

DOI: 10.11766/trxb202204060097

丁世杰, 杨文亮, 信秀丽, 张先凤, 朱安宁, 杨娇, 任国翠, 李梦柔. 耕层厚度对潮土中化肥氮素转化的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1688–1699.

DING Shijie, YANG Wenliang, XIN Xiuli, ZHANG Xianfeng, ZHU Anning, YANG Jiao, REN Guocui, LI Mengrou. Effects of Plough Layer Thickness on the Transformation and Fate of Fertilizer Nitrogen in Fluvo-aquic Soils with Different Textures[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1688–1699.

耕层厚度对潮土中化肥氮素转化的影响*

丁世杰^{1, 2}, 杨文亮¹, 信秀丽^{1, 2}, 张先凤¹, 朱安宁^{1, 2†}, 杨娇^{1, 2},
任国翠^{1, 2}, 李梦柔^{1, 2}

(1. 封丘农业生态实验站/土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 耕层厚度是影响土壤肥力的重要因素之一, 但其对潮土中化肥氮素转化的影响尚不清楚。利用田间土柱模拟试验, 采用 ¹⁵N 示踪技术, 探究在不同耕层厚度处理下, 化肥氮在 3 种质地潮土 0~40 cm 土层中有机氮、无机氮与固定态铵库中的动态变化以及作物对化肥氮的吸收利用。结果表明: 耕层厚度显著影响化肥氮在土壤不同氮库中的转化及其在土壤-作物系统中的去向, 且在不同质地潮土中的作用效果一致。在不同质地潮土中, 残留于土壤中的化肥氮 83%以上以有机氮的形式存在, 影响化肥氮的保蓄与供给。增加耕层厚度虽然降低了化肥氮向固定态铵库的转化, 但提高了 0~40 cm 土层中的肥料来源有机氮储量, 尤其是在施肥当季, 耕层厚度 25 cm (PLT-25) 处理下的肥料来源有机氮储量平均较耕层厚度 15 cm (PLT-15) 处理提高 8.9%。增加耕层厚度显著 ($P < 0.05$) 提高了施肥当季与后茬作物生长季内肥料来源无机氮的供给, 在此期间 PLT-25 处理下作物对化肥氮的利用率较 PLT-15 处理提高 8.0%左右, 而化肥氮的当季损失率与累积损失率则较 PLT-15 处理分别降低 12.3%与 9.1%。就土壤质地的角度而言, 砂粒含量高制约着化肥氮向有机氮库的转化, 不利于作物对化肥氮的吸收利用, 增大了氮肥损失。由此可见, 在不同质地潮土中, 增加耕层厚度在提高化肥氮素当季利用率的同时也增大了化肥氮在土壤中的残留量, 减少了化肥氮的损失。残留的化肥氮在后茬作物生长季释放出来供作物吸收利用, 促进了化肥氮累积利用率的提高。

关键词: 潮土; 耕层厚度; 土壤质地; 氮肥转化与去向; 氮肥利用率

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Plough Layer Thickness on the Transformation and Fate of Fertilizer Nitrogen in Fluvo-aquic Soils with Different Textures

DING Shijie^{1, 2}, YANG Wenliang¹, XIN Xiuli^{1, 2}, ZHANG Xianfeng¹, ZHU Anning^{1, 2†}, YANG Jiao^{1, 2}, REN Guocui^{1, 2}, LI Mengrou^{1, 2}

* 国家自然科学基金项目(41877023)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)2003, CX(21)1009)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41877023), the Agriculture Science and Technology Innovation Fund of Jiangsu Province, China (Nos. CX(20)2003 and CX(21)1009)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: anzhu@issas.ac.cn

作者简介: 丁世杰(1988—), 男, 河南漯河人, 博士, 主要从事土壤地力提升研究。E-mail: sjding@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-04-06; 收到修改稿日期: 2022-07-19; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-2

