

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李烨, 张子胥, 付春雨

引用本文:

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 等. 黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2371–2379.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363–2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558–1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 等. 黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2371–2379.
KONG Bai-shu, JIAO Shu-ying, LI Yong-qiang, et al. Effect of fulvic acid-modified bentonite on nitrogen leaching and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2371–2379.



开放科学 OSID

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒¹, 焦树英^{1*}, 李永强¹, 沈玉文², 李焱¹, 张子胥¹, 付春雨¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘要:为探究黄腐酸改性膨润土在氮减量条件下对棕壤氮素淋溶及氮肥利用率的影响,通过等温吸附试验,研究黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附性能。采用土柱淋溶试验和玉米盆栽试验明确不同施氮浓度下配施黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和籽粒氮肥利用率的影响,试验设置3个氮肥浓度,分别为农民习惯施肥(CN)、氮肥减量15%(CN1)、氮肥减量30%(CN2),并对3个施氮水平添加土质量0.2%的黄腐酸改性膨润土(XCN、XCN1、XCN2)。结果表明:黄腐酸改性膨润土对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附过程可用Langmuir模型较好地拟合,最大吸附量分别为 $27.28\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $43.37\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。黄腐酸改性膨润土可有效降低土柱 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失,与CN处理相比,XCN处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量降低13.5%,XCN、XCN1、XCN2处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量分别降低38.13%、18.56%和35.75%。黄腐酸改性膨润土可显著提高土壤中氮素的留存和玉米籽粒的氮肥利用率,XCN、XCN1、XCN2处理比CN、CN1、CN2处理籽粒氮肥利用率分别提高7.94%、10.07%、79.17%。研究表明,黄腐酸改性膨润土在氮减量条件下可有效降低土壤氮素淋失,提高作物氮肥利用率,具有潜在的农艺价值。

关键词:黄腐酸改性膨润土;等温吸附; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋失; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失;氮肥利用率

中图分类号:X52;S143.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2371-09 doi:10.11654/jaes.2020-0838

Effect of fulvic acid-modified bentonite on nitrogen leaching and nitrogen use efficiency

KONG Bai-shu¹, JIAO Shu-ying^{1*}, LI Yong-qiang¹, SHEN Yu-wen², LI Ye¹, ZHANG Zi-xu¹, FU Chun-yu¹

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: This study aims to investigate the effects of fulvic acid-modified bentonite on nitrogen leaching in brown soil and urea-nitrogen utilization under three nitrogen levels. The adsorption properties of fulvic acid-modified bentonite for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were studied by conducting isothermal adsorption test. Soil column leaching test and maize pot experiment were conducted to determine the effects of applying fulvic acid-modified bentonite on nitrogen leaching and nitrogen utilization under different nitrogen application gradients. Herein, three nitrogen reduction gradients were set up, i.e., farmers' conventional fertilization (CN), nitrogen reduction by 15% (CN1), nitrogen reduction by 30% (CN2), and 0.2% fulvic acid-modified bentonite was added to the three nitrogen reduction gradients (XCN, XCN1, XCN2), respectively. The results showed that the adsorption process of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ by fulvic acid-modified bentonite can be well fitted by Langmuir model, with maximum adsorption capacity of 27.28 and 43.37 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Compared with CN treatment, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ leaching loss of XCN treatment decreased by 13.5%, whereas $\text{NO}_3^-\text{-N}$ leaching amount of XCN, XCN1, and XCN2 treatments decreased by 38.13%, 18.56%, and 35.75%, respectively. The fulvic acid-modified bentonite could significantly increase nitrogen retention in soil and nitrogen use efficiency of the maize grain. Compared with the treatment of CN, CN1, and CN2, the nitrogen use efficiency of XCN, XCN1, and XCN2 increased by 7.94%, 10.07%, and 79.17%, respectively. Fulvic acid-modified bentonite can effectively reduce soil nitrogen leaching and improve crop nitrogen use efficiency under nitrogen reduction, which has a potential agronomic value.

Keywords: fulvic acid modified bentonite; isothermal adsorption; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ leaching; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ leaching; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2020-07-20 录用日期: 2020-09-28

作者简介: 孔柏舒(1994—),男,山东烟台人,硕士研究生,从事土壤生态学与农业面源污染研究。E-mail: 2289776040@qq.com

*通信作者: 焦树英 E-mail: jiaoshuying@sdaa.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800602)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0800602)

近年来,过量施肥造成的农业面源污染问题成为人们关注的焦点,我国氮肥投入量占全球用量的1/4~1/3,氮肥施用量超过作物实际需要,化肥的增产效应和氮肥利用率持续下降^[1],这种高氮投入的农业生产模式将导致如温室气体排放增加^[2-3]、土壤酸化^[4]、地下水污染^[5-6]等环境问题。因此,减少肥料施用、提高肥料利用率及减少农业面源污染是我国农业良性发展急需解决的关键问题^[7-8]。在众多农业污染物中,氮是最主要且难以防治的污染物^[9]。尿素的过量施用将导致氮素淋溶、氨挥发和硝化反硝化等途径的氮素损失^[10-11],其中氮素淋溶是氮素损失最主要的途径之一^[12],同时也是造成水体污染的主要原因^[9],因此减少氮素淋溶损失是提高肥料利用效率和防治农业面源污染的关键。

