^- -N 含量

注: 不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

2.2.2 土壤中残留 NH_4^+ -N 含量

由图3可以看出, 试验处理中的 NH_4^+ -N 含量沿土壤剖面呈现波动趋势。单独施用膨润土-腐植酸改良剂 (N_0) 耕层土壤 (0 ~ 20 cm) NH_4^+ -N 含量较高, 并表现出明显差异, 中下层土壤 (20 ~ 60 cm) NH_4^+ -N 含量逐渐下降。施用氮肥水平为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1) 时, 耕层土壤 (0 ~ 20 cm) NH_4^+ -N 含量相对较低, 以后波动上升。施用氮肥水平为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2) 条件下, 耕层土壤 (0 ~ 20 cm) NH_4^+ -N 含量较低, 中层土壤 (20 ~ 40 cm) NH_4^+ -N 含量最高, 而深层土壤 (40 ~ 60 cm) NH_4^+ -N 含量又开始下降, 表现出先升后降的变化趋势。表明膨润土-腐植酸改良剂的作用受氮肥用量影响较大,

适量氮肥水平 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1) 下膨润土-腐植酸改良剂的作用更为明显, 有效抑制 NH_4^+ -N 离子的气态损失, 提高氮素肥料利用率。

2.2.3 土壤残留无机氮含量

由图4可显示, 膨润土-腐植酸改良剂的改良效果取决于氮肥用量。单独施用膨润土-腐植酸改良剂 (N_0) 各耕层土壤无机氮含量在较低水平上波动, 没有明显变化。施氮肥水平为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1) 时, 耕层与中层土壤 (0 ~ 40 cm) 无机氮含量均较低, 深层土壤 (40 ~ 60 cm) 残留上升。在施氮肥水平为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2) 条件下, 耕层土壤 (0 ~ 20 cm) 无机氮含量最低, 中层土壤 (20 ~ 40 cm) 开始上升, 特别是深层土壤

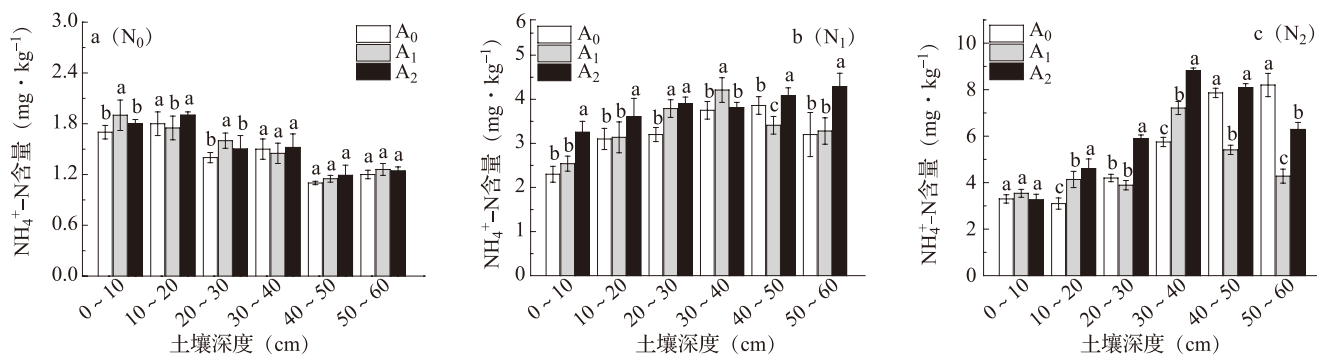
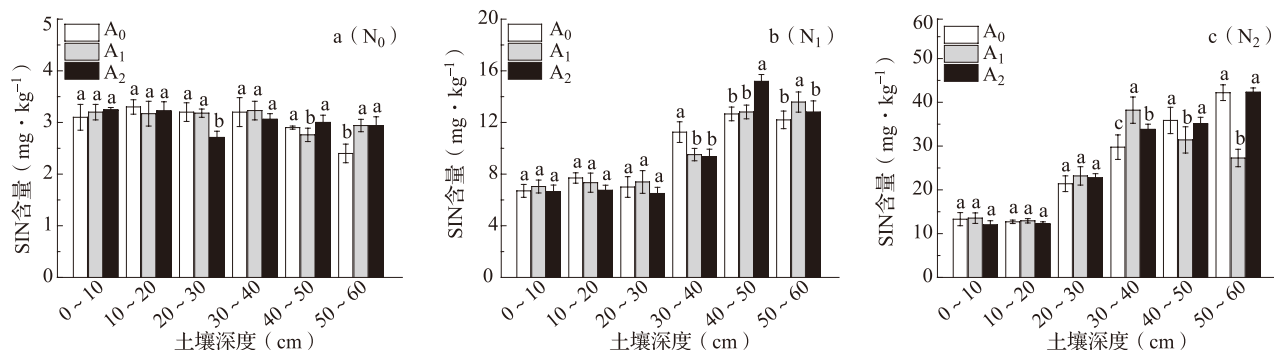
图3 土壤剖面中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量

