

沼液中全氮在非饱和均质土壤中的吸附特征试验

郑健^{1,2}, 孙雨欣^{1,2}, 王燕^{1,2}, 张恩继^{1,2}

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050;
2. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为探讨沼液中全氮在非饱和均质土壤中的吸附特征,在室内恒温条件下,对非饱和均质土柱采用一维沼液吸附试验,测定不同沼液浓度、土壤密度及沼液入渗水头条件下渗出液电导率及全氮含量,并应用对流弥散溶质运移模型和 CXTFIT2.0 软件对试验数据进行拟合,得到了不同试验方案下的全氮平均孔隙水流速和水动力弥散度。试验结果表明:不同试验方案下较大密度土壤的渗出液电导率峰值点均小于较小密度土壤的峰值点;峰值点后渗出液的电导率与峰值点差值随沼液浓度的增大而增大;相同土壤密度及入渗水头条件下,随沼液浓度的增大,吸附曲线逐渐向右偏移,全氮运移吸附转折点对应时间及被截获在土柱中的全氮量增加,而吸附转折点渗出液相对浓度、平均孔隙水流速及水动力弥散度均减小;相同沼液浓度及土壤密度条件下,随入渗水头增大,土壤对全氮吸附达到饱和所需时间减少,平均孔隙水流速及水动力弥散度增大;相同沼液浓度及入渗水头条件下,随土壤密度的增大,全氮吸附转折点对应时间增长,水动力弥散度增大,而平均孔隙水流速减小。

关键词:非饱和均质土壤;土壤承载力;沼液;全氮;吸附特征

中图分类号:S158;S273 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0010-06

Experimental study on adsorption of total nitrogen from biogas slurry in unsaturated homogeneous soil//ZHENG jian^{1,2}, SUN Yuxin^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, ZHANG Enji^{1,2} (1. China Western Energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A one-dimensional experiment of adsorption of biogas slurry by unsaturated homogeneous soil at constant room temperature was conducted in order to investigate the adsorption characteristics of total nitrogen from biogas slurry. The conductivity and total nitrogen content of percolates were measured with different concentrations of biogas slurry, soil densities, and infiltration heads of biogas slurry. The average pore-water velocities and hydrodynamic dispersion coefficients under different experimental conditions were obtained through fitting of the experimental data using the convection-dispersion model of solute transport and CXTFIT2.0 software. The experimental results showed that the peak values of the conductivity of percolates in experimental schemes with higher soil density was less than those in schemes with lower soil density; the differences between the peak conductivity of the percolates and the conductivity after the peak point increased with the concentration of the biogas slurry; with the increase of the biogas slurry concentration, the adsorption curves gradually moved towards the right, and the time corresponding to the turning point of adsorption curve and the total nitrogen content in soil increased, but the relative concentration of the percolate at the turning point, the average pore-water velocity, and the hydrodynamic dispersion coefficient decreased under the same soil density and head conditions; with the increase of the infiltration head, the time that the soil needed to reach saturation of the adsorbed total nitrogen decreased, and the average pore-water velocity and hydrodynamic dispersion coefficient increased under the same biogas slurry concentration and soil density conditions; and, with the increase of soil density, the time corresponding to the turning point of adsorption curves and the hydrodynamic dispersion coefficient increased, but the average pore-water velocity decreased under the same biogas slurry concentration and head conditions.

Key words: unsaturated homogeneous soil; soil bearing capacity; biogas slurry; total nitrogen; adsorption characteristics

沼液是一种含有水溶性及多种养分的速效肥料,保留了90%以上的发酵原料中的氮、磷和钾,且氮素结构较原污水更优,并且含有刺激植物生长的多种活性物质,更容易被植物所吸收利用,施用可以

显著改善土壤的理化性质,提高土壤的保水保肥能力,缓解土壤的板结酸化^[1]。国内学者李友强等^[2-4]的研究表明,施用沼液可以改善作物品质,有效提高作物产量和降低硝酸盐含量;吴红等^[5-7]的研究表明,施用沼液有利于提高土壤有机质、全氮、全磷和全钾的含量,促进土壤中多种微生物的生长,并能提高土壤呼吸强度。国外学者 Matsunaka 等^[8]研究发现在早春施用沼液可以有效提高草地的氮肥利用效率;Kumar 等^[9]研究表明:采用 1 : 3 和 3 : 1 (沼液和水的体积比)沼液溶液灌溉土壤对磷的吸收和利用明显高于 1 : 1 的沼液溶液,同时大豆的产量和品质显著提高。但现有对沼液的研究大多集中在提高作物产量、品质和改善土壤环境上,而针对提高沼液灌溉农田土壤承载力方面的研究较少。