吸附剂具有环保、经济、吸附效率高等特点,并在节水保肥^[13]、减少地下水污染^[14-15]等领域内效果显著,所以施用吸附剂被认为是化学增产、提高氮肥利用率和减少肥料面源污染的有效途径之一。膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的层状硅铝酸盐黏土矿物,其表面积较大,且层间易发生不等价阳离子置换而产生永久性电荷,因此其具有较强的离子交换能力和较高的吸附性能^[16],被广泛用于环境修复^[17]。但未经处理的膨润土含有较多杂质,因此吸附能力会受到一定影响^[18]。研究表明膨润土经改性处理可显著提高其吸附能力^[19],Shahmirzadi等^[20]和Tanyol等^[21]发现,经过酸改性的膨润土可显著提高对水溶液中镁离子和磷酸盐的吸附量。黄腐酸是大分子有机酸,具有改良土壤、提高肥效等功能^[22],研究表明腐植酸与膨润土掺混后可显著降低土壤氮素的淋失风险^[23],经黄腐酸改性的膨润土具有提高作物氮肥利用率、减少土壤氨挥发和降低N₂O排放的功效^[24]。因此本研究选用黄腐酸改性膨润土,通过等温吸附、土柱淋洗和玉米盆栽试验,探究黄腐酸改性膨润土对氮素的吸附性能,及其在不同减量施氮条件下土壤氮素淋溶损失的变化和对玉米籽粒氮肥利用率的影响,旨在通过一定吸附材料的添加,达到减源增效的目的,为缓减氮素淋失和农业面源污染、提高氮肥利用率提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤类型为棕壤,于2018年9月采集于泰安市泰山区宅子村的0~20 cm耕层土壤。新鲜土样取回后剔除杂物和根系,风干后过2 mm筛备用。供试土壤基本理化性质见表1。供试肥料尿素(含N 46%)、重过磷酸钙(含P₂O₅ 44%)、硫酸钾(含K₂O 50%)由金正大生态工程集团股份有限公司提供。黄腐酸改性膨润土通过膨润土和黄腐酸在高温下混合反应,离心清洗至pH值呈中性后制得,由山东省农科院提供^[24]。

1.2 试验装置

淋溶试验装置由PVC圆柱管制成^[25],内径10 cm、高100 cm,底部铺2 cm厚、粒径为1~2 mm的石英砂,管底附有一层200目的尼龙网。淋溶时用医用输液管控制水的流速。

1.3 试验设计

1.3.1 吸附等温试验

称取0.25 g黄腐酸改性膨润土于50 mL离心管中,分别加入30 mL浓度为20、40、60、80、100、200、400、600、800、1 000 mg·L⁻¹的硝酸钾或氯化铵溶液,前期试验确定适宜吸附温度为25 ℃,适宜溶液pH为7^[24],用氢氧化钠或盐酸调节溶液pH至中性,每个处理3次重复。将离心管置于25 ℃的恒温振荡器中200 r·min⁻¹振荡24 h后过滤,分别测定滤液中NH₄⁺-N或NO₃⁻-N含量,按公式(1)计算单位质量黄腐酸改性膨润土对NH₄⁺-N或NO₃⁻-N的吸附量 q_e ,并以 C_e 为 x 轴, q_e 为 y 轴用Freundlich模型和Langmuir模型进行拟合^[26]。

$$q_e = (C_0 - C_e)V/m \tag{1}$$

Freundlich模型: $q_e = k_1 C_e^{1/n} \tag{2}$

Langmuir模型: $q_e = bC_e Q_m / (1 + bC_e) \tag{3}$

式中: q_e 代表单位质量黄腐酸改性膨润土对NH₄⁺-N或NO₃⁻-N的吸附量,mg·L⁻¹; C_0 代表溶液中NH₄⁺-N或NO₃⁻-N的起始浓度,mg·L⁻¹; C_e 代表吸附平衡时液相中NH₄⁺-N或NO₃⁻-N的浓度,mg·L⁻¹; V 代表吸附平衡

表1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

pH	电导率 Electroconductibility/ (μS·cm ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
7.29	707.25	1.12	12.50	1.09	2.16	13.32	26.64	50.81

溶液体积, L; m 代表黄腐酸改性膨润土的添加量, g; k_f 和 n 分别代表 Freundlich 模型的经验系数, 其中 n 值越大吸附性能越好; b 为吸附平衡常数, $L \cdot g^{-1}$, 其值越大吸附性能越好; Q_m 为单分子层最大吸附量, $mg \cdot g^{-1}$ 。

1.3.2 土柱淋溶试验

试验于2019年3月15日—4月18日在山东农业大学土肥高效利用国家工程实验室内进行, 室内温度为15~25℃, 试验共6个处理, 3次重复, 吸附剂施用量为土质量的0.2%^[27]。如表2所示, 将风干土5300g与氮、磷、钾肥和黄腐酸改性膨润土充分混合后填充进土柱, 形成高60cm的模拟土柱, 并注意将土柱边缘的土壤压实, 避免边缘效应, 此时土柱容重为 $1.12 g \cdot cm^{-3}$ 。采用间歇淋溶法^[28]收集淋洗液, 淋溶前加1200mL水使土壤水分接近饱和, 室温下放置1d。首次淋溶加入400mL水, 收集24h淋溶液。将淋溶柱仍放置在室温条件下, 自然蒸发, 6d后称质量, 此时土壤含水率降到约60%左右, 进行第二次淋溶, 每次淋溶过程相同, 在培养第2、8、14、20、26d和32d进行连续6次淋溶, 并记录淋溶液量。