图4 土壤剖面中无机氮 (SIN) 含量

(40 ~ 60 cm) 上升速度较快。表明膨润土-腐植酸改良剂的改良效果受氮肥用量制约, 而氮肥的增产作用也受益于膨润土-腐植酸改良剂的吸附力, 适量增加膨润土-腐植酸改良剂 ($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 有效抑制氮素肥料的气态损失和淋溶渗漏, 使大量无机氮吸附于土壤表层, 供作物吸收利用。

2.3 不同方法提取的耕层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和无机氮

2.3.1 提取土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

由表2可见, 膨润土-腐植酸改良剂改良效果(A)、氮肥效应(N)及改良剂与氮肥互作(A×N)在耕层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和无机氮含量基本达到了显著或极显著水平, 且3种方法提取的耕层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和无机氮均呈正相关, 特别是改进方法、离子交换膜法与标准方法高度正相关。由改进方法提取的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与标准方法相比差异较大, 这种差异 ($\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{m-s}}$) 达到3.1% ~ 133.3% (图5a), 且 ($\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{m-s}}$) 达到显著水平。由离子交换膜法提取的 $\text{NO}_3^-\text{-N}_{\text{IEM}}$ 含量为 $19.82 \sim 178.46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 随着氮肥水平提高而增加。表明受膨润土-腐植酸改良剂吸附作用的影响, 由标准方法提取的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于实际含量。

2.3.2 提取土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

图5b可以看出, 由改进方法提取的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与标准方法提取的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有高有低, $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{m-s}}$ 差异范围从低1.2%到高12.1%, $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{m-s}}$ 没有显著差异 (表2)。与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量不同, 两种方法所提取出的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的差异 ($\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{m-s}}$) 主要受氮肥施用量影响, 而膨润土-腐植酸改良剂影响较小。在同一氮肥水平下, 离子交换膜法提取的 $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{IEM}}$ 含量随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加而增大。表明膨润土-腐植酸改良剂表面带有负电荷的官能团, 靠静电吸引使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在耕层含量有所增加, 所以两种方法结果差异很小。