吸附试验是通过测定不同时刻渗出液中溶质相对浓度随时间的变化规律来表征土壤对溶质吸附能力的一种试验方法,本文采用该试验方法研究不同沼液浓度、土壤密度及水头条件下农田土壤对沼液的承载力。国外对吸附试验的研究比较早,Bohart 等^[10]推导出了 Adams-Bohart 模型;Singh^[11]利用吸附试验,得到了溶质弥散系数;Yoon 等^[12]用人工神经网络模型模拟了地下水中溶质在非饱和带的吸附曲线;Pan 等^[13]采用恒定模式概念和波理论建立了吸附模型。国内学者孙慧敏等^[14]通过 Cl⁻ 离子吸附试验,研究了土壤团聚体大小对非反应性溶质的影响;李志明等^[15-16]通过吸附试验,得到了土壤密度变化对溶质运移特征的影响;杨艳等^[17]通过不同非饱和土质的吸附试验,得到了溶质运移参数。现有研究主要是针对饱和土壤中离子的吸附试验研究,采用吸附试验研究养分在非饱和均质土壤中吸附特征的成果还较少,尤其是针对沼液中养分在非饱和均质土壤中吸附特征的研究还鲜见报道。

本文通过恒定水头一维非饱和均质土柱吸附试验,分析不同沼液浓度、土壤密度及沼液入渗水头条件下沼液中全氮在非饱和均质土壤中的吸附特征,为沼液灌溉条件下农田土壤承载力的研究提供一定的科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验在兰州理工大学能源与动力工程学院实验室内进行。试验土壤及沼液均取自甘肃省皋兰县阳洼窑村。试验土壤采自村中正常耕作农田 0 ~ 40 cm 土层,混合均匀,自然风干,去除植物根系、石块等杂质后,过 2 mm 筛备用。采用土壤颗粒分析仪进行土壤粒径分析,结果如表 1 所示。

表 1 试验土壤粒径						
粒径/mm	<2	<1	<0.5	<0.1	<0.075	<0.005
质量分数/%	100	99.960	99.107	98.565	97.216	3.000

试验所用沼液以猪粪为主要原料,取自正常产气的户用沼气池,试验前用 4 层纱布过滤掉沼液中较大的悬浮颗粒后备用,并测定沼液基本物理性质及全氮含量,结果如表 2 所示。为符合现有田间实施方法,本文以沼液配比(沼液与水的体积比)来表示沼液浓度的高低。

表 2 沼液物理特性及全氮含量				
沼液配比	密度/ (g · mL ⁻¹)	黏度/ (10 ⁻³ Pa · s)	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	全氮质量浓度/ (g · L ⁻¹)
原液	1.006	2.132 5	>20	2.43
1 : 1	1.001	1.348 1	11.19	1.35
1 : 2	0.998	1.173 8	8.19	1.08
1 : 4	0.994	1.070 0	5.71	0.38

1.2 试验装置与设计

试验设置土壤密度为 1.25 g/cm³ 和 1.30 g/cm³,沼液配比为 1 : 4、1 : 2、1 : 1,沼液入渗水头为 2 cm 和 4 cm,土柱高度为 10 cm。试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案							
试验 方案	土壤密度/ (g · cm ⁻³)	沼液 配比	入渗 水头/ cm	试验 方案	土壤密度/ (g · cm ⁻³)	沼液 配比	入渗 水头/ cm
1	1.25	1 : 4	4	7	1.30	1 : 4	4
2	1.25	1 : 2	4	8	1.30	1 : 2	4
3	1.25	1 : 1	4	9	1.30	1 : 1	4
4	1.25	1 : 4	2	10	1.30	1 : 4	2
5	1.25	1 : 2	2	11	1.30	1 : 2	2
6	1.25	1 : 1	2	12	1.30	1 : 1	2

试验装置由马氏瓶、试验土柱和烧杯组成,如图 1 所示。试验用土槽为长方形有机玻璃制成,长、宽、高分别为 10 cm、10 cm 和 20 cm,试验开始前按设置土柱高度及密度分层填充(每 2 cm 为 1 层),土柱底部充填粒径小于或等于 2 mm 的细沙做反滤层,用以防止试验过程中土体随渗出液流出。试验开始时用马氏瓶控制土柱表面的沼液入渗水头,使其形成稳定水头下的沼液入渗状态,并在土柱底部用烧杯收集渗出液,为保证指标测定需要,每次渗出液收集量为 30 mL,同时用上海雷磁 DDS-11A 型电导率仪测定不同时刻渗出液电导率,待渗出液的电导率与