(1. Fengqiu Agro-Ecological Experimental Station/State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Soil fertility is significantly influenced by plough layer thickness. However, it is still not clear how the transformation and fate of fertilizer nitrogen (N) in fluvo-aquic soils would be affected by plough layer thickness. 【Method】 In this study, a soil column simulation experiment in the field was conducted throughout three crop cultivations. The experiment was performed in a completely randomized design with six treatments including two plough layer thicknesses (15 and 25 cm) and three soil textures (sandy loam, sandy clay loam and loamy clay). A ^{15}N -labeled tracer technique was used to evaluate the dynamics of fertilizer-derived organic N, fixed NH_4^+ and mineral N in 0~40 cm soil layer and the fate of fertilizer N in soil-crop systems. 【Result】 The transformation of fertilizer N in soil-crop systems was significantly affected by plough layer thickness, and showed the same varying tendency among different textural soils. The residual fertilizer N existed mainly in the form of organic N, which accounted for more than 83% of the total residual fertilizer N and played a pivotal role in the storage and supply of fertilizer N. Increasing plough layer thickness degraded the conversion of fertilizer N to fixed NH_4^+ pool, while increased the stocks of fertilizer-derived organic N in 0~40 cm soil layer. In the current season after fertilizer N was applied, the average value of fertilizer-derived organic N stock in soils with 25 cm plough layer thickness (PLT-25) was averagely 8.9% higher than that in soils with 15 cm plough layer thickness (PLT-15). The stocks of fertilizer-derived mineral N under PLT-25 treatments were also higher than that under PLT-15 treatments in the current and subsequent crop cultivations; promoting the fertilizer N uptake by crops. The N use efficiency under PLT-25 treatments in the first two crop cultivations was about 8.0% higher than that of PLT-15 treatments, while the current seasonal loss rate and cumulative loss rate of fertilizer N were 12.3% and 9.1% lower, respectively. The stocks of fertilizer-derived organic N in sandy clay loam and loamy clay were significantly ($P < 0.05$) higher than that in sandy loam, while the trend was the opposite for the stocks of fertilizer-derived fixed NH_4^+ . And the fertilizer-derived mineral N stock was usually to be higher in sandy loam. Overall, the percentage of recovery of applied fertilizer N in crops and soil under sandy loam treatment was significantly ($P < 0.05$) lower than that in sandy clay loam and loamy clay. Also, the percentage of cumulative loss of fertilizer N in sandy loam was 18.8% and 20.8% higher than that in sandy clay loam and loamy clay, respectively. 【Conclusion】 The fluvo-aquic soils with higher sand content have lower fertilizer N storage capacity, restricting the enhancing of N use efficiency. For fluvo-aquic soils with different textures, increasing plough layer thickness could improve the annual N use efficiency and the residual amount of applied fertilizer N in the current season. This, could be released for crop uptake in the subsequent crop cultivation. In typical fluvo-aquic soil areas, increasing the plough layer thickness may be a potential means for regulating the transformation and fate of applied fertilizer N, increasing fertilizer N retention, enhancing the fertilizer N uptake by crops and minimizing fertilizer N loss in soil-crop systems.

Key words: Fluvo-aquic soils; Plough layer thickness; Soil texture; Transformation and fate of fertilizer nitrogen; Nitrogen fertilizer use efficiency

耕层是作物根系分布与吸收养分的主要层次，良好的耕层结构对作物生长及产量形成至关重要，决定着土地的生产能力^[1]。华北平原是中国的粮食主产区之一，长期采用小麦季旋耕和玉米季免耕的耕作模式导致耕层变浅在该区域已十分普遍^[2]，制约着土壤碳、氮、磷等养分库容的提升，不利于作物的生长及其对养分的吸收利用^[3-4]。明确耕层厚度对潮土中化肥氮素保蓄与供给的影响，对提高潮土氮肥利用率、保障该区域农业可持续发展意义重大。