1.3.3 玉米盆栽试验

试验于2019年6月20日—10月5日在山东农业大学南校区试验地进行, 试验共设6个处理, 3次重复, 具体如表2所示。每盆10kg土并种植3株玉米, 吸附剂施用量为土质量的0.2%, 成苗5叶期进行间苗保留一株长势较好的幼苗。玉米生长过程中, 根据玉米生长需要每7d进行1次灌水, 利用称质量法控制土壤含水率约为田间持水量的70%^[29]。成熟期测定每株玉米穗粒数、百粒质量和籽粒氮含量并计算产量、籽粒氮素积累量和籽粒氮素利用率^[30]。

籽粒产量($g \cdot 盆^{-1}$) = 穗粒数 × 百粒质量(g) ÷ 100

籽粒氮素积累量($g \cdot 盆^{-1}$) = 籽粒产量($g \cdot 盆^{-1}$) × 籽粒含氮率(%)

籽粒氮肥利用率(%) = [施氮处理籽粒氮素积累量($g \cdot 盆^{-1}$) - 不施氮处理籽粒氮素积累量($g \cdot 盆^{-1}$)] ÷ 施氮量($g \cdot 盆^{-1}$) × 100%

1.4 测定项目与方法

盆栽玉米土壤于玉米成熟期采用破坏式取样, 土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度分别采用 $1 mol \cdot L^{-1}$ 的氯化钾溶液浸提以及AA3型流动注射分析仪测定。玉米籽粒全氮采用硫酸-过氧化氢消煮, 半微量凯氏定氮法测定。水质样品 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度在稀释后采用AA3型流动注射分析仪测定。 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 累计淋出量为各次养分淋出量相加, 单次养分淋出量为各次淋溶液养分含量与淋溶液淋出量的乘积。

1.5 数据分析

数据采用Excel 2016和Origin 2018进行图表绘制, 采用SPSS 23进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和LSD显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 黄腐酸改性膨润土对 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的吸附等温线

黄腐酸改性膨润土对 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的吸附量均随溶液 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的增加而增加(图1)。当吸附平衡, 液相 NH_4^+-N 浓度达 $600 mg \cdot L^{-1}$ 时, 黄腐酸改性膨润土达到饱和, 此时实测值为 $27.28 mg \cdot g^{-1}$ 。当液相 NO_3^--N 浓度达 $640 mg \cdot L^{-1}$ 时, 黄腐酸改性膨润土对 NO_3^--N 的吸附量不再显著增加, 说明此时($43.37 mg \cdot g^{-1}$)的吸附量已接近饱和。根据黄腐酸改性膨润土对 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的吸附等温模型参数(表3)可知, Langmuir模型能较好地描述黄腐酸改性膨润土的热力学行为。根据Langmuir模型可知, 黄腐酸改性膨润土对 NO_3^--N 的吸附能力和单分子层最大吸附量均强于 NH_4^+-N , 表现为 b 值 $0.0027 > 0.0025$, Q_m 值

表2 土柱淋溶试验与玉米盆栽处理

Table 2 Leaching experiment and treatment of potted maize

编号 Code	处理 Treatments	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	吸附剂类型 Adsorbent type	土柱吸附剂用量 Amount of adsorbent/g	每盆吸附剂用量 Amount of adsorbent/g
CK	不施氮肥	0-120-90	无	—	0
CN	当地农民习惯施肥量	240-120-90	无	0	0
CN1	氮肥减量15%	204-120-90	无	0	0
CN2	氮肥减量30%	168-120-90	无	0	0
XCN	习惯施肥量配施吸附剂	240-120-90	黄腐酸改性膨润土	10.6	20
XCN1	氮肥减量15%配施吸附剂	204-120-90	黄腐酸改性膨润土	10.6	20
XCN2	氮肥减量30%配施吸附剂	168-120-90	黄腐酸改性膨润土	10.6	20

74.333 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ > 45.194 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。但 Langmuir 模型拟合出的单分子层最大吸附量均高于实测饱和吸附量,说明黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附过程不仅是单分子层吸附。

2.2 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量的影响

在农民习惯施氮下,各时间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量均表现为 $\text{CN} > \text{XCN}$ (图2), XCN 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量较 CN 处理降低 13.5%。减氮 15% 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量为 $\text{XCN1} > \text{CN1}$, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。减氮 30% 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量为 $\text{CN2} > \text{XCN2}$, 说明黄

腐酸改性膨润土可以有效吸附土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋失。如图3所示, 添加黄腐酸改性膨润土可显著降低 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失量, 在不同施氮水平条件下, XCN 、 XCN1 、 XCN2 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量较 CN 、 CN1 、 CN2 处理分别降低 38.13%、19.58%、6.65%, 说明黄腐酸改性膨润土在不同施氮量下均对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有较强的吸附能力。

2.3 淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 特征曲线拟合

对各处理中淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量 (y) 随淋溶时间 (x) 的变化, 分别以 $y = ax + b$ 、 $y = a \ln x + b$ 、 $y = ax^b$ 、 $y = ae^{bx}$ 方程进行回归分析 (表4)。各拟合方程 R^2 均达到