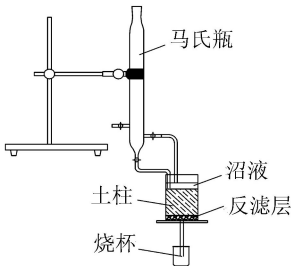


图 1 试验装置

入渗液电导率基本相等时试验结束。渗出液中的全氮含量采用凯式定氮法测定^[18]。整个试验在温度相对恒定的条件下进行(18℃±2℃),每组试验重复3次,取平均值作为试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 渗出液电导率变化规律

由表2可知,试验用不同配比的沼液电导率差异较大。图2为不同土壤密度下渗出液电导率变化曲线,可以看出,不同试验方案下渗出液电导率随时间变化规律基本一致,均呈现先上升后下降并逐渐趋于平缓的变化规律;同一沼液浓度及入渗水头条件下,密度为1.30 g/cm³的土壤渗出液电导率变化曲线较密度为1.25 g/cm³的曲线明显向右偏移,且密度为1.30 g/cm³的土壤渗出液电导率峰值点均小于密度为1.25 g/cm³的峰值点;同一土壤密度及入渗水头条件下,峰值点后渗出液电导率(第3个数据点)与峰值点(第2个数据点)差值随沼液浓度的增大而增大,且同一土壤密度及入渗水头条件下,随沼液浓度的增大,渗出液与入渗液电导率达到基本相同的时间越长。可见渗出液电导率变化规律受沼液浓度和土壤密度的双重影响。

2.2 土壤密度、入渗水头及沼液浓度变化对溶质运移吸附特征的影响

图3为不同土壤密度及入渗水头条件下全氮吸附曲线,图中C/C₀为渗出液中全氮的相对浓度(C

为渗出液全氮浓度,C₀为入渗液全氮浓度)。由图3可知,不同试验方案下沼液中全氮吸附曲线均呈现渗出液全氮相对浓度开始较大、随后急剧下降再缓慢上升最后趋于平缓的变化规律;相同沼液浓度及入渗水头条件下,初始阶段密度为1.25 g/cm³的土壤渗出液相对浓度较密度为1.30 g/cm³的下降明显,且密度为1.25 g/cm³的土柱对全氮吸收达到饱和值所需时间均小于密度为1.30 g/cm³的所需时间。说明在初始阶段的运移过程中发生了优先流,土壤中溶质随优先流快速运动,导致渗出液浓度较高,且土壤密度越小,优先流问题越明显;随试验进程渗出液中全氮的相对浓度下降到最低点后逐渐增大,出现拐点,拐点后全氮的渗出液相对浓度迅速增大,表明氮元素与土壤的反应达到土柱末端,拐点对应的的时间称为全氮运移吸附转折点对应时间,由表4可知密度为1.25 g/cm³的土壤全氮运移吸附转折点对应时间(曲线第2个点对应时间)明显早于密度为1.30 g/cm³的土壤全氮运移吸附转折点对应时间(曲线第2个点对应时间);同时试验结果还表明,相同沼液浓度及土壤密度条件下,4 cm水头渗出液全氮相对浓度高于2 cm水头的渗出液全氮相对浓度,但其土壤对氮吸附达到饱和所需时间则是2 cm水头的大,说明入渗水头的增大会引起入渗界面压力增大,从而导致入渗系数增大。对比图3中(a)(b)(c)可知,随着沼液浓度的增大,吸附曲线逐渐向右偏移,全氮运移吸附转折点对应时间随沼

