

N在污泥改良沙化土壤中迁移转化规律

黄殿男¹,陈明明¹,焦美怡¹,张媛丽²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 国电东北环保产业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110014)

摘要 目的 研究泥-沙复合介质作为沙土表层土壤时 N 在复合介质中的迁移转化规律。**方法** 利用掺混比为 20 % 的污泥与沙土混合作为表层土壤改良沙土,采用饱和淋洗的方式,测定恒定降雨强度淋洗后改良土壤淋洗液及各土层中 pH、COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 的质量浓度。**结果** 7 次淋洗试验结束后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 淋出质量分别为: 336.56 mg、1 042.51 mg、7.54 mg、1 386.61 mg。淋洗液中不同形态氮素质量与总投加量相比, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 淋出率分别为 1.25%、3.63%、0.5%、2.42%。各土层不同形态氮素质量浓度变化显示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在试验初期较易淋出, 试验后期吸附于土壤或向其他形态转化。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度在试验后期远大于试验初期, 且有持续性增高的风险。**结论** 以 20% 比例掺混的复合介质与原始沙土相比能够起到改良沙化土壤的作用。20~30 cm 土层内部氮素的质量浓度相对较高, 受土壤酸化影响小, 为适宜种植土层。

关键词 脱水污泥;沙化土壤;迁移分布;富集规律;转化特性

中图分类号 TU992.3;X53 文献标志码 A

Migration and Transformation of Nitrogen in Sludge-improved Desertified Soil

HUANG Diannan¹, CHEN Mingming¹, JIAO Meiyi¹, ZHANG Yuanli²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; State Grid Northeast Environmental Protection Industry Group Co., Ltd., Shenyang, China, 110014)

Abstract: In order to examine the migration and transformation of N into the composite medium when the mud-sand composite medium is used as the surface soil of the sandy soil, a 20% blended sludge and sandy soil used as the surface soil. The mass concentration of pH, COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in the improved soil leaching solution and in each soil layer were determined after constant rainfall intensity leaching. After 7 rinse tests, the leaching losses of $\text{NH}_4^+\text{-N}$,

NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 TN 分别为 336.56 mg、1 042.51 mg、7.54 mg 和 1 386.61 mg。Compared with the total dosage, the leaching rate of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N and TN in the eluent were 1.25%、3.63%、0.5% and 2.42%。This show that NH_4^+ -N was easily leached at the early stage, and was adsorbed to the soil or transformed into other forms at the later stage of the test. The concentration of NO_3^- -N and NO_2^- -N in the later stage of the test is much greater than the initial stage of the test, and has a risk of continuous increase. Compared with the original sandy soil, the composite medium mixed at a ratio of 20% can improve the sandy soil. 20 ~ 30 cm soil layer has higher content of nitrogen, which is less affected by soil acidification and can be used as the best planting soil layer.

Key words: dewatered sludge; desertified soil; migrtion and distribution; enrichment regularity; transformation characteristics

城市污泥含水率高,营养物质丰富,污泥土地利用是实现污泥资源化利用重要方式之一。将污泥用于沙化土壤改良,可提高其营养元素与有机质质量浓度,有利于沙化土壤修复^[1-7]。课题组前期已对污泥改良沙土过程中,泥-沙复合介质最佳掺混比、最佳保水层以及重金属与营养元素迁移转化开展了相关研究^[8-10]。但是对泥-沙复合介质中 N 迁移转化规律研究并不深入,探究不同形态 N 在复合介质和淋洗液中的迁移转化规律有利于沙化土壤改良工程淋出风险控制和保氮固氮。泥-沙复合介质中氮素主要以 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 以及 NO_2^- -N 形式存在,且土壤中氮素的迁移转化主要通过淋溶、硝化以及反硝化作用实现。K. Hentschel^[11]认为森林土壤经干湿反复循环,其中 NH_4^+ -N 减少 47% ~ 60%, NO_3^- -N 减少 76% ~ 85%,说明 NO_3^- -N 更易发生淋失。O. Oladeji 等^[12]研究了将污泥长期施用于矿区修复地的地下水含氮情况,发现 NO_3^- -N 容易淋失,地下水中 NO_3^- -N 质量浓度增加。K. Dodla, 陆松柳^[13-16]等研究发现由于有机质对微生物的影响,硝化反应与反硝化反应中 C/N 成为限制硝化反应速率重要