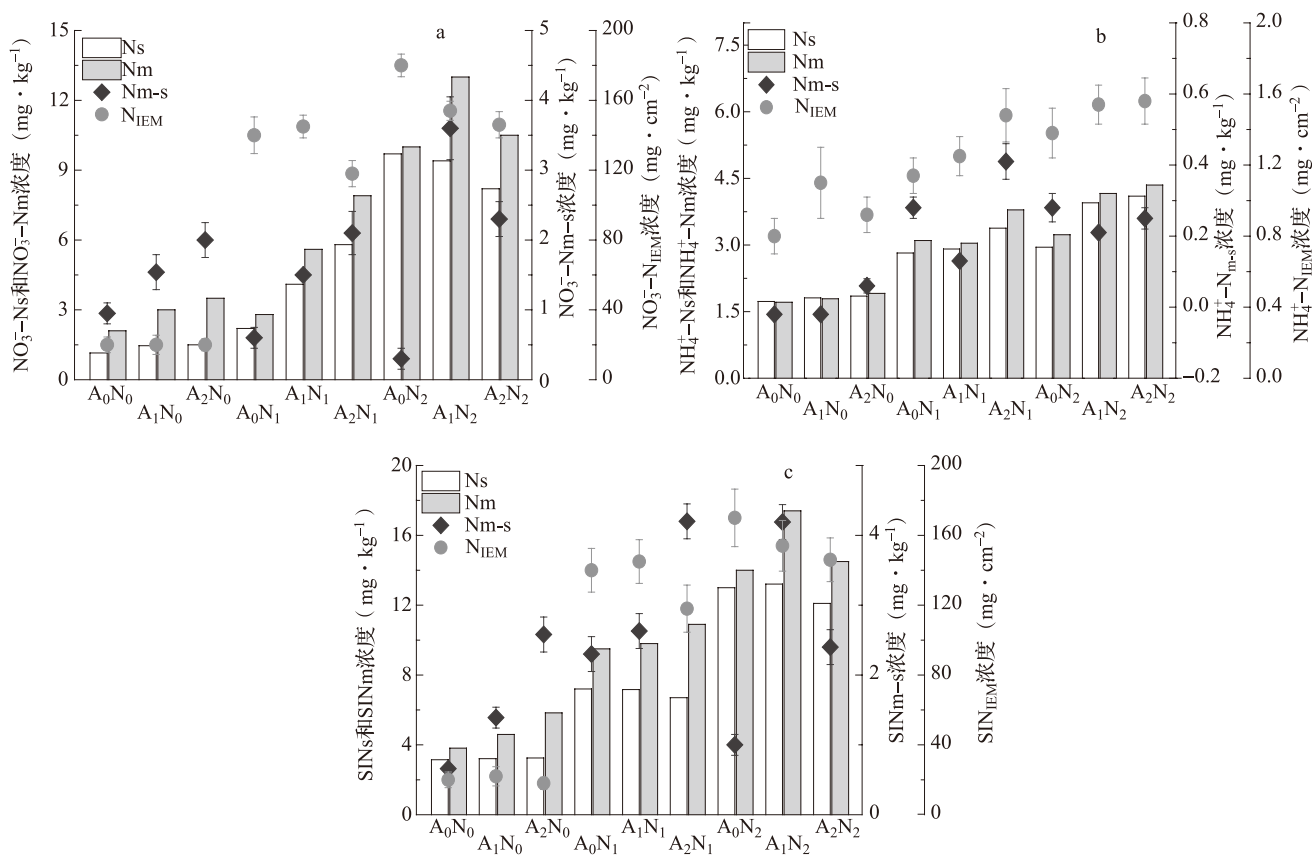
2.3.3 提取土壤无机氮

如图5c所示, 由改进方法提取的土壤无机氮含量显著高于标准方法提取的土壤无机氮含量, 高幅达到20.9% ~ 62.7%。单独施用膨润土-腐植酸改良剂 (N_0) 对土壤无机氮含量影响不大。 $\text{SIN}_{\text{m-s}}$ 随氮肥施用量的增加而增大, 膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施模式下, 土壤无机氮 ($\text{SIN}_{\text{m-s}}$) 含量随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加而增大, SIN_{IEM} 含量随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加呈先增后降的变化趋势。此外, 在膨润土-腐植

表 2 不同方法提取耕层土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和土壤无机氮含量的分析

参数	方法	方差分析 (F 值)			Pearson 相关分析			R^2
		A	N	A $\times$ N	标准方法	改进方法	离子交换膜	
NO_3^- -N	标准方法	5.84*	21.84**	18.46**	1	0.945**	0.886**	0.926**
	改进方法	4.52**	19.64**	15.34**		1	0.563*	0.929**
	离子交换膜	3.25*	14.36**	12.83**			1	0.914**
NH_4^+ -N	标准方法	10.86**	9.36**	3.90*	1	0.835**	0.804**	0.672*
	改进方法	8.45**	7.36**	2.58		1	0.763*	0.724*
	离子交换膜	7.42**	5.25*	2.24			1	0.750*
SIN	标准方法	10.32**	16.89**	6.53**	1	0.926**	0.806**	0.916**
	改进方法	9.14**	13.60**	5.68*		1	0.845**	0.937**
	离子交换膜	8.58**	12.34**	4.42*			1	0.962**
NO_3^- -N _{m-s}	—	6.24*	3.26	4.32*	—	—	—	0.762*
NH_4^+ -N _{m-s}	—	2.66	4.25*	2.44	—	—	—	0.254
SIN _{m-s}	—	4.36*	3.86*	3.76*	—	—	—	0.518

注: m 为改进方法, s 为标准方法, m-s 为改进方法 - 标准方法, * 表示达到显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

图 5 不同方法提取的耕层土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、无机氮含量

酸改良剂与氮肥配施模式下, 离子交换膜法提取的土壤无机氮 (SIN_{IEM}) 含量也是随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加而增大。表明长时间高温震荡可以使被膨润土-腐植酸改良剂吸附的土壤无机氮释放。