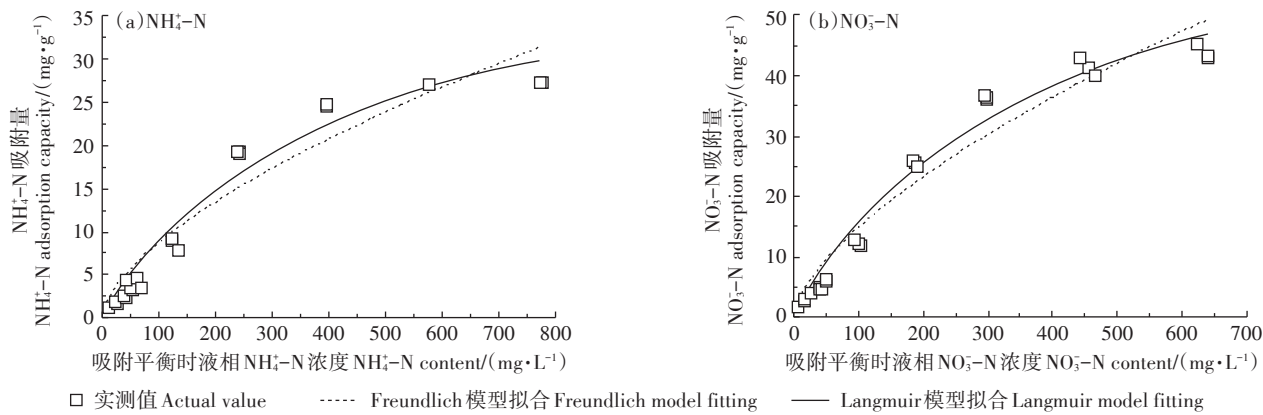


图1 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附等温线

Figure 1 Adsorption isotherm of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ on bentonite modified by fulvic acid

表3 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附等温模型参数

Table 3 Constants of Langmuir and Freundlich models for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ adsorption on fulvic acid- modified bentonite

等温吸附模型 Isothermal adsorption model	$\text{NH}_4^+\text{-N}$			$\text{NO}_3^-\text{-N}$		
	拟合参数 Fitting constants		R^2	拟合参数 Fitting constants		R^2
Freundlich 模型	$K_f=0.487$	$n=1.595$	0.933	$K_f=0.766$	$n=1.551$	0.953
Langmuir 模型	$Q_m=45.194 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b=0.002 \text{ 5}$	0.973	$Q_m=74.333 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b=0.002 \text{ 7}$	0.982

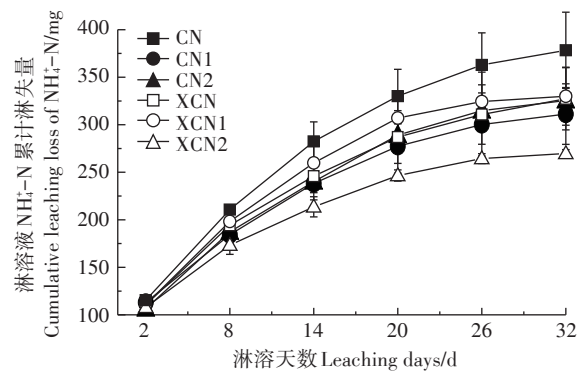


图2 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量的影响

Figure 2 Effect of fulvic acid-modified bentonite on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ cumulative leaching loss

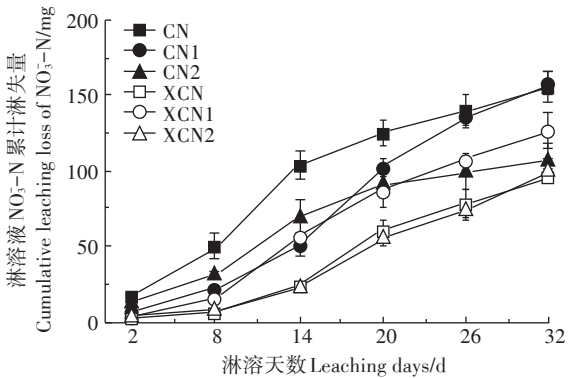


图3 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量的影响

Figure 3 Effect of fulvic acid-modified bentonite on $\text{NO}_3^-\text{-N}$ cumulative leaching loss

极显著水平($P<0.01$),说明不同处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累计淋失量均随时间的增加而增加。其中以方程 $y=ax+b$ 对各处理的拟合效果最好,方程中 a 表示不同处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累计淋失量(y)随淋溶时间(x)的变化速率, b 表示不同处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的初始累计淋失量。各处理 b 值大小表现为 $\text{CN}>\text{CN2}>\text{XCXN1}>\text{XCXN}>\text{CN1}>\text{XCXN2}$,说明添加黄腐酸改性膨润土可降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的初始淋失量。各处理 a 值大小表现为 $\text{CN1}>\text{CN}>\text{XCXN1}>\text{XCXN}>\text{XCXN2}>\text{CN2}$,说明添加黄腐酸改性膨润土可降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失速率,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失速率的降低说明黄腐酸改性膨润土通过增加单位时间内对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸附能力,延长土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的留存时间,从而减少 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋溶。

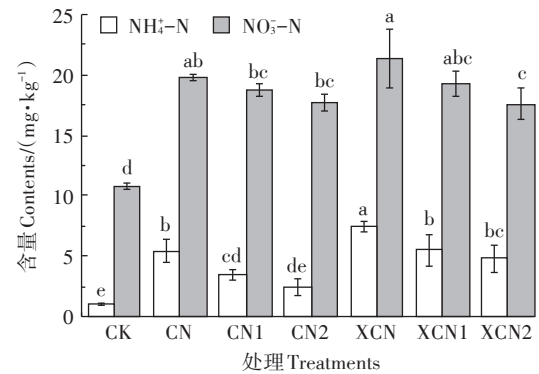
2.4 黄腐酸改性膨润土对土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量及盆栽玉米氮肥利用率的影响