因素。傅金祥等^[17]研究发现土壤反硝化反应适宜 pH 为 6.0 ~ 8.0。笔者采用污泥和沙土掺混比为 20% 的复合土壤作为改良沙土,通过模拟恒定降雨强度的土柱淋溶试验,分析淋洗液及各土层中不同形态 N 质量浓度的时空变化特征,揭示氮在污泥改良沙土系统中的迁移转化规律,计算 TN 及不同形态氮淋失质量。为工程应用过程中污泥施配周期等关键参数的选控提供理论支撑。

1 试 验

1.1 试验材料

试验污泥取自沈阳北部污水处理厂污泥处理车间。取回当日测污泥 pH 值,将污泥样品置于实验室 4 ℃ 低温保存。试验沙土取自辽宁省彰武县章古台镇 0 ~ 50 cm 土层风蚀沙漠化土壤,按土层深度将沙土编号:1# (0 ~ 10 cm)、2# (10 ~ 20 cm)、3# (20 ~ 30 cm)、4# (30 ~ 40 cm) 和 5# (40 ~ 50 cm)。取回当日测 pH 值、孔隙率等指标,另取适量沙土样品在避光处,自然风干后剔除其中碎石块等杂物,用研钵磨碎过筛。测定沙土和污泥的指标如表 1 所示。

表 1 沙土与污泥基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of sandy soil and sludge

理化指标	pH	w(NH_4^+ -N)/%	w(NO_3^- -N)/%	w(NO_2^- -N)/%	孔隙率/%
沙土	7.8	0.10	0.32	0.01	43.61
污泥	7.5	1.76	1.01	0.09	—

1.2 试验装置与方法

试验在室内封闭条件下进行模拟,室内温度恒定(10 ℃)。试验装置为直径 20 cm、高 60 cm 有机玻璃柱,壁厚 1 cm。在柱上纵向设置 5 个内径 5.5 cm 圆孔作为土壤溶液取样器,各圆孔圆心相距 10 cm。桶底面有数个直径 2 cm 的渗水孔,保证水分自由下渗(见图 1)。

污泥与沙土按照 20% 掺比均匀混合后所得复合介质作为模拟土柱 1#、2#的浅层土壤,沙土作为 3#、4#、5#土层填充土壤,按照由下向上的顺序进行压实均匀装填,每层土壤厚度为 10 cm。柱上方设置直径为 20 cm 圆形模拟降雨盘,降雨盘通过聚氯乙烯管与水箱、流量控制器、水泵等设备连接,形成模拟淋洗系统。为避免非污泥源氮素引入,采用去离子水模拟降雨,通过饱和淋洗方式模拟降水条件下氮素在土层中的迁移转化规律和淋出质量。

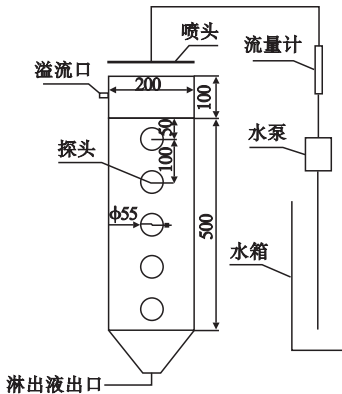


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

将降雨参数设定为^[9]:降雨强度 48 mm/h,降雨总量 2 L。7 个淋洗周期内,测定淋洗液中氮素质量浓度、pH 和 COD 等指标变化情况。淋洗试验结束 2 h 后,采用土壤采样器分层采集各土层样品,测定各土层中氮素和 pH 等指标变化,分析复合介质作为表层土壤改良沙土过程中的氮素分布规律。