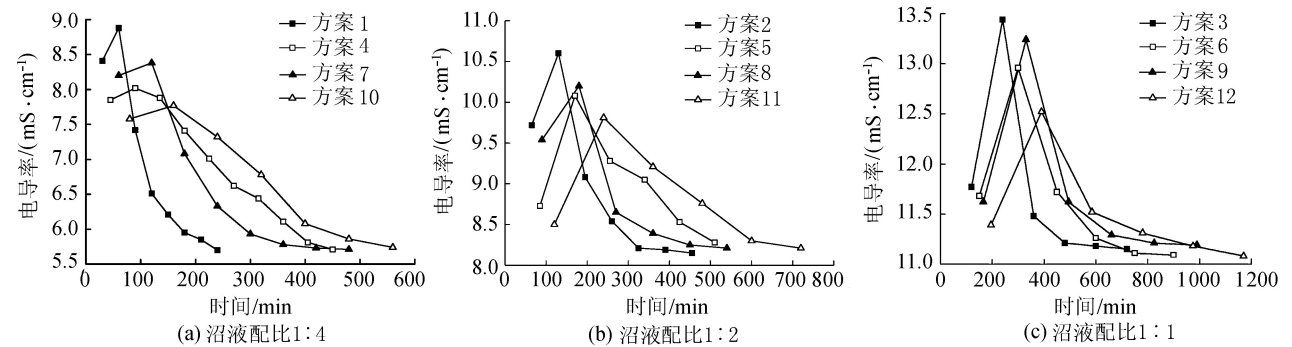


图2 不同方案下渗出液电导率变化曲线

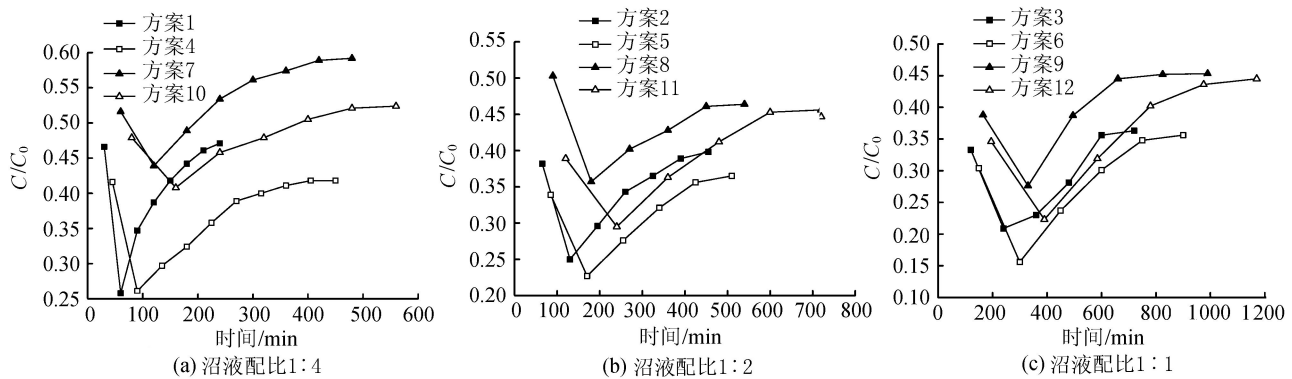


图3 不同土壤密度及入渗水头条件下全氮吸附曲线

液浓度的增大而增长,且吸附转折点渗出液全氮相对浓度随浓度的增大而减小;在曲线几乎趋于平缓时,配比 1 : 4 溶液的渗出液全氮相对浓度值最大,1 : 1 溶液的最小。

表 4 不同试验方案全氮运移吸附转折点对应时间

试验方案	全氮运移吸附转折点 对应时间/min	试验方案	全氮运移吸附转折点 对应时间/min
1	61±3	7	118±2
2	128±6	8	180±3
3	228±9	9	328±6
4	93±3	10	162±2
5	170±6	11	242±4
6	300±10	12	362±8

土柱截获量 H 是反应溶质运移特性的重要参数,计算公式^[19]为

$$H = \int_0^t (1 - C/C_0) dT \tag{1}$$

式中: C 为渗出液全氮浓度; C_0 为入渗液全氮浓度; t 为入渗结束时间。由定义可知, H 为流入土柱的溶质在土柱中被截获的总量。本试验中当渗出液电导率与入渗液电导率基本相等时试验结束, t 为土壤对氮元素吸附达到饱和时对应的时间。

由图 3 可知,随着沼液浓度的增大,吸附达平衡所需时间增加,而渗出液浓度逐渐减小,由式(1)可知随着沼液浓度的增大,渗出液与入渗液的比值减小,吸附达平衡所需时间增加,因此被截获在土体中

的全氮含量增加。

2.3 土壤中全氮吸附曲线拟合参数分析

分析一维非饱和垂流条件下土壤溶质运移规律及参数,可以从机理方面了解溶质运移的本质,而利用 CXTFIT2.0 软件可以更好地分析不同条件下土壤溶质的运移参数。CXTFIT2.0 软件是基于土壤溶质运移的对流-弥散方程(CDE)及其初始和边界值,利用最小二乘拟合原理,求解包括线性平衡吸附、非线性平衡吸附、2 点/2 区(动点与不动点或动水区与不动水区)等考虑初始值及边界值因素的土壤溶质运移模型参数^[20-21]。图 4 为不同试验方案下全氮实测值与拟合吸附曲线。

根据试验的初始值和边界条件,选用传统的对流弥散模型及 CXTFIT2.0 软件求解运移参数,即用实测值代入选定模型,计算全氮运移吸附曲线,再与实测值进行对比,利用非线性最小二乘法逼近,获得各运移参数最佳拟合值,结果见表 5。由表 5 可知,拟合值与实测值的剩余平方和(SSQ)均远小于 1,说明拟合结果可靠;同一土壤密度及入渗水头条件下,随沼液浓度的增大,全氮平均孔隙水流速减小,水动力弥散度减小;同一沼液浓度及土壤密度条件下,4 cm 水头的全氮平均孔隙水流速及水动力弥散度均大于 2 cm 水头的相应值;同一沼液浓度及入渗水头条件下,密度为 1.30 g/cm³ 的土壤全氮平均孔