添加黄腐酸改性膨润土可显著提高土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量(图4),其中XCXN处理土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著高于其他处理,较CN处理土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量分别提高73.75%和7.6%。产量数据表明各处理差异显著(表5),其中XCXN、XCXN1、XCXN2处理较CN、CN1、CN2处理产量分别提高8.44%、8.16%、4.6%。添加黄腐酸改性膨润土可提高玉米籽粒氮素吸收量和籽粒氮肥利用率,XCXN、XCXN1、XCXN2处理较CN、CN1、CN2处理籽粒氮肥利用率分别提高7.94%、10.07%、79.17%。说明黄腐酸改性膨润土可以减少土壤氮素淋失,且随施氮量降低,籽粒氮肥利用率显著增加,具有潜在的农艺价值。

3 讨论

3.1 黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸附性能

本研究中黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的等温吸附在Freundlich模型中拟合参数 n 均大于1,说明黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸附过



不同字母表示各处理之间在0.05水平上差异显著
Different letters indicate a significant difference in the level of $P<0.05$ between the treatments

图4 黄腐酸改性膨润土对土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的影响
Figure 4 Effects of fulvic acid-modified bentonite on soil $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ contents

表5 黄腐酸改性膨润土对玉米籽粒产量、氮素吸收量及氮肥利用率的影响

Table 5 Effects of fulvic acid-modified bentonite on grain yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency

处理 Treatments	产量 Yield/ (g·pot ⁻¹)	籽粒氮素吸收量 Nitrogen uptake of grain/ (g·pot ⁻¹)	籽粒氮肥利用率 Nitrogen use efficiency of grain/%
CK	33.2±2.06e	0.20±0.01d	
CN	56.17±1.47b	1.50±0.17ab	26.07±3.4ab
CN1	51.85±0.14bc	1.24±0.17b	24.42±4.08ab
CN2	45.9±3.86d	0.58±0.11c	10.85±3.08c
XCXN	60.91±0.89a	1.61±0.25a	28.14±4.86a
XCXN1	56.08±3.54b	1.34±0.11ab	26.88±2.51ab
XCXN2	48.01±2.41cd	0.88±0.17c	19.44±4.96b

注:同列不同字母表示各处理之间在0.05水平上差异显著。

Note: Different letters in the same column indicate a significant difference in the level of $P<0.05$ between the treatments.

程较容易进行。这是由于膨润土的斜晶系层间具有大量可用于交换的离子^[31],经黄腐酸改性后的膨润土

表4 不同处理淋溶液 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累计淋失量(y)与时间(x)的拟合方程

Table 4 Fitting equations of $\text{NO}_3\text{-N}$ cumulative leaching loss(y) and time(x) in different treatments

处理 Treatments	$y = ax + b$			$y = a \ln x + b$			$y = ax^b$			$y = ae^{bx}$		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
CN	4.70	18.84	0.92**	51.49	-31.19	0.92**	9.78	0.83	0.97**	24.66	0.07	0.80**
XCXN	3.42	-13.39	0.95**	32.93	-38.25	0.73**	0.85	1.34	0.92**	3.08	0.12	0.92**
CN1	5.48	-14.02	0.97**	54.17	-57.42	0.79**	2.32	1.22	0.98**	8.15	0.11	0.90**
XCXN1	4.40	-8.57	0.97**	44.74	-46.58	0.83**	1.44	1.32	0.97**	5.91	0.11	0.86**
CN2	3.30	12.18	0.88**	35.87	-22.15	0.86**	7.24	0.82	0.96**	17.30	0.07	0.82**
XCXN2	3.41	-14.14	0.95**	32.25	37.50	0.70**	1.05	1.26	0.91**	3.46	0.12	0.95**

注:**表示 $P<0.01$ 。

Note: **means $P<0.01$.

相比天然膨润土层间距离得到增加,并带有更多的永久性负电荷,有利于阳离子之间的交换^[19],使得黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附能力远大于天然膨润土^[24]。因膨润土具有较大的比表面积和较高的离子交换容量^[32],且黄腐酸是一种环保型大分子,具有很强的吸附能力^[33],这使黄腐酸改性膨润土对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 也具有很强的吸附能力。本研究中黄腐酸改性膨润土Langmuir模型中理论单分子层吸附量大于实际饱和吸附量,说明膨润土对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附过程同时存在物理吸附和化学吸附^[34]。而改性膨润土对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的化学吸附性能与其表面碱性含氧官能团数量密切相关^[35],张元波等^[36]的研究发现腐植酸改性膨润土的表面较天然膨润土增加了大量碱性含氧官能团,因此会提高其对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附性能^[37],这与本研究结论相一致。