耕层厚度主要受耕作方式的影响，其在调控土

壤团聚结构形成、水肥保蓄与作物生长等方面发挥着重要作用^[5-7]。通过深松与深耕增加耕层厚度可提高土壤水分含量与碳氮等养分库容，促进作物的生长及其对水分与氮素的吸收利用^[8-9]。也有研究^[10-11]认为单纯通过深耕增加耕层厚度并不利于土壤碳氮等养分的累积以及作物产量的提升。石彦琴等^[12]以褐土为研究对象，认为耕层厚度为 20 cm 时土壤有机碳储量最高，而梁海等^[13]发现深松 35 cm 更有利于潮棕壤中氮、磷养分的累积。可见，前人研究多集中于耕层厚度对碳氮等养分库容与养分平衡的影

响,很少关注氮肥在土壤中的转化过程,耕层厚度对潮土中化肥氮素保蓄与供给的影响更是鲜有报道。

土壤质地也是影响土壤氮素保蓄与释放的重要因素之一^[14-15]。与砂质土相比,黏质土通过黏土矿物对含氮化合物的化学吸附作用以及形成团聚体为有机氮提供更好的物理保护,从而提高对外源氮素的保蓄能力^[15-17],同时也降低了化肥氮的淋溶与挥发损失^[18-19]。潮土的成土母质为黄河多次泛滥冲积产物,土壤质地层次在水平和垂直空间上表现出高度的变异性,影响着土壤水肥贮存与供给能力^[20-21]。耕层厚度对潮土中化肥氮素保蓄与供给的影响是否因土壤质地的不同而存在差异尚需要进一步明确。

氮肥施入土壤后在土壤生物化学过程的驱动下转化为有机氮、无机氮、固定态铵等不同形态,影响着氮肥的保蓄与供给^[22]。本文在前期对封丘县域内农田土壤耕层结构与养分含量调查的基础上^[4],利用历经 3 个作物生长季的 ¹⁵N 标记田间土柱模拟试验,进一步探究在不同质地潮土中,耕层厚度对外源化肥氮在土壤各氮库的转化及其在土壤-作物系统中去向的影响,以期采取适宜的施肥、耕作等农田管理措施及提高氮肥利用率提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

田间土柱模拟试验位于中国科学院封丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(35°00'N, 114°24'E)。该地区气候类型为半干旱半湿润的暖温带大陆性季风气候,年均降水量为 615 mm,年均气

温 13.9℃。种植制度以冬小麦-夏玉米为主。

1.2 试验设计

本研究供试土壤为潮土,于 2017 年 5 月分别选取河南省封丘县境内 0~40 cm 土层土壤质地分别为砂壤土、砂黏壤土与壤黏土(按国际制)农田,分耕层(0-20 cm)与亚耕层(20-40 cm)采集土壤,风干后过 2 mm 筛,剔除根系与石砾后用于田间土柱模拟试验的填装。同时测定各层土壤容重作为装填土柱的依据。土柱装填前,将试验地中直径为 40 cm、深度为 40 cm 的土体取出,置入内径为 39 cm,高为 50 cm 的聚氯乙烯(PVC)管,然后根据设计的耕层厚度将采集的土壤样品分亚耕层与耕层依次填装于 PVC 管中,土柱埋深 40 cm。各处理土柱耕层土壤填装容重为 1.35 g·cm⁻³,亚耕层土壤填装容重为 1.55 g·cm⁻³,土柱不封底。采用完全随机设计,包含土壤质地和耕层厚度 2 种试验因子,其中土壤质地包括砂壤土、砂黏壤土和壤黏土;耕层厚度为 15 cm(PLT-15)和 25 cm(PLT-25)两种,共 6 个处理,每处理 3 次重复。土柱模拟试验田间排列与土柱设计如图 1 所示。为使耕层土壤与亚耕层土壤充分融合,形成稳定的土壤结构,于 2017 年 6 月—2018 年 9 月作物生长季内在田间自然条件下进行培育,在此期间的施肥量均为常规施肥量的 1/2。