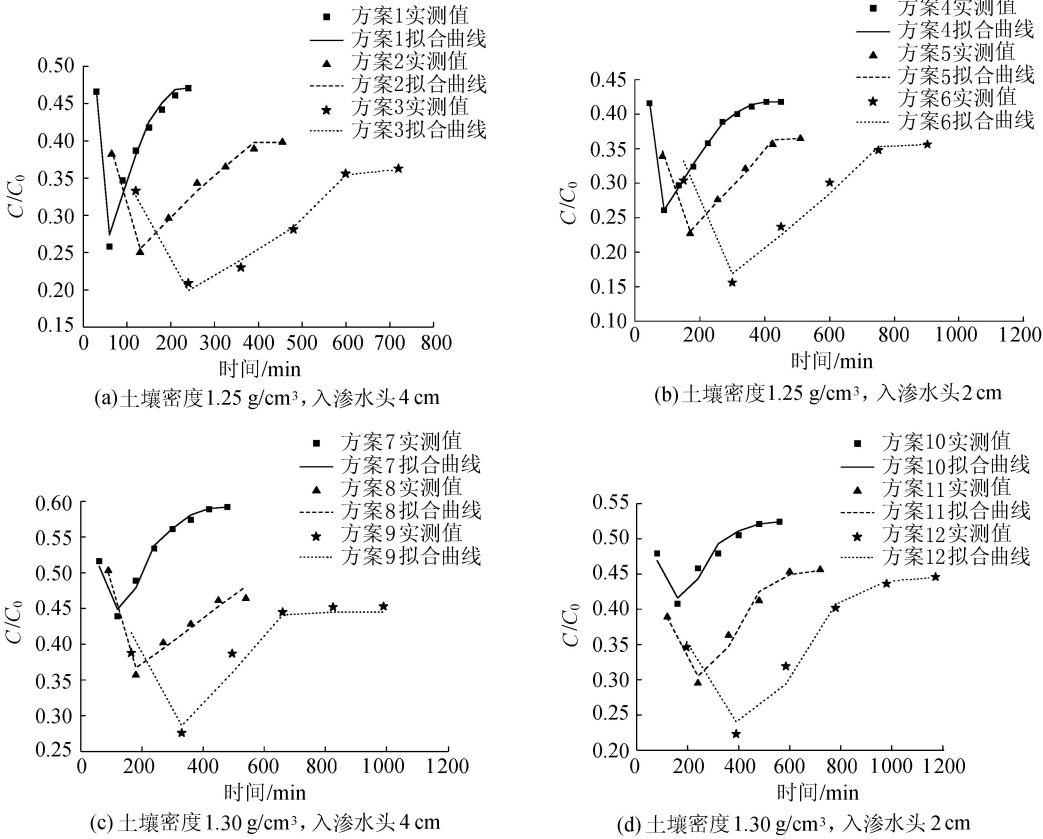


图 4 不同试验方案全氮实测值与拟合吸附曲线

隙水流速均小于密度为 1.25 g/cm³ 的土壤全氮平均孔隙水流速,而密度为 1.30 g/cm³ 的土壤全氮水动力弥散度均大于密度为 1.25 g/cm³ 的土壤全氮水动力弥散度。

表 5 不同试验方案全氮运移参数

试验方案	平均孔隙水流速/ (10 ⁻² cm · h ⁻¹)	水动力弥散度/ (cm ² · h ⁻¹)	SSQ/10 ⁻⁴
1	3.84	3.96	14.3
2	1.83	3.21	33.9
3	1.33	2.99	45.7
4	1.93	2.52	1.1
5	1.67	1.78	18.5
6	1.15	1.28	25.3
7	1.41	5.09	43.6
8	1.17	3.52	63.2
9	0.88	3.08	31.8
10	1.19	4.74	8.7
11	1.05	3.39	62.8
12	0.83	1.43	16.8

2.4 讨论

研究表明影响土壤溶液电导率的主要因素是土壤全盐量、土壤质地及含水量,而土壤有机质含量对土壤溶液电导率影响不明显^[22],且随盐溶液浓度的增大,电导率增大^[23]。但相关研究都未考虑溶液入渗过程中被非饱和土壤吸附后电导率的变化情况。本研究对不同试验方案土体渗出液电导率的试验结果表明,渗出液电导率均呈现先上升后下降并最终趋于平缓的变化规律。在本试验研究过程中采用的土壤为含水率相同的均质土壤,说明初始阶段电导率的上升,是土壤中的盐分被不同浓度入渗沼液带出所形成的,进一步表明土壤中盐分是引起初始阶段渗出液电导率变化的重要影响因子。而峰值点后沼液与土壤的反应到达土柱末端,土壤对沼液中全氮开始吸附,渗出液的电导率逐渐下降,并最终趋于平缓,表明土壤对全氮的降解吸附达到饱和。