3.2 黄腐酸改性膨润土对土柱 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶损失的影响

土壤中存在不同的氮素形态,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易被土壤胶体吸附和被矿物晶格固定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 难以被土壤胶体吸附,运移能力强^[38],所以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最容易发生淋溶损失,其次是 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[39]。但在本研究中,土壤氮素淋失以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主,这是由于土壤含水率较高,导致土壤通气不良形成还原条件,硝化作用减弱^[40-41],且尿素水解同样使前期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量增加。Shen等^[24]研究表明,添加改性膨润土相比天然膨润土可显著降低土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失量。本研究中,添加黄腐酸改性膨润土在不同施氮浓度下均可降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失速率,说明黄腐酸改性膨润土通过延长土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的留存时间从而减少 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋溶,同时XCN处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失速率低于XCN1处理,这是由于改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附效率在一定程度上与体系中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的初始浓度有关,在高初始浓度下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的物质传输动力更大,更有利于黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附^[42-43]。

3.3 黄腐酸改性膨润土对盆栽土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量及玉米氮肥利用率的影响

本研究中,添加黄腐酸改性膨润土可增加土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。这是由于吸附剂对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附以化学吸附为主^[44],吸附剂对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附限度主要受其本身阳离子交换能力的影响^[45],相关研究表明经改性后的膨润土可显著增加其阳离子交

换量,从而提高其对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的留存能力^[46-48],同时黄腐酸改性膨润土对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附和固定降低了土壤氮素的硝化速率,导致土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量减少,从而降低了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失风险^[49]。相关研究表明^[24],添加黄腐酸改性膨润土不仅对土壤氮素有明显的吸附能力,同时可显著提高小麦对氮肥的吸收。本研究中添加黄腐酸改性膨润土显著提高了玉米籽粒产量和籽粒氮肥利用率,在农民习惯性施肥(CN)条件下添加黄腐酸改性膨润土(XCN),玉米产量增加8.44%,氮减量15%并添加黄腐酸改性膨润土(XCN1)处理的玉米产量可达到农民习惯性施肥(CN)时的产量,说明在一定减氮范围内添加黄腐酸改性膨润土可减缓玉米减产,且随施氮量降低,籽粒氮肥利用率提高效果越显著,这是由于在氮肥减量条件下,添加黄腐酸改性膨润土可通过延长土壤氮素留存时间,来降低土壤氮素淋失,从而减少不必要的氮肥损失,延长肥效,提高肥料利用率^[50]。郑毅等^[51-52]的研究显示,腐植酸和膨润土均可显著提高土壤保水性,降低土壤氮素淋失风险,在氮肥减量条件下,可保证玉米生育期对水分和氮素的需求。因此,添加黄腐酸改性膨润土可成为减氮增效的新途径,具有潜在的农艺价值。

4 结论

(1)黄腐酸改性膨润土对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附过程可用Langmuir模型较好地拟合,实测最大吸附量分别为 $27.28\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $43.37\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

(2)黄腐酸改性膨润土可有效减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋失,与CN处理相比较,XCN处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累计淋失量降低13.5%;XCN、XCN1、XCN2处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累计淋失量较CN、CN1、CN2分别降低38.13%、18.56%和35.75%。

(3)黄腐酸改性膨润土可显著提高土壤中氮素的留存和玉米籽粒氮素利用率,XCN、XCN1、XCN2处理较CN、CN1、CN2处理籽粒氮肥利用率分别提高7.94%、10.07%、79.17%。

参考文献:

- [1] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580):51-59.
 - [2] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4):966-975.
- ZHANG Yu-ming, HU Chu-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research

- advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):966-975.
- [3] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4):740-749.
LI Jing, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4):740-749.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [5] 陈效民, 潘根兴, 沈其荣, 等. 太湖地区农田土壤中硝态氮垂直运移的规律[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6):481-484.
CHEN Xiao-min, PAN Gen-xing, SHEN Qi-rong, et al. Study on the nitrate vertical transport rule in farmland soil of Tai Lake area[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(6):481-484.
- [6] 王荣萍, 余炜敏, 黄建国, 等. 田间条件下氮的矿化及硝态氮淋溶研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):80-82, 107.
WANG Rong-ping, YU Wei-min, HUANG Jian-guo, et al. Study on nitrogen mineralization and nitrate leaching in fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):80-82, 107.
- [7] Gu L M, Liu T N, Wang J F, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of northern Chinese wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 188:82-95.
- [8] Poffenbarger H J, Sawyer J E, Barker D W, et al. Legacy effects of long-term nitrogen fertilizer application on the fate of nitrogen fertilizer inputs in continuous maize[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265:544-555.
- [9] 俞映琼, 王悦满, 侯朋福, 等. 生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11):5170-5179.
YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, et al. Effects of returning nitrogen by biochar loading on paddy growth, root morphology, and nitrogen use efficiency[J]. *Environment Science*, 2018, 39(11):5170-5179.
- [10] 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 等. 常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究:以长江中下游地区夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2015, 36(9):3358-3364.
SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al. Nitrogen loss through different ways in cropland under conventional fertilization: An in-situ study of summer maize season in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Environment Science*, 2015, 36(9):3358-3364.
- [11] 阿力木·阿布来提, 余冬立, 张文娟, 等. 抑制剂对淹水土壤反硝化和氨挥发的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12):5191-5199.
ALimu Abulaiti, SHE Dong-li, ZHANG Wen-juan, et al. Effects of inhibitors on denitrification and ammonia volatilization in submerged soils[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(12):5191-5199.
- [12] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):128-134.
XIAO Qian, ZHANG Hong-pei, SHEN Yu-fang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16):128-134.
- [13] 李嘉竹, 黄占斌, 鲍芳, 等. 环境功能材料水肥保持性能的综合评价[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3):125-133.
LI Jia-zhu, HUANG Zhan-bin, BAO Fang, et al. Comprehensive assessment on soil moisture and nutrient conservation of environment functional materials[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(3):125-133.
- [14] 林丽丹, 王哲, 顾伟, 等. 沸石水合氧化锆吸附水中的磷[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2):702-708.
LIN Li-dan, WANG Zhe, GU Wei, et al. Phosphate adsorption from water by zeolite/hydrous zirconium oxide composite synthesized from coal fly ash[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2):702-708.
- [15] 刘秀珍, 孙立艳. 膨润土和磷肥对石灰性土壤无机磷形态转化及有效性的影响[J]. 核农学报, 2004, 18(1):59-62.
LIU Xiu-zhen, SUN Li-yan. Effect of bentonite and phosphorus fertilizer on inorganic phosphorus transformation and their availabilities in calcareous soil[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2004, 18(1):59-62.
- [16] Liu Z S, Zhang Y, Liu B Y, et al. Adsorption performance of modified bentonite granular (MBG) on sediment phosphorus in all fractions in the West Lake, Hangzhou, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106:124-131.
- [17] Karaca G, Baskaya H S, Tasdemir Y. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from inorganic clay mineral: Bentonite[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(1):242-252.
- [18] 刘子森, 张义, 王川, 等. 改性膨润土和沉水植物联合作用处理沉积物磷[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2):665-674.
LIU Zi-sen, ZHANG Yi, WANG Chuan, et al. Synergistic removal of sediment P by combining the modified bentonite and *Vallisneria spiralis*[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2):665-674.
- [19] 王抚抚, 陈泉水, 罗太安, 等. 膨润土的改性研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(4):775-779.
WANG Fu-fu, CHEN Quan-shui, LUO Tai-an, et al. Research progress of modification on bentonite[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(4):775-779.
- [20] Shahmirzadi M A A, Hosseini S S, Tan N R. Enhancing removal and recovery of magnesium from aqueous solutions by using modified zeolite and bentonite and process optimization[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(12):3529-3540.
- [21] Tanyol M, Yonten V, Demir V. Removal of phosphate from aqueous solutions by chemical- and thermal-modified bentonite clay[J]. *Water, Air & Soil Pollut*, 2015(8):226-269.
- [22] 李青山, 王德权, 高政绪, 等. 黄腐酸钾对植烟土壤氮素转化及N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):1130-1139.
LI Qing-shan, WANG De-quan, GAO Zheng-xu, et al. Effects of fulvic acid potassium on N transformation in and N₂O emission from tobacco plantation soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1130-1139.
- [23] 王彦钡, 周鑫斌, 徐宸, 等. 有机肥-膨润土-腐植酸复合调理剂对黄壤土吸附氮素的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(11):16-21.

- WANG Yan-kun, ZHOU Xin-bin, XU Chen, et al. Effects of organic fertilizer-bentonite-humic acid composite conditioner on nitrogen adsorption of tobacco-growing yellow soil[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2017, 50(11):16-21.
- [24] Shen Y W, Jiao S Y, Ma Z, et al. Humic acid-modified bentonite composite material enhances urea-nitrogen use efficiency[J]. *Chemosphere*, 2020, 255:126976.
- [25] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11):2483-2488.
- XING Ying, LI Xin-qing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11):2483-2488.
- [26] 王荣荣, 赖欣, 李洁, 等. 花生壳生物炭对硝态氮的吸附机制研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(9):1727-1734.
- WANG Rong-rong, LAI Xin, LI Jie, et al. Adsorption of nitrate nitrogen by peanut shell biochar[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1727-1734.
- [27] 马妍, 刘振海, 刘陆涵, 等. 三种环境材料复合对土壤水肥保持同步增效的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12):113-120.
- MA Yan, LIU Zhen-hai, LIU Lu-han, et al. Study of composites of three kinds of environmental materials on the synergism of soil moisture conservation and nitrogen-phosphorus fertilizer efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):113-120.
- [28] 熊义升, 陈明亮, 喻永熹, 等. 间歇淋洗干湿交替条件下氮肥的氮行为研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2):153-158.
- XIONG You-sheng, CHEN Ming-liang, YU Yong-xi, et al. The fate of nitrogen forms of nitrogen fertilizers under alternate leaching and drying conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2):153-158.
- [29] 袁兴超, 李博, 朱仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4):807-817.
- YUAN Xing-chao, LI Bo, ZHU Ren-feng, et al. Immobilization of Cd and Pb using different amendments of cultivated soils around lead-zinc mines[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):807-817.
- [30] 张振, 于振文, 张永丽, 等. 氮肥基追比例对测墒补灌小麦植株氮素利用及土壤氮素表现盈亏的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5):240-245.
- ZHANG Zhen, YU Zhen-wen, ZHANG Yong-li, et al. Effects of basal/topdressing nitrogen fertilizer on nitrogen utilization in wheat plants and soil nitrogen apparent budget under supplemental irrigation based on measuring soil moisture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5):240-245.
- [31] 张秀英. 膨润土的改性及其在印染废水吸附中的应用[J]. *中国矿业*, 2011, 20(11):117-119, 124.
- ZHANG Xiu-ying. Apply in the modification of bentonite-based dyeing wastewater absorbent[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(11):117-119, 124.
- [32] 苑丽质. 膨润土改性及其吸附性能研究[J]. *应用化工*, 2016, 45(3):482-484.
- YUAN Li-zhi. Study on modification and adsorption properties of bentonite[J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(3):482-484.
- [33] 尚宏周, 赵敬东, 何俊男, 等. 黄腐酸基离子印迹聚合物的制备及吸附性能研究[J]. *应用化工*, 2017, 46(6):1113-1117.
- SHANG Hong-zhou, ZHAO Jing-hai, HE Jun-nan, et al. Preparation and absorption study of modified fulvic acid ion imprinted polymer[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6):1113-1117.
- [34] 周旋, 吴良欢, 董春华, 等. 氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1804-1814.
- ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DONG Chun-hua, et al. Effects of nitrogen fertilization combined with biochemical inhibitors on leaching characteristics of soil nitrogen in yellow clayey soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1804-1814.
- [35] 武丽君, 王朝旭, 张峰, 等. 玉米秸秆和玉米芯生物炭对水溶液中无机氮的吸附性能[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1):74-81.
- WU Li-jun, WANG Chao-xu, ZHANG Feng, et al. The adsorption characters of inorganic nitrogen in aqueous solution by maize straw- and corn cob-derived biochars[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1):74-81.
- [36] 张元波, 欧阳学臻, 路漫漫, 等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果[J]. *烧结球团*, 2018, 43(4):27-32.
- ZHANG Yuan-bo, OUYANG Xue-zhen, LU Man-man, et al. Application effect of humic acid modified bentonite binder in iron ore pellets[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2018, 43(4):27-32.
- [37] 李吉进, 邹国元, 王美菊, 等. 膨润土保氮增产效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2006(3):27-30.
- LI Ji-jin, ZOU Guo-yuan, WANG Mei-ju, et al. Study on the effect of bentonite improving soil fertilizer-conserving and increasing yields[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2006(3):27-30.
- [38] 李丹, 孙志梅, 王艳群, 等. 有机组分对N素在砂壤土中淋溶转移的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3):23-26.
- LI Dan, SUN Zhi-mei, WANG Yan-qun, et al. Effects of organic material on n leaching and movement in sandy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3):23-26.
- [39] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):85-88.
- ZHANG Ya-li, ZHANG Xing-chao, SHAO Ming-an, et al. Impact of straw cover on mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1):85-88.
- [40] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, et al. Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting Lake area of China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6):71-80.
- [41] Ke J, He R C, Hou P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265:402-412.
- [42] 张广兴, 邵红, 李云娇, 等. 复合改性膨润土对氨氮废水的吸附及脱附[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(3):1494-1500.
- ZHANG Guang-xing, SHAO Hong, LI Yun-jiao, et al. Adsorption and desorption of ammonia-nitrogen wastewater by modified bentonite[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3):1494-1500.