¹⁵N 标记试验于 2018 年 10 月至 2020 年 6 月作物生长季内进行,供试土壤理化性质和矿物组成见表 1 与表 2。在小麦种植季,所有处理的化肥施用量均为 N 2.39 g·Pot⁻¹(N 200 kg·hm⁻²)、P₂O₅ 1.43 g·Pot⁻¹(P₂O₅ 120 kg·hm⁻²)和 K₂O 1.38 g·Pot⁻¹(K₂O 120 kg·hm⁻²)。其中 60%的氮肥和全部磷钾肥作为基

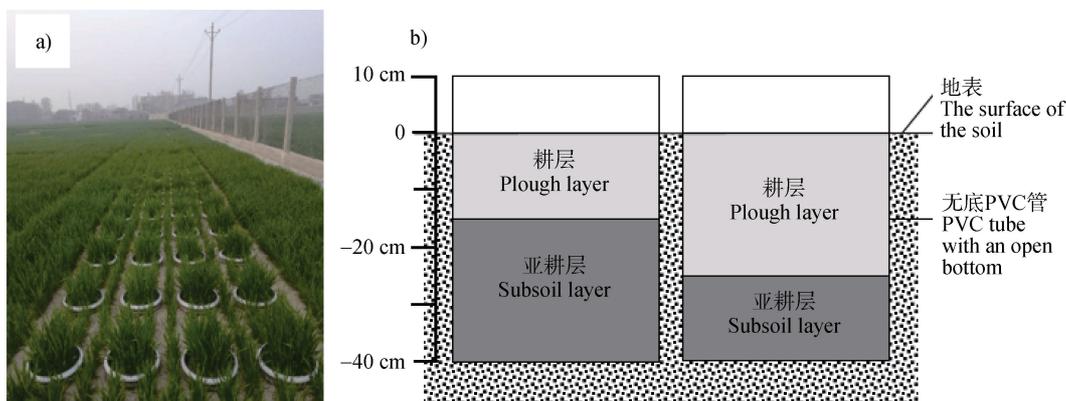


图 1 土柱田间排列(a)及不同耕层厚度处理实验设计(b)示意图

Fig. 1 Field arrangement (a) and experimental design of the soil columns with different plough layer thickness (b)

表 1 试验开始前 0~40 cm 土层的土壤基础理化性质 (2018 年 10 月)

Table 1 Basic soil properties of the tested soils before the experiment (Oct. 2018)

处理 Treatment	土壤颗粒组成			有机质	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
	Soil particle composition			Soil organic matter	Total nitrogen	Alkali-hydrolysable nitrogen	Available phosphorus	Available potassium
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	/ (g·kg ⁻¹)			/ (mg·kg ⁻¹)	
/%								
耕层 Plough layer								
砂壤土 Sandy loam	77.7	10.9	8.6	12.7	0.58	60.7	18.4	221.8
砂黏壤土 Sandy clay loam	59.4	15.7	22.1	15.1	0.79	80.5	15.5	264.4
壤黏土 Loamy clay	45.9	21.6	29.9	21.9	1.04	84.4	16.5	379.3
亚耕层 Subsoil layer								
砂壤土 Sandy loam	79.1	6.5	11.7	2.5	0.22	32.9	1.8	18.9
砂黏壤土 Sandy clay loam	59.2	15.6	22.8	10.6	0.56	37.2	4.4	58.7
壤黏土 Loamy clay	36.2	23.7	36.2	8.6	0.62	31.9	1.7	94.9

注：土壤颗粒组成采用激光粒度仪法测定。Note: Soil particle composition was measured by the laser particle size analysis method.

表 2 供试土壤矿物组成

Table 2 Soil mineral composition of the tested soils/%

处理 Treatment	蒙脱石 Montmorillonite	蛭石 Vermiculite	水云母 Hydromica	闪石 Amphibole	高岭石 Kaolinite	绿泥石 Chlorite	石英 Quartz	长石 Feldspar	方解石 Calcite	白云石 Dolomite
耕层 Plough layer										
砂壤土 Sandy loam	1	1	3	1	4	4	39	42	3	2
砂黏壤土 Sandy clay loam	1	4	8	2	10	11	29	24	6	5
壤黏土 Loamy clay	5	3	10	1	15	13	27	17	6	3
亚耕层 Subsoil layer										
砂壤土 Sandy loam	2	3	5	2	10	8	23	41	3	3
砂黏壤土 Sandy clay loam	2	3	8	1	10	10	30	26	6	4
壤黏土 Loamy clay	10	3	13	0	15	16	21	11	9	2

注：土壤矿物组成采用 X 射线衍射法测定。Note: Soil mineral composition was determined using X-ray diffraction techniques.