本试验不同试验方案渗出液全氮相对浓度(C/C₀)呈初始较大、随后下降再缓慢上升的变化规律。初步分析其形成原因是:试验土柱在试验过程中存在溶质优先运移现象,若无优先流的存在,溶质运移的吸附曲线应该是一条一直缓慢上升的曲线,随时间的推移,最终达到溶质的原始浓度。这与肖自荣等^[24]采用恒定水头法研究考马斯亮蓝在土壤中的运移规律所得结果相似;同时,吕家珑等^[19]对磷运移的研究表明,当最终渗出液全氮相对浓度C/C₀=1时,磷元素与土壤间发生了强烈反应。而本试验中最终渗出液全氮相对浓度C/C₀<1,说明试验过程中土壤与氮元素也发生了一定程度的反应。

李志明等^[15-16]研究表明,随土壤密度增大土壤饱和导水率逐渐降低,而水动力弥散度和对应的全

氮运移吸附转折点出现时间逐渐增加。崔引娣^[25]研究表明溶液浓度大小对平均孔隙水流速及水动力弥散度都有很大影响。本文试验结果表明,土壤密度、沼液浓度及入渗水头均是影响全氮运移吸附转折点的重要因素。采用 CXTFIT 2.0 软件的模拟结果则表明,土壤密度、沼液浓度及入渗水头是影响全氮平均孔隙水流速及水动力弥散度的重要因子。

3 结 论

a. 不同试验方案渗出液电导率变化均呈现先上升后下降并逐渐趋于平缓的规律;密度为 1.30 g/cm³ 的土壤渗出液电导率变化曲线较密度为 1.25 g/cm³ 的曲线明显向右偏移,且密度为 1.30 g/cm³ 的土壤渗出液电导率峰值点均小于密度为 1.25 g/cm³ 的峰值点;峰值点后渗出液的电导率与峰值点差值随沼液配比的增大而增大。

b. 不同试验方案沼液中全氮吸附曲线变化规律表现为初始阶段渗出液相对浓度较大,随后急剧下降再缓慢上升最后趋于平缓;初始阶段密度为 1.25 g/cm³ 的土壤渗出液相对浓度较密度为 1.30 g/cm³ 的下降明显,且密度为 1.25 g/cm³ 的土柱对沼液中全氮吸收达到饱和值所需时间均小于密度为 1.30 g/cm³ 的所需时间;随着沼液浓度的增大,吸附曲线逐渐向右偏移;全氮运移吸附转折点对应时间随沼液浓度及土壤密度的增大而增加,而吸附转折点渗出液全氮相对浓度随沼液浓度的增加而减小;4 cm 水头渗出液全氮相对浓度高于 2 cm 水头渗入液的全氮相对浓度,但土壤对全氮吸附达到饱和和所需时间则是 2 cm 水头的大。

c. 采用 CXTFIT 2.0 软件模拟沼液中全氮所得吸附曲线与实测值有很好的 consistency;随沼液浓度的增大,全氮平均孔隙水流速及水动力弥散度均减小;4 cm 水头的全氮平均孔隙水流速及水动力弥散度均大于 2 cm 水头的相应值;密度为 1.30 g/cm³ 的土壤全氮平均孔隙水流速小于密度为 1.25 g/cm³ 的土壤全氮平均孔隙水流速,但水动力弥散度则相反。

参考文献:

[1] 刘文科,杨其长,王顺清. 沼液在蔬菜上的应用及其土壤质量效应[J]. 中国沼气,2009,27(1):43-46. (LIU Wenke, YANG Qichang, WANG Shunqing. A review on effect of biogas slurry on vegetables and soil[J]. China Biogas,2009,27(1):43-46. (in Chinese))
[2] 李友强,盛康,彭思姣,等. 沼液施用量对小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 中国农学通报,2014(12):181-186. (LI Youqiang, SHENG Kang, PENG Sijiao, et al. Effects of biogas slurry on wheat yield and the physical