1.3 分析方法

试验各指标分析方法如表 2 所示。

表 2 各指标分析方法

Table 2 Analysis method for each index

指标	分析方法	
	淋出液与土壤溶液	土样(污泥)
pH	pH 计法	pH 计法
COD	快速密闭分光光度法	灼烧称重法
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	纳氏试剂光度法	KCl 浸提-分光光度法
$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	紫外分光光度法	KCl 浸提-分光光度法
$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$	N-(1-萘基)-乙二胺光度法	KCl 浸提-分光光度法
$\rho(\text{TN})$	过硫酸钾氧化紫外分光光度法	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
淋出质量	7 次淋洗氮素淋出质量累加值	—

1.4 试验结果统计与分析

试验结果利用 Excel 2010 进行整理、计算及统计;利用 Excel 2010、Origin 9.1 进行图形绘制;利用 IBM SPSS S19.0 进行数值分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 氮素在淋洗液中的淋出特性

2.1.1 不同形态氮在淋洗液中动态变化规律

淋洗试验过程中不同形态 N 质量浓度变化趋势如图 2 所示。

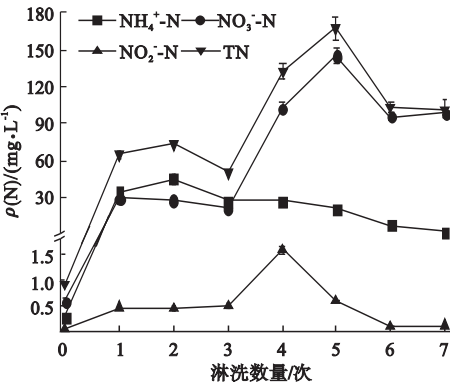


图 2 土壤中不同形态 N 淋出规律

Fig. 2 Leaching of N with different forms in soil

4种形态N在淋洗液质量浓度从高到低顺序为:TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N。淋洗液中 NO_3^- -N质量浓度在第3次淋洗最低为21.76 mg/L,第5次淋洗后达到最高144.90 mg/L,随后稳定在95~100 mg/L。TN质量浓度在第3次淋洗达到最低值50.28 mg/L,第5次淋洗时达到峰值166.90 mg/L,随后稳定在101~104 mg/L,与 NO_3^- -N质量浓度变化趋势相似。对TN与 NO_3^- -N进行相关性分析,两者呈现显著正相关($P<0.01$)。说明泥沙掺混的复合介质中,氮素在复合介质中主要以 NO_3^- -N形式淋出,这与李霞等^[18]的研究结果一致。沙土疏松的结构与氧气接触充分使土壤中氮素发生持续的硝化反应,将 NH_4^+ -N转化为 NO_3^- -N,淋洗液中 NO_3^- -N质量浓度逐渐增加。试验后期TN与 NO_3^- -N质量浓度均有所降低,但仍保持较高水平,说明污泥施用使复合介质中氮素具有持续性的淋出风险。

7次淋洗过程中, NH_4^+ -N空白淋洗液 NH_4^+ -N质量浓度为0.28 mg/L,第2次淋洗达最高值45.11 mg/L,而后每次淋洗液中 NH_4^+ -N质量浓度不断降低,第7次淋洗达到最低值2.94 mg/L,高出空白淋洗液2.66 mg/L,导致 NH_4^+ -N淋洗液质量浓度降低原因有两方面:一是土壤中发生硝化反应使 NH_4^+ -N转化为N的其他形态;二是由于 NH_4^+ -N带正电荷,复合介质中部分 NH_4^+ -N被土壤颗粒吸附不易淋出,因此与 NO_3^- -N、 NO_2^- -N相比, NH_4^+ -N淋出风险较低。

淋洗液 NO_2^- -N前3次淋洗其质量浓度在0.44~0.49 mg/L,第4次淋洗后突然增至最大值1.57 mg/L,而后每次淋出液质量浓度不断降低,最后达到0.11 mg/L,仅略高于空白淋洗液。使 NO_2^- -N质量浓度突增原因在于随淋洗液中TN、 NO_3^- -N质量浓度的增加,底层土壤环境近似缺氧状态,硝化反应速率降低使 NO_2^- -N累积并随淋洗液流出。