3 讨论

3.1 膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施对氮素有效性和淋溶的影响

本研究结果表明单独施用膨润土-腐植酸改良剂对氮素有效性和淋溶损失影响不大, 而膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施对氮素有效性和淋溶损失有显著影响, 与之前常菲等的研究结果一致^[1]。单独施用膨润土-腐植酸改良剂对春玉米产量及地上生物量有轻微地促进作用, 主要是增加耕层土壤中 NO_3^- -N 含量。由于本研究所使用改良剂中腐植酸含有少量 NO_3^- -N, 但含量要远低于试验区土壤 NO_3^- -N 含量, 因此, 耕层土壤中 NO_3^- -N 含量的提高不是直接获取膨润土-腐植酸改良剂中所含有的氮素所致, 而是源于膨润土-腐植酸改良剂吸附了微生物分解土壤有机氮。

在膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施模式下, $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂施用量 (A_1) 显著提高春玉米产量和地上生物量, $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂施用量 (A_2) 春玉米产量和地上生物量反而有所降低。表明氮素有效性对膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配施模式非常敏感。在配施模式下, 膨润土-腐植酸改良剂的施用量影响了春玉米对氮素的吸收。研究表明, $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂与氮肥配合施用能够提高土壤氮素矿化速率, 从而促进作物氮素吸附和干物质生产。在本研究中, $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂 (A_1) 与氮肥配合施用不仅提高氮素的利用率, 而且降低有效 NO_3^- -N 的淋溶损失。氮素有效性的提高也合理地解释了在 A_1N_1 和 A_1N_2 处理中春玉米产量和地上生物量的增加与 $20 \sim 60 \text{ cm}$ 土层 NO_3^- -N 残留量的显著减少有关。本研究结果 A_1N_1 和 A_1N_2 处理中春玉米产量和生物量没有显著差异, 但 A_1N_2 处理 $20 \sim 60 \text{ cm}$ 土层 NO_3^- -N 残留量远高于 A_1N_1 处理。表明 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥施用量非但不会提高作物产量, 长期施用反而会导致大量的 NO_3^- -N 残留在土壤底层, 增加随降雨而淋溶损失的风险^[1]。与其他处理相比, 尽管 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润

土-腐植酸改良剂施用量 (A_2) 能够有效地抑制土壤无机氮淋溶损失, 但由于春玉米产量和生物量的减少, 故 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂 (A_2) 与氮肥配施模式是不合理的。因此, $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂与 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥配合 (A_1N_1) 施用, 既兼顾提高作物产量和降低环境风险的最佳策略。

研究表明, 高施用量膨润土改良剂虽然不能促进作物生长, 但能够降低底土层中无机氮含量^[1]。此外, 盆栽试验结果也显示高施用量膨润土改良剂 ($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 能够捕获 NO_3^- -N 导致春玉米产量显著下降^[21], 与这本研究结果相一致。尽管膨润土改良剂能够增加土壤总持水能力, 但其中大部分由膨润土改良剂固持的土壤水不能被作物吸收利用, 这也影响土壤无机氮, 特别是可溶性 NO_3^- -N 的有效性^[22]。因此, 最佳膨润土改良剂施用量田间阈值远低于培养试验和盆栽试验。高施用量膨润土改良剂长时间大量吸附 NO_3^- -N, 从而降低作物吸收和淋溶的 NO_3^- -N^[21], 这一结论合理解释膨润土-腐植酸改良剂高施用量条件下作物生物量和土壤无机氮残留量同时减小这一矛盾现象。

3.2 膨润土-腐植酸改良剂对土壤无机氮的固持以及残留土壤无机氮的有效性

本研究使用改进提取方法和离子交换膜法提取耕层土壤无机氮, 以此确定膨润土-腐植酸改良剂对土壤无机氮的固持强度以及残留于土壤无机氮的有效性。结果表明, 长时间高温震荡可以促进膨润土-腐植酸改良剂释放土壤无机氮 (特别是 NO_3^- -N)。在同一氮肥水平下, NO_3^- - $N_{\text{m-s}}$ 和 $\text{SIN}_{\text{m-s}}$ 含量随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加而增加, 也可以说明受膨润土-腐植酸改良剂固持作用的影响, 由标准方法提取的 NO_3^- -N 要低于实际含量。根据 Haider 等^[17] 的研究可知, 除时间、温度等因素外, KCl 对 NO_3^- -N 的提取能力与膨润土-腐植酸改良剂的孔隙分布和膨润土-腐植酸改良剂对 NO_3^- -N 的固持机制有关。因此, 本研究所采用的改进方法可能仍然不足以提取所有被膨润土-腐植酸改良剂固持的 NO_3^- -N。这些信息进一步说明膨润土-腐植酸改良剂对 NO_3^- -N 潜在的固持能力。