- and chemical properties of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014(12):181-186. (in Chinese))
- [3] 赵莉, 于建光, 常志州, 等. 施用沼液对水芹产量及品质的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1):94-99. (ZHAO Li, YU Janguang, CHANG Zhizhou, et al. Effect of biogas slurry on the growth and quality of oenanthe javanica[J]. Soil, 2014, 46(1):94-99. (in Chinese))
- [4] 张璘玮, 伍钧, 杨刚, 等. 猪粪沼液连续定位施用对油菜产量及菜籽品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):562-568. (ZHANG Linwei, WU Jun, YANG Gang, et al. Effects of continuous applications of digested pig biogas slurry on brassica napus yields and rapeseed quality[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3):562-568. (in Chinese))
- [5] 吴红, 韩大勇, 张衡锋, 等. 沼液施用量对园林树木生长和土壤养分含量影响[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(3):77-81. (WU Hong, HAN Dayong, ZHANG Hengfeng, et al. Effects of slurry on growth and soil nutrient content of garden tree[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2013, 37(3):77-81. (in Chinese))
- [6] 叶旭君, 王兆骞, 李胜. 以沼气工程为纽带的生态农业工程模式及效益分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2):93-96. (YE Xujun, WANG Zhaoqian, LI Sheng. Biogas project linked eco-agricultural engineering model and its benefit analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(2):93-96. (in Chinese))
- [7] 李铁, 刘庆玉, 张玉龙, 等. 沼肥对保护土壤酶及其呼吸强度的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007(5):44-47. (LI Tie, LIU Qingyu, ZHANG Yulong, et al. Study on effects of biogas fertilizer on soil enzyme and respiration intensity in protected field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007(5):44-47. (in Chinese))
- [8] MATSUNAKA T, SAWAMOTO T, ISHIMURA H, et al. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland[J]. International Congress Series, 2006, 1293:242-252.
- [9] KUMAR A, SINGHAL S K, SINGH V, et al. Impact of rock-phosphate enriched pressmud and biogas slurry on yield, phosphorus nutrition and utilization by soybean (Glycine max) in a typic haplustept[J]. Legume Research, 2013, 36(1):79-83.
- [10] BOHART G S, ADAMS E Q. Some aspects of the behavior of charcoal with respect to chlorine[J]. Journal of the American Chemical Society, 1920, 42(3):523-544.
- [11] SINGH S K. Estimating dispersivity and injected mass from adsorption curve due to instantaneous source[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3):685-691.
- [12] YOON H, HYUN Y, LEE K K. Forecasting solute adsorption curves through the unsaturated zone using artificial neural networks[J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(1):68-77.
- [13] PAN B C, MENG F W, CHEN X Q, et al. Application of an effective method in predicting adsorption curves of fixed-bed adsorption onto resin adsorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 124(1):74-80.
- [14] 孙慧敏, 王益权. 土壤团聚状态对 Cl^- 运移规律的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3):180-183. (SUN Huimin, WANG Yiquan. Effect of aggregates on the transports of Cl^- [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3):180-183. (in Chinese))
- [15] 李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤密度对红壤土水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5):101-103. (LI Zhiming, ZHOU Qing, WANG Hui, et al. Influence of bulk density on the characteristic of water solute transport in red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5):101-103. (in Chinese))
- [16] 吕殿青, 王宏, 潘云, 等. 密度变化对土壤溶质运移特征的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2010, 33(1):75-79. (LÜ Dianqing, WANG Hong, PAN Yun, et al. Effect of bulk density change on soil solute transport characteristics[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2010, 33(1):75-79. (in Chinese))
- [17] 杨艳, 王全九, 樊军, 等. 利用同一土柱测定土壤水分和保守性溶质运移参数[J]. 水利学报, 2007, 38(1):120-125. (YANG Yan, WANG Quanju, FAN Jun, et al. Method for determining soil water and solute transport parameters using one soil column [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1):120-125. (in Chinese))
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:49-60.
- [19] 吕家珑, 张一平, 张君常, 等. 土壤磷运移研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(1):75-81. (LÜ Jialong, ZHANG Yiping, ZHANG Junchang, et al. Studies on phosphorus transport in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(1):75-81. (in Chinese))
- [20] 马北燕, 张一平. BTC 确定运移参数的方法[J]. 植物营养与肥料学报, 1997(3):72-80. (MA Beiyan, ZHANG Yiping. Method of BTC determination for transport parameters [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997(3):72-80. (in Chinese))
- [21] 陈静, 黄冠华, 黄权中. 一维均值与非均质土柱溶质迁移的分数微分对流-弥散模拟[J]. 水科学进展, 2006, 17(3):299-304. (CHEN Jing, HUANG Guanhua, HUANG Quanzhong. Simulation of one-dimensional solute transport in homogeneous and heterogeneous soils with scale-dependent fractional advection-dispersion equation [J]. Advance Water Science, 2006, 17(3):299-304. (in Chinese))