肥在播种前施入，40%的氮肥于小麦返青期随灌水施入土壤。在玉米种植季，化肥施用量为 N 2.39 g·Pot⁻¹ (N 200 kg·hm⁻²)、P₂O₅ 0.72 g·Pot⁻¹ (P₂O₅ 60 kg·hm⁻²) 和 K₂O 0.69 g·Pot⁻¹ (K₂O 60 kg·hm⁻²)。其中 40%的氮肥和全部磷钾肥作为基肥在播种前施入，60%的氮肥于玉米大喇叭口期随灌水施入。基

肥的施用均随播种前翻地进行，即将耕层土壤小心取出，与基肥混匀后倒回原 PVC 管。所用磷钾肥为重过磷酸钙和硫酸钾，在 2018 年 10 月至 2019 年 6 月冬小麦生长季所施氮肥为 ¹⁵N 标记尿素 (丰度 20.19%，上海化工研究院)，在随后的 2 个作物生长季内所施氮肥均为普通尿素。试验期间，所有处理

采用相同的田间管理措施。

1.3 样品采集与测定

分别于 2019 年 6 月 4 日冬小麦成熟期、2019 年 9 月 26 日夏玉米成熟期与 2020 年 6 月 3 日冬小麦成熟期采集土壤与地上部植株样品。土壤样品分为耕层土壤与亚耕层土壤分别采集, 用内径为 1.9 cm、外径为 2 cm 的不锈钢土钻在每个 PVC 管中随机采集 3 钻组成一个混合土样。亚耕层土样采集后用直径为 2 cm 的尼龙棒将取样孔堵上, 以防止耕层土壤落入亚耕层, 以及水分、肥料通过取样孔流失。新鲜土壤过筛后分为 2 部分, 一部分用于测定土壤含水量, 无机氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量及其 ^{15}N 丰度; 一部分风干后过 0.15 mm 筛, 用于土壤全氮与固定态铵含量及其 ^{15}N 丰度的测定。采集的植株样品在 65℃ 下烘干至恒重, 粉碎后过 0.25 mm 筛, 用于植株全氮与 ^{15}N 丰度的测定。所有土壤养分数据均以 0~40 cm 土层中总的储量来计算。

新鲜土壤用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提后用比色法测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量^[23], 用 N_2O 产生法测定其 ^{15}N 丰度^[24]。土壤固定态铵的测定采用 KOBBr-KOH 法^[23]。用氢氟酸修正的凯氏法测定土壤全氮含量^[23], 该方法测定的土壤全氮包括有机氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和固定态铵, 但不包括 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。植株全氮含量用凯氏法测定。测定固定态铵、土壤与植株全氮的硼酸吸收液, 经硫酸固定、浓缩后用同位素比例质谱仪 (IsoPrime 100, Elementar, 德国) 测定其 ^{15}N 丰度。

1.4 数据计算与处理

利用 Lu 等^[22]与 Ma 等^[25]中的公式来计算化肥氮在土壤各氮库中的分配以及化肥氮在土壤-作物系统中的去向。

土壤全氮 (N_s , $\text{g}\cdot\text{Pot}^{-1}$)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (N_{NH_4} , $\text{mg}\cdot\text{Pot}^{-1}$)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (N_{NO_3} , $\text{mg}\cdot\text{Pot}^{-1}$)、固定态铵 (N_f , $\text{mg}\cdot\text{Pot}^{-1}$) 或植株全氮 (N_p , $\text{g}\cdot\text{Pot}^{-1}$) 中来自 ^{15}N 标记尿素的氮储量:

$$M_{\text{Ndf}} = M_{\text{N}} \times \frac{E_{\text{a}}}{E_{\text{FN}}} \quad (1)$$