对COD与 NO_2^- -N、COD与pH相关性分析发现,淋洗液COD与 NO_2^- -N表现为显著正相关($P<0.01$),COD与pH表现为显著负相关($P<0.01$)。COD与 NO_2^- -N同在第4次淋洗达到最高值54.45 mg/L。pH在第2次淋洗后持续降低,第5次淋洗达到最低值7.3(见图3)。说明此时复合介质内有机物在微生物作用下发生水解酸化反应转化为小分子酸性有机物^[19-20]。前3次C/N较低,硝化反应正常进行,而第4次以后随有机物质量浓度的增加,硝化反应中 NO_2^- -N氧化为 NO_3^- -N的速度减慢,引起亚硝态氮累积,使 NO_2^- -N质量浓度增加^[21],水解酸化反应停止后质量浓度逐渐降低。

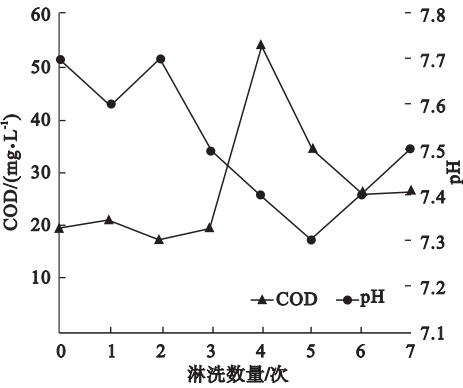


图3 土壤中pH、COD淋出规律

Fig.3 Leaching of pH and COD in soil

2.1.2 不同形态氮淋出特征

污泥改良沙土试验中复合介质在模拟降雨条件下,氮素可随淋洗液向下迁移并流出。为进一步探明氮素在模拟降雨条件下复合介质淋出液中N的迁移转化规律与淋出特征,将淋洗液中氮素总质量作为模拟试验淋出质量。

$$L_i = C_i \times V. \tag{1}$$

$$S_n = \sum_{i=1}^n L_i. \tag{2}$$

式中: L_i 为第*i*次淋洗液中不同形态N淋出质量,mg; C_i 为第*i*次淋洗液中不同形态N质量浓度,mg/L; V 为每次淋洗液体积,L; S_n

为 n 次淋洗试验后氮淋出总量,mg。
不同形态氮淋出质量变化如表3所示。

表3 土壤中不同形态 N 淋出质量

Table 3 Leaching quality of N with different forms in soil

淋洗次序	不同形态 N 淋出质量/mg			
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	TN
第 1 次	59.30	70.22	0.94	130.46
第 2 次	56.30	90.23	0.88	147.41
第 3 次	43.51	56.09	0.97	100.57
第 4 次	204.93	55.92	3.14	263.99
第 5 次	289.79	42.83	1.18	333.80
第 6 次	191.46	15.38	0.21	207.06
第 7 次	197.21	5.80	0.22	203.32

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋出总质量约占 TN 淋出质量 75.19%; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 淋出总质量约占 TN 淋出质量的 24.27%; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 淋出总质量约占 TN 淋出质量的 0.54%。按复合介质中氮素质量浓度乘以体积计算 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TN 总投加质量为 27 g、28.7 g、1.51 g、57.21 g, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TN 淋出率为 1.25%、3.63%、0.5%、2.42%。因此, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为氮素的主要淋出形式, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 次之, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 淋出质量微小,

大部分氮素存留土层中,但氮素具有持续性淋出的特点。

2.2 氮素在土层中的迁移转化特性

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 随淋洗次数和剖面迁移转化如图 4 所示。各土层 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度整体呈降低趋势(见图 4(a))。初次淋洗后各土层 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度排序从高到低依次为 4#、5#、3#、2#、1#, 经过 7 次淋洗后各土层 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度从高到低排序为 2#、1#、4#、5#、3#。造成土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度降低原因有两方面:一是随淋洗液流失;二是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在硝化菌作用下氧化生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ [22]。试验初期 4#土壤溶液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度达到 12.08 mg/L,5#土壤溶液中质量浓度为 10.57 mg/L,明显高于表层复合介质,这是因为复合介质中部分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 未全部被吸附于土壤而随水分向下迁移。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度随土壤深度增加而升高(见图 4(b)),7 次淋洗后复合介质 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度仍高于下层土壤,同时结合 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在土壤剖面变化分析,复合介质 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化幅度远低于下层沙土,与张艳的试验结果相似 [23],说明表层复合介质中腐殖质对于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 具有较好的截留作用。