施用氮肥后, NO_3^- - N_{IEM} 含量随着膨润土-腐植酸改良剂施用量的增加而降低, 表明膨润土-腐植酸改良剂即降低了土壤中残留 NO_3^- -N 的生物有效性, 也减少了淋溶损失风险。Agegnehu 等^[23] 在

小麦研究中发现, 不论施肥水平如何, 多孔隙土壤改良剂施用都会降低 SIN_{IEM} 以及植株中氮的含量, 说明经膨润土-腐植酸改良剂改良后, 土壤中 NO_3^- -N 生物有效性降低, 并具有明显的抗淋溶作用, 这与本研究在 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂与 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥配施模式下的结果一致, 此时耕层土壤中 NO_3^- -N 含量增加, 而底层土壤中 NO_3^- - N_{IEM} 和 NO_3^- - N_s 含量减少。因此, 虽然 NO_3^- - N_{IEM} 和 NO_3^- - N_s/NO_3^- - N_m 之间存在显著的正相关关系, 但是在大多数情况下, NO_3^- - N_m 仅提供经膨润土-腐植酸改良剂改良土壤中相对准确含量的数值, 可能不足以作为土壤精准管理建议的参考标准。因此, 确定被膨润土-腐植酸改良剂固持即具有生物有效性又具有抗淋溶作用的 NO_3^- -N 比例是下一步工作的重点。

由于膨润土表面具有负电荷的官能团静电吸附 NH_4^+ -N, 因此土壤 NH_4^+ -N 的吸附或保留机制常被认为与施用膨润土-腐植酸改良剂导致土壤阳离子交换量的增加有关^[24]。由于静电作用是很弱的作用力, 标准方法可以很容易地提取通过静电吸引吸附的 NH_4^+ -N, 因此 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂处理中 NH_4^+ - $\text{N}_{\text{m-s}}$ 略有增加。随着时间的推移, 吸附于膨润土-腐植酸改良剂的氮素可能被解吸, 重新具有生物有效性, 导致 NH_4^+ - N_{IEM} 含量增加。

4 结论

单独施用膨润土-腐植酸改良剂对春玉米产量和地上生物量以及土壤残留无机氮的淋溶影响不大。对于旱地农田系统, $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸与 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥配合施用是兼顾提高作物产量和降低环境风险的最佳策略。 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 膨润土-腐植酸改良剂施用量抑制土壤无机氮素淋溶损失的同时也降低了土壤无机氮的生物有效性。经过两年田间老化后, 膨润土-腐植酸改良剂可以捕获 NO_3^- -N, 降低土壤 NO_3^- -N 休耕期淋溶风险。

参考文献:

- [1] 常菲, 郜翻身, 红梅, 等. 施肥措施对河套灌区氮素淋溶和春玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 86-93.
- [2] 孙梦媛, 刘景辉, 马斌, 等. 膨润土对燕麦苗期土壤水分及生物学性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5):