式中, M_{Ndf} 为土壤全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、固定态铵或植株全氮中来自 ^{15}N 标记尿素的氮储量; M_{N} 为土壤全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、固定态铵和植株全氮

储量; E_{a} 和 E_{FN} 分别为对应氮库与标记尿素 ^{15}N 原子百分超, 即实测丰度值与自然丰度值的差值。

肥料来源的无机氮 (N_{m} , $\text{mg}\cdot\text{Pot}^{-1}$) 与有机氮 (N_{o} , $\text{g}\cdot\text{Pot}^{-1}$) 储量:

$$N_{\text{m}} = N_{\text{NH}_4} + N_{\text{NO}_3} \quad (2)$$

$$N_{\text{o}} = N_{\text{s}} - (N_{\text{NH}_4} + N_{\text{f}}) \quad (3)$$

^{15}N 标记化肥氮在土壤中的总残留量 (N_{r} , $\text{g}\cdot\text{Pot}^{-1}$):

$$N_{\text{r}} = N_{\text{o}} + N_{\text{f}} + N_{\text{m}} \quad (4)$$

^{15}N 标记化肥氮在作物 (PR-Ncrop, %) 和土壤 (PR-Nsoil, %) 的回收率与损失率 (PL-N, %):

$$\text{PR-Ncrop} = \frac{N_{\text{p}}}{N_{\text{FN}}} \quad (5)$$

$$\text{PR-Nsoil} = \frac{N_{\text{r}}}{N_{\text{FN}}} \quad (6)$$

采用 Excel 2016 进行数据处理与分析, 使用 Origin 2020 软件进行数据作图。采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析, 根据最小显著性差异法 (LSD), 采用单因素方差分析检验不同土壤质地之间的显著性差异; 配对样本 t 检验用于分析两种耕层厚度处理之间的显著性差异; 两因素方差分析用于检验土壤质地、耕层厚度以及二者之间的交互作用对化肥氮在土壤-作物系统的去向以及化肥氮在土壤各氮库中分布的显著性影响。