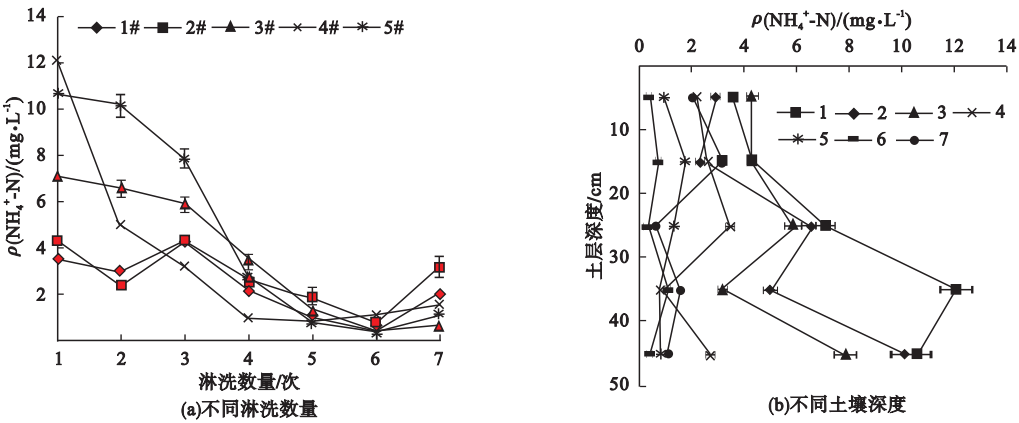


图4 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在不同淋洗数量和不同深度土壤剖面迁移转化

Fig. 4 Migration and transformation of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in different leaching times and different depth soil

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在土层中迁移转化如图 5 所示。图 5(a) 显示从时间变化看随淋洗进行各土层 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度均有不同程度的上升。初次淋洗各土层 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度大小为 5#、4#、1#、2#、3#，7 次淋洗后各土层 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度大小依次为 2#、1#、3#、4#、5#。1#、2# 上升趋势最明显，淋洗 7 次后达到最大值分别为 297.07 mg/L、447.22 mg/L，说明表

层土壤与空气接触充分发生硝化反应产生 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 使土壤溶液质量浓度提高。从图 5(b) 不同深度土壤剖面变化看，仅淋洗初期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度随土层加深呈上升趋势，淋洗中后期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 土壤溶液质量浓度随土层加深而降低，峰值出现在 2#、3#，说明 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 多富集在 2#、3#，并伴有持续增高的风险。

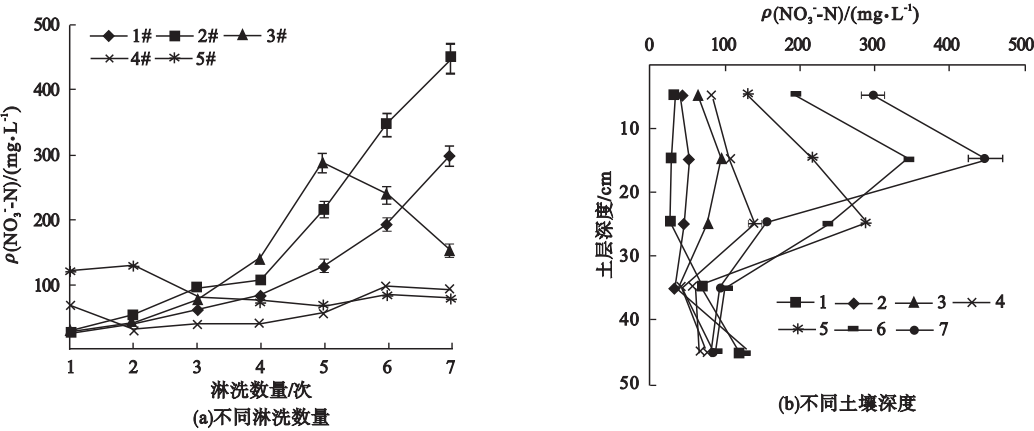


图 5 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在不同淋洗数量和不同深度土壤剖面迁移转化情况

Fig. 5 Migration and transformation of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in different leaching times and different depth soil