- 26-34.
- [3] 钟润昕. 膨润土-菌渣复合材料在砂土中养分释放规律研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [4] 杨彦明, 刘景辉, 李立军, 等. 膨润土对土壤含水量及蒸发特性和燕麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(8): 1118-1125.
- [5] 武岩. 施肥措施对河套灌区农田氮素损失及平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [6] 李旭霞, 宋海星, 廖琼, 等. 纳米膨润土包膜氮肥对晚稻产量与氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(11): 81-85.
- [7] Schnitzer M. Organic matter characterization [M] //Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982. 581-594.
- [8] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of CO_2 efflux from maize rhizosphere [J]. Plant and Soil, 2004, 263: 85-99.
- [9] 孙荣国, 韦武思, 马明, 等. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对沙质土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 162-166.
- [10] 卢其明, 孙克君, 邓德安, 等. 聚合物/膨润土复合材料的水肥调控特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 50-52, 112.
- [11] Xu S T, Zhang L, Zhou L, et al. Effect of synthetic and natural water absorbing soil amendments on soil microbiological parameters under potato production in a semi-arid region [J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 8-14.
- [12] 宋明元, 吕贻忠, 李丽君, 等. 土壤综合改良措施对科尔沁风沙土保水保肥能力的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1345-1350.
- [13] 范华峰. 膨润土对农耕地功能成分纵向迁移的影响[J]. 现代农业科技, 2017, (5): 166-168.
- [14] 邓小婵, 方艳芬, 阮长城, 等. 改性魔芋水凝胶/膨润土双层包膜缓释复合肥制备及性能研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 90-95.
- [15] 陈智文, 张清, 李晓青. 改性膨润土载体复混肥对春玉米的增产效应[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2005, (1): 10-12.
- [16] Li S, Wang S, Shanguan Z. Combined biochar and nitrogen fertilization at appropriate rates could balance the leaching and availability of soil inorganic nitrogen [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 276: 21-30.
- [17] Haider G, Steffens D, Müller C, et al. Standard extraction methods may underestimate nitrate stocks captured by field-aged biochar [J]. Journal of Environment Quality, 2016, 45(4): 1196-1205.
- [18] Haider G, Steffens D, Moser G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study [J]. Agriculture,

- Ecosystems & Environment, 2017, 237: 80–94.
- [19] Conte P, Hanke U M, Marsala V, et al. Mechanisms of water interaction with pore systems of hydrochar and pyrochar from poplar forestry waste [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62 (21): 4917–4923.
- [20] Johnson D W, Verburg P S J, Arnone J A. Soil extraction, ion exchange resin, and ion exchange membrane measures of soil mineral nitrogen during incubation of a tallgrass prairie soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (1): 260–265.
- [21] 李吉进, 徐秋明, 张宜霞, 等. 膨润土对土壤水分和玉米植株生育性状的影响 [J]. 北京农业科学, 2001, 19 (6): 18–20.
- [22] 温鹏. 基于膨润土的保水型缓释氮肥的制备及其性能研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [23] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 1–13.
- [24] Qian P, Schoenau J J. Using an anion exchange membrane to predict soil available N and S supplies and the impact of N and S fertilization on canola and wheat growth [J]. Pedosphere, 2007, 17 (1): 77–83.

The effects of bentonite-humic acid amendment and nitrogen application on soil inorganic nitrogen leaching and bioavailability in Horqin sandy soil

ZHENG Yi^{1, 2*}, LI Feng-yi², LIU Ting-yu², LIU Jing-hui¹ (1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 2. Inner Mongolia University For Nationalities, Tongliao Inner Mongolia 028000)

Abstract: By using the modified extraction method (temperature was increased from 25℃ to 60℃, oscillation was extended from 1 h to 2 h) and cation-exchange membrane method, three soil amendment application rates and three nitrogen dose combinations were set up to study their effects on sandy soil nitrogen leaching and bioavailability by combining addition of the bentonite-humic acid amendment and nitrogen in west Liaohe river plain. The results showed that, only addition of bentonite-humic acid amendment had no significant effect on maize yield and soil residual inorganic nitrogen. The combination of 20 t · hm⁻² bentonite-humic acid amendment and 120 kg · hm⁻² nitrogen showed the best improvement on maize grain yield, above-ground biomass yield and soil NO₃⁻-N residual, with an increase by 19.1% and 18.5% on maize grain yield and above-ground biomass yield, 14.5% decrease on soil NO₃⁻-N residual, respectively. However, addition of 240 kg · hm⁻² of nitrogen had no significant influence on maize yield, but raised the risk of nitrogen leaching. Under the same treatment, modified method showed little influence on soil NH₄⁺-N content, but increased soil NO₃⁻-N content compared with standard method. Bentonite-humic acid amendment absorbed the NO₃⁻-N in the soil, it not only reduced the risk of nitrogen leaching, but also decreased soil bioavailability. It indicated that the combination of 20 t · hm⁻² of bentonite-humic acid amendment and 120 kg · hm⁻² of nitrogen is the best combination for increasing nitrogen availability and reducing nitrogen leaching.

Key words: bentonite humic acid amendment; sandy soil; maize; nitrogen leaching; nitrogen bioavailability