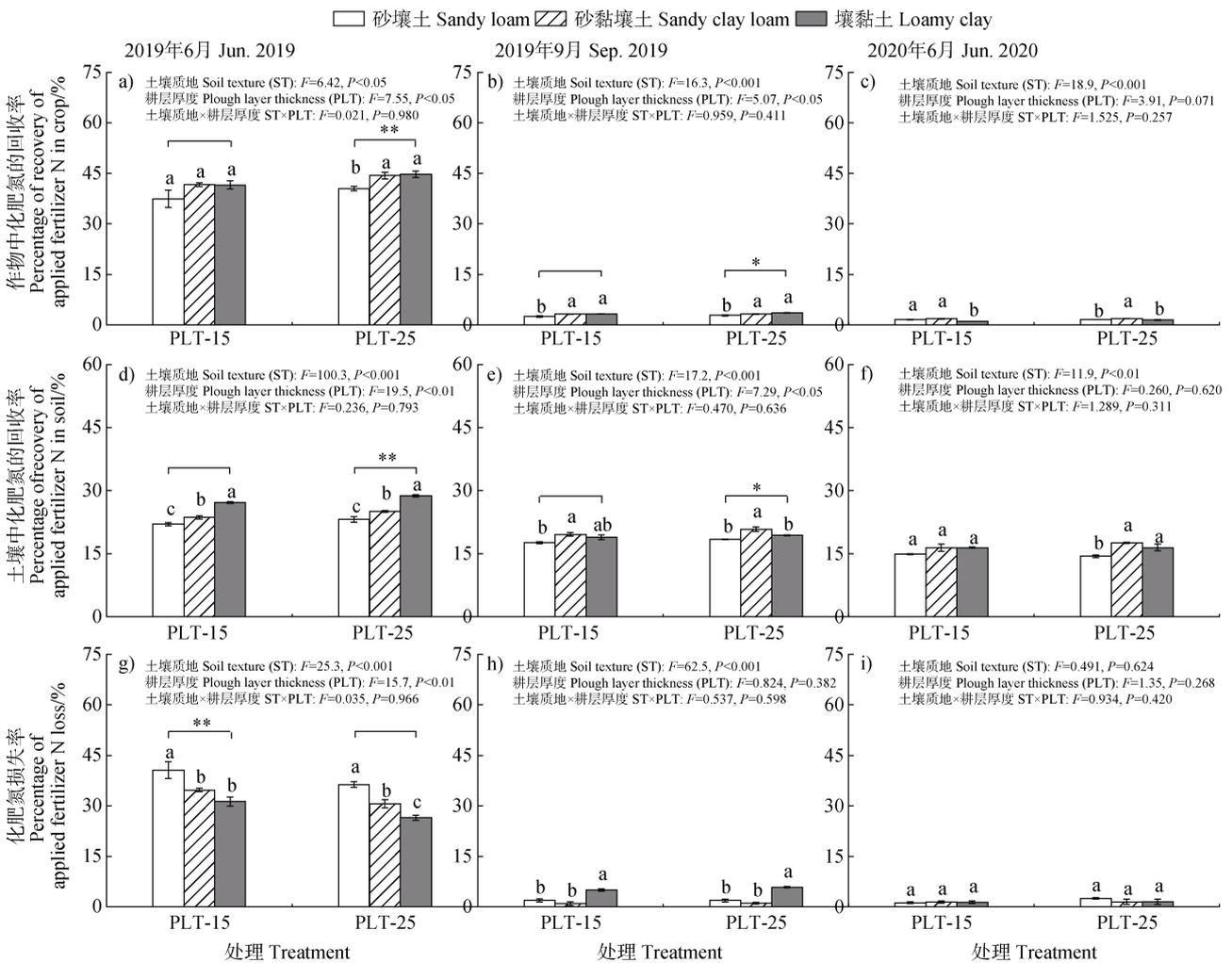
2 结果

2.1 化肥氮在土壤-作物系统中的去向

从图 2 可以看出, 作物对化肥氮的吸收与化肥氮的损失主要发生在施肥当季, 在 2019 年 6 月冬小麦收获季, 占施肥量 37.4%~44.8% 的化肥氮被作物吸收, 26.5%~36.3% 的化肥氮损失至环境中。随后, 作物对化肥氮的吸收与化肥氮的损失量逐渐降低。在第 2 与第 3 个作物生长季, 有 7.1%~12.3% 的化肥氮从土壤中释放出来, 其中有 4.3%~5.0% 被作物吸收。耕层厚度与土壤质地均显著影响化肥氮在

土壤-作物系统中的去向,但两者无明显交互作用。增加耕层厚度可显著 ($P < 0.05$) 提高施肥当季与第 2 个作物生长季内作物与土壤中化肥氮的回收率(图 2)。在施肥当季与第 2 个作物生长季, PLT-25 处理下不同质地潮土中作物对化肥氮利用率的平均值分别较 PLT-15 处理高 7.4% 与 8.5%; 经过 3 个作物生长季后, PLT-25 处理下作物对化肥氮累积利用率的平均值较 PLT-15 处理高 7.6% (图 2, 表 3)。PLT-25 处理下, 不同质地潮土中化肥氮在施肥当季的损失量(图 2g)与累积损失量(表 2)平均较 PLT-15 处理低 12.3% 和 9.1%, 且差异显著 ($P < 0.05$)。

在前 2 个作物生长季, 砂黏壤土与壤黏土处理下作物中化肥氮的回收率高于砂壤土, 而在第 3 个作物生长季则是砂黏壤土中作物对化肥氮的回收率最高, 砂壤土次之(图 2a~图 2c)。由表 3 可知, 砂壤土中作物对化肥氮的累积利用率较砂黏壤土与壤黏土均低 11.1%。砂壤土中化肥氮的回收率也显著 ($P < 0.05$) 低于砂黏壤土与壤黏土(图 2d~图 2f)。而砂壤土中化肥氮的累积损失率分别较砂黏壤土与壤黏土高 18.8% 与 20.8% (表 3)。在施肥当季, 砂壤土中化肥氮损失率最大, 而在第 2 个作物生长季则是壤黏土的损失率最大(图 2g, 图 2h)。