与土层中其他形态 N 质量浓度相比， $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度较低(见图 6)。图 6(a) 显示试验初期各土层中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度大小依次为 5#、4#、1#、2#、3#，随试验进行不同土层中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度变化趋势不同。1#、2# 土壤溶液中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度先小幅度下

降而后大幅度上升，3# 土壤溶液中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度前期变化不明显，后期有较明显的上升趋势，4#、5# 土壤溶液 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度逐渐降低。试验结束后各土层 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度从高到低依次为 2#、1#、3#、4#、5#。4#、5# $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 土壤溶液质量浓度在初次淋洗

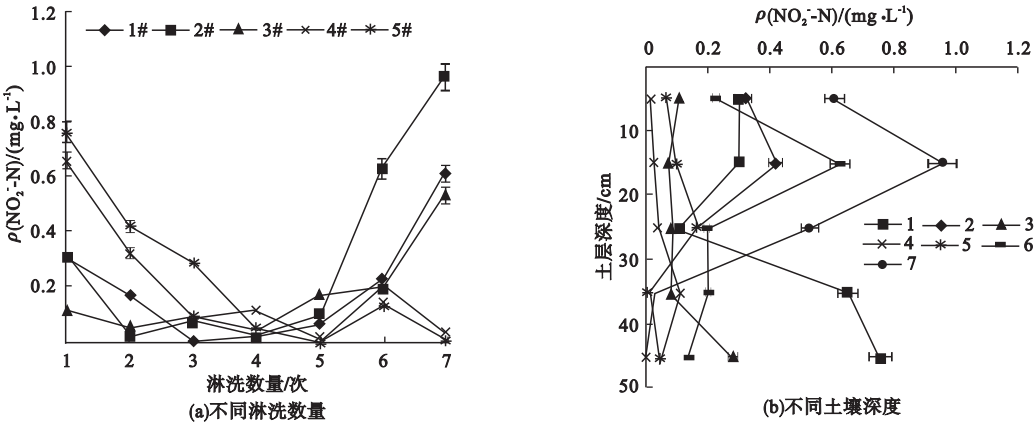


图 6 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 在不同淋洗数量和不同深度土壤剖面迁移转化情况

Fig. 6 Migration and transformation of $\text{NO}_2^- \text{-N}$ in different leaching times and different depth soil

分别达到 0.66 mg/L、0.76 mg/L 的较高水平,这是因为 NO₂⁻-N 的解吸作用使试验初期表层复合介质中 NO₂⁻-N 随淋洗液迁移至下层土壤^[24]。1#、2#复合介质中 NO₂⁻-N 溶液质量浓度在 7 次淋洗后分别达到 0.61mg/L、0.96 mg/L,这是因为表层复合介质氧浓度高,NH₄⁺-N 在硝化菌作用转化为 NO₂⁻-N 溶于土壤溶液。距复合介质较近的 3# 土层受影响 NO₂⁻-N 质量浓度达到 0.53 mg/L。从图 6(b) 看出,NO₂⁻-N 质量浓度峰值主要集中在 2#土层。

3 结 论

(1)以 20% 比例掺混后的泥 - 沙复合介质与原始沙土相比,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 以及 NO₂⁻-N 质量浓度均得到显著提升,说明泥 - 沙复合介质能够改良沙化土壤氮素质量浓度。

(2)随模拟降雨进行,淋洗液氮素质量浓度逐渐减少,NO₃⁻-N 为氮素的主要淋出形式,在氮素总淋出质量中比例为 75.19%; NH₄⁺-N 次之,比例为 24.27%; NO₂⁻-N 淋出质量相对较低,比例为 0.54%。氮素淋出质量与总投加量相比,整体淋出率较低, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN 淋出率为分别 1.25%、3.63%、0.5%、2.42%。