- [43] Cheng H M, Zhu Q, Xing Z P. Adsorption of ammonia nitrogen in low temperature domestic wastewater by modification bentonite[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233:720-730.
- [44] 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 等. 多种材料对水中氨氮的吸附特性[J]. 环境科学, 2019, 40(8):3633-3641.
- JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, et al. Adsorption properties of ammonia nitrogen in aqueous solution by various materials[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8):3633-3641.
- [45] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2010, 213(1):47-55.
- [46] 王腾, 路浩源, 张梦飞, 等. 掺杂比例对 N-F 共掺杂 TiO₂/膨润土复合材料的表征及吸附土霉素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12):2764-2771.
- WANG Teng, LU Hao-yuan, ZHANG Meng-fei, et al. Effect of N-F doping ratio on terramycin adsorption performance of TiO₂/bentonite composites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2764-2771.
- [47] 王腾, 谢婷, 任爽, 等. BS/DTAB 复配修饰膨润土的表征及对苯酚、菲的不同吸附模式[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1716-1723.
- WANG Teng, XIE Ting, REN Shuang, et al. Characterization of different adsorption mechanisms of phenol and phenanthrene with BS/DTAB modified bentonite[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1716-1723.
- [48] 王训, 闫飞, 王永敏, 等. 秸秆改良剂对沙质土有机质和阳离子交换量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(23):224-228.
- WANG Xun, YAN Fei, WANG Yong-min, et al. Effects of straw modified material on cation exchange capacity and organic matter of sandy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(23):224-228.
- [49] Pratiwi E P A, Hillary A K, Fukuda T, et al. The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil[J]. *Geoderma*, 2016, 277(2046):61-68.
- [50] 张晨阳, 张富仓, 郭金金, 等. 缓释氮肥与尿素掺施比例对冬小麦产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4):669-680.
- ZHANG Chen-yang, ZHANG Fu-cang, GUO Jin-jin, et al. Effects of blending ratios of slow-release nitrogen fertilizer and urea on yield and nitrogen uptake of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(4):669-680.
- [51] 郑毅, 周磊, 刘景辉. 膨润土-腐植酸型改良剂对沙质土壤氮素气态损失、氮肥利用率和玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12):3887-3894.
- ZHENG Yi, ZHOU Lei, LIU Jing-hui. Effects of bentonite-humic acid on gaseous nitrogen loss, nitrogen use efficiency and maize yield on sandy soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12):3887-3894.
- [52] 郑毅, 李丰义, 刘庭玉, 等. 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[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6):114-122.
- ZHENG Yi, LI Feng-yi, LIU Ting-yu, et al. The effects of bentonite-humic acid amendment and nitrogen application on soil inorganic nitrogen leaching and bioavailability in Horqin sandy soil[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(6):114-122.