(下转第 25 页)

3 结 论

- a. 随着射流孔距的增大,第 1 个射流对后面射流的遮挡作用减小,两射流孔间横向有效流速的最大值与横流流速的比值 U_{i0}/U_a 增大,使横流对第 2 个射流的作用增大。
- b. 射流的速度场等值线会产生一定程度的分叉,射流孔间距较小时,分叉在两射流合并后出现。射流孔间距较大时,分叉在第 1 个射流后出现。射流孔间距越小,两股水流的掺混作用越剧烈,合并后表现出单孔射流的流动特性。
- c. 不同射流孔间距下,第 1 个射流浓度轨迹线基本一致,第 2 个射流在射流近区其无量纲浓度轨迹线与下游距离呈指数 $1/2$ 的关系,与射流孔间距呈 -0.27 的指数关系;在射流远区,无量纲浓度轨迹线与下游距离呈 $1/3$ 指数关系,与射流孔间距呈 -0.18 的指数关系。
- d. 不同射流孔间距下第 1 个射流的稀释效果基本相同;对于第 2 个射流,射流孔间距越小,污染物浓度沿水流方向衰减速率越快, $x'/D>8$ 后,浓度变化趋于一致。

参考文献:

[1] YU D, ALI M S, LEE J H W. Multiple tandem jets in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(9): 971-982.

[2] 肖洋,雷鸣,李开杰,等. 横流中多孔射流流动特性试验研究 [J]. 水科学进展, 2012, 23 (3): 390-395. (XIAO Yang, LEI Ming, LI Kaijie, et al. An experimental study on hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 390-395. (in Chinese))

[3] 肖洋,唐洪武,阿依丁别克居马拜. 横流中多孔射流的稀释特性试验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(5): 35-39. (XIAO Yang, TANG Hongwu, AYIDEN.

Experiments on the scalar concentration field of a multiple jet group in cross-flow [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(5): 35-39. (in Chinese))

[4] LI Zhiwei, HUAI Wenxin, QIAN Zhongdong. Study on the flow field and concentration characteristics of the multiple tandem jets in crossflow [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55: 2778-2788.

[5] XIAO Yang, TANG Hongwu. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 806-813.

[6] 李少华,袁斌,刘利献,等. 多孔横向紊动射流涡量场的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 100-104. (LI Shaohua, YUAN Bin, LIU Lixian, et al. Numerical investigation on the vortices of multiple turbulent jet in crossflow [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electronical Engineering, 2007, 27(23): 100-104. (in Chinese))

[7] 卢晓江,刘海舰,阳相. 射流喷头孔间距对射流特性影响的数值模拟[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(5): 47-51. (LU Xiaojiang, LIU Haijian, YANG Xiang. Numerical simulation on the influence of the characteristics of the jet of different spacing of multi-hole nozzles [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2011, 26(5): 47-51. (in Chinese))

[8] 方神光,黄胜伟,崔丽琴. 流动环境中高浓度射流的三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 17-21. (FANG Shengguang, HUANG Shengwei, CUI Liqin. Three-dimensional numerical simulation of high-concentration jets in flowing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2010, 30(4): 17-21. (in Chinese))

[9] 汪德燿. 计算水动力学理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[10] van DOORMAAL J P, RAITHBY G D. Enhancement of the simple method for predicting incompressible fluid flows [J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7(2): 147-163. (收稿日期:2015-12-21 编辑:骆超)

(上接第 15 页)

[22] 林义成,丁能飞,傅庆林,等. 土壤溶液电导率的测定及相关因素分析[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 83-86. (LIN Yicheng, DING Nengfei, FU Qinglin, et al. The measurement of electric conductivity in soil solution of analysis of its correlative factors [J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2005, 17(2): 83-86.

[23] 陈丽梅,程敏熙,肖晓芳,等. 盐溶液电导率与浓度和温度的关系测量[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 39-42. (LI Limei, CHEGN Meixi, XIAO Xiaofang, et al. Measurement of the relationship between conductivity of salt solution and concentrati on and temperature [J].

Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(5): 39-42. (in Chinese))

[24] 肖自荣,张由松,牛健值,等. 鹭峰国家森林公园土壤溶质运移特征研究[J]. 湖南农业科学, 2011(15): 63-66. (XIAO Zixing, ZHANG Yousong, NIU Jianzhi, et al. Characteristics of soil solute transport in Jiufeng National Forestry Park [J]. Hunan Agricultural Science, 2011(15): 63-66. (in Chinese))

[25] 崔引娣. 均值非均值饱和土壤溶质运移吸附曲线的比较分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009. (收稿日期:2015-04-10 编辑:熊水斌)