(3)NH₄⁺-N 淋洗初期较易淋出,试验后期吸附于土壤或向其他形态转化。试验后期复合介质中 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 质量浓度高于初始土壤,存在持续性增高的风险。

(4)3#(20 ~ 30 cm) 土层内部氮素的质量浓度相对较高,受土壤酸化影响小,为适宜种植土层。

参考文献

[1] 熊江波,赖发英,李小飞,等. 城市污泥改良沙土的环境影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):300-303.
(XIONG Jiangbo, LAI Faying, LI Xiaofei, et al. Environmental impact of urban sludge

improving sand [J]. Jiangsu agricultural sciences,2018,46(23):300-303.)
[2] 黄殿男,张贺凯,李琳,等. 城市污泥应用于沙漠治理研究现状及建议[J]. 科技创新导报,2018,15(18):153-154.
(HUANG Diannan, ZHANG Hekai, LI lin, et al. Current status and suggestions of research on application of urban sludge in desert control [J]. Science and technology innovation herald, 2018,15(18):153-154.)
[3] LI Qiong, GUO Xueyan, XU Xinghua, et al. Phytoavailability of copper, zinc and cadmium in sewage sludge-amended calcareous soils [J]. Pedosphere,2012,22(2):254-262.
[4] 郭志国,魏永洋,平倩. 城市污泥对沙漠化土壤生态环境影响的研究[J]. 环境与发展,2018,30(10):199-200.
(GUO Zhiguo, WEI Yongyang, PING Qian. Study on the effect of urban sludge on the ecological environment of desertified soil [J]. Environment and development,2018,30(10):199-200.)
[5] 于坤,韦良焕,木合塔尔·艾买提等. 配施城市污泥改良沙化土壤研究初探[J]. 喀什师范学院学报,2015,36(6):49-52.
(Yu Kun, WEI Lianghuan, Muhe Tal Aymatti, et al. Preliminary Study on the Improvement of Desertified Soil by Combined Application of Municipal Sludge [J]. Journal of Kashgar Teachers College,2015,36(6):49-52.)
[6] 华正伟. 城市污泥对风沙土改良及杨树生长的影响[D]. 辽宁大学,2012.
(HUA Zhengwei. Effect of Sewage-sludge on the Aeolian Sandy Soil improvement and Poplar growth [D]. Liaoning University, 2012.)
[7] 徐瑾,王伟. 拉萨污水处理厂污泥对沙化土壤改良效果[J]. 环境工程学报,2018,12(6):1743-1748.
(XU Jin, WANG Wei. Amelioration effect of Lhasa sewage sludge on local desertification soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2018,12(6):1743-1748.)
[8] 黄殿男,李琳,傅金祥,等. 污泥改良沙土中重金属及营养元素的迁移转化[J]. 水土保持研究,2019,26(2):359-365.
(HUANG Diannan, Li lin, FU Jinxiang, et al. Migration and transformation of heavy metals and nutrients in sandy soil ameliorated with sludge [J]. Research of soil and water conservation,2019,26(2):359-365.)
[9] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等. 城市污水厂污泥改良水蚀沙土对地下水风险模拟[J]. 生态学杂志,2017,36(10):2926-2932.
(HUANG Diannan, TAN Jie, FU Jinxiang, et al. Groundwater risk simulation of water erosion sand amended with municipal sewage sludge [J]. Chines journal of ecology,2017,36