注: 不同小写字母表示在同一耕层厚度处理下不同质地处理间差异显著 ($P < 0.05$), *与**分别表示不同耕层厚度处理间差异达 0.05 与 0.01 显著水平。PLT-15: 耕层厚度 15 cm; PLT-25: 耕层厚度 25 cm, 下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between different soil textures within the same plough layer thickness. * and ** indicate the difference between the two plough layer thickness treatments at 0.05 and 0.01 significant levels. PLT-15: plough layer thickness 15 cm; PLT-25: plough layer thickness 25 cm. The same below.

图 2 不同耕层厚度与土壤质地处理下化肥氮在土壤-作物系统中的去向

Fig. 2 Fate of applied fertilizer N in soil-crop systems under different plough layer thickness treatments in soils with different textures

表 3 经过 3 个作物生长季后不同处理下化肥氮的总体去向

Table 3 The fate of fertilizer N under different treatments after three continuous crop cultivations

	土壤中化肥氮的残留率 Residual rate of fertilizer N in soil/%	作物对化肥氮利用率 Percentage of cumulative uptake of fertilizer N by crops/%	化肥氮损失率 Percentage of cumulative loss of fertilizer N /%
砂壤土 Sandy loam	14.7b	43.1b	42.4a
砂黏壤土 Sandy clay loam	17.0a	47.9a	35.7b
壤黏土 Loamy clay	16.5a	47.9a	35.1b
耕层厚度 Plough layer thickness 15cm	15.9	44.6	39.5*
耕层厚度 Plough layer thickness 25cm	16.1	48.0*	35.9
两因素方差分析 Two-way ANOVA			
土壤质地 Soil texture (ST)	$P<0.01$	$P<0.001$	$P<0.001$
耕层厚度 Plough layer thickness (PLT)	ns	$P<0.05$	$P<0.01$
土壤质地×耕层厚度 ST×PLT	ns	ns	ns

注：不同小写字母表示在不同质地处理间差异显著 ($P<0.05$)，*表示不同耕层厚度处理间差异达 0.05 显著水平，ns 表示处理间差异不显著，下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between different soil textures. * indicate the difference between the two plough layer thickness treatments at a 0.05 significant level. ns represents there was no significant difference between different treatments. The same below.

2.2 化肥氮在土壤不同氮库中的转化

化肥氮在土壤中的残留量随作物生长季的延续逐渐降低 (表 4)。在前 2 个作物生长季，相对于 PLT-15 处理，增加耕层厚度至 25 cm 后土壤中化肥氮的总残留量分别提高了 5.7%与 4.5%。砂壤土中化肥氮的总残留量较砂黏壤土和壤黏土低 6.1%~23.8%。耕层厚度与土壤质地对土壤中化肥氮残留量的影响无交互作用。由表 4 和图 3 数据计算可知，肥料来源有机氮、固定态铵和无机氮占土壤中化肥

氮总残留量的比例分别为 83.0%~95.8%、0.9%~6.6%与 3.3%~10.9%。随着作物生长季的延续，肥料来源固定态铵与无机氮占化肥氮总残留量的比例降低，而肥料来源有机氮的占比升高。增加耕层厚度可提高施肥当季肥料来源有机氮占化肥氮总残留量的比例，以及前 2 个作物生长季内肥料来源无机氮占化肥氮总残留量的比例。而 PLT-25 处理下肥料来源固定态铵占总残留化肥氮的比例则始终低于 PLT-15 处理。

表 4 在 3 个作物生长季内不同处理下 0~40 cm 土层中化肥氮的总残留量

Table 4 The residual amount of fertilizer N / ($\text{g} \cdot \text{