- (10):2926-2932.)
- [10] 黄殿男,焦美怡,李琳,等.污泥掺混改良沙土的水分入渗及再分布规律[J].水土保持研究,2020,27(1):189-196.
(HUANG Diannan, JIAO Meiyi, Li lin, et al. Water infiltration and redistribution of improved sand by sludge mixing [J]. Research soil and water conservation, 2020, 27(1): 189-196.)
 - [11] HENTSCHEL K, BORKEN W, MATZNER E. Leaching losses of inorganic N and DOC following repeated drying and wetting of a spruce forest soil [J]. Plant soil, 2007, 300: 21-34.
 - [12] OLADEJO, TIAN Guanglong, COXA, et al. Effect of long-term application of biosolids for mine land reclamation on groundwater chemistry: nutrients and other selected qualities [J]. Journal of environmental quality, 2013, 42(1):94-102.
 - [13] DODLA S K, WANG J J, DELAUNE R D, et al. Denitrification potential and its relation to organic carbon quality in three coastal wetland soils [J]. Science of the total environment, 2018, 407(1):471-480.
 - [14] 陆松柳,张辰,王国华.碳源强化对人工湿地反硝化过程的影响研究[J].环境科学学报, 2011, 31(9):1949-1954.
(LU Songliu, ZHANG Chen, WANG Guohua. Study on the influence of enhanced carbon resource on denitrification in the constructed wetland [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2011, 31(9):1949-1954.)
 - [15] 郑兰香,鞠兴华.温度和C/N比对生物膜反硝化速率的影响[J].工业安全与环保, 2006(10):13-15.
(ZHENG Lanxiang, JU Xinghua. The effect of temperature and C/N ratio on biofilm denitrification rate [J]. Industrial safety and environmental protection, 2006, 32(10): 13-15.)
 - [16] 崔敏,冉炜,沈其荣.水溶性有机质对土壤硝化作用过程的影响[J].生态与农村环境学报, 2006, 22(3):45-50.
(CUI Min, RAN Wei, SHEN Qirong. Effects of dissolved organic matter on nitrification in soil [J]. Journal of ecology and rural environment, 2006, 22(3):45-50.)
 - [17] 傅金祥,韩晋英,齐建华,等.常温下pH对短程硝化反硝化的影响.沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2):316-320.
(FU Jinxiang, HAN Jinying, QI Jianhuan, et al. Study on the shortcut nitrification process under low DO and high pH condition in normal temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 316-320.)
 - [18] 李霞,李法云,荣湘民,等.城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J].水土保持学报, 2013, 27(4):93-102.
(LI Xia, LI Fayun, RONG Xiangmin, et al. Risk and leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in sandy soil amended with sewage sludge [J]. Journal of soil and water conservation, 2013, 27(4):93-102.)
 - [19] 高永青,张晶宇,彭永臻,等. pH值对剩余污泥水解酸化溶出物的影响[J].北京工业大学学报, 2011, 37(1):139-145.
(GAO Yongqing, ZHANG Jingyu, PENG Yongzhen, et al. The characteristics of activated sludge hydrolysis and acidification products at different pH [J]. Journal of Beijing university of technology, 2011, 37(1):139-145.)
 - [20] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤, 2015, 47(2):238-244.
(XU Renkou. Research progresses in soil acidification and Its Control [J]. Soils, 2015, 47(2):238-244.)
 - [21] 鲍俊丹,张妹婷,吴雄平,等.13种土壤硝化过程中亚硝态氮的累积与土壤性质的关系[J].农业环境科学学报, 2009, 28(9):1952-1958.
(BAO Jundan, ZHANG Meiting, WU Xiongping, et al. Soil nitrite accumulation during nitrification and its relationship with soil properties in thirteen soils of China [J]. Journal of agro-environment science, 2009, 28(9):1952-1958.)
 - [22] 谢云,王延华,杨浩.土壤氮素迁移转化研究进展[J].安徽农业科学, 2013, 41(8):3442-3444.
(XIE Yun, WANG Yanhua, YANG Hao. Research progress on transfer and transformation of soil nitrogen [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2013, 41(8):3442-3444.)
 - [23] 张艳,迟宝明,关成尧,等.一次连续降雨过程中氮氮在不同介质中迁移模拟柱实验[J].科学技术与工程, 2015, 15(12):260-264.
(ZHANG Yan, CHI Baoming, GUAN Chengyao, et al. Experimental study on ammonia nitrogen transport in different medium in rainfall process [J]. Science technology and engineering, 2015, 15(12): 260-264.)
 - [24] 曹英兰,刘延锋,徐颖.红壤对三氮吸附-解吸性能实验研究[J].集美大学学报(自然科学版), 2009, 14(3):245-250.
(CAO Yinglan, LIU Yanfeng, XU Ying. Study on the capabilities of three-nitrogen adsorption and sorption in red soil [J]. Journal of Jimei university (natural science), 2009, 14(3): 245-250.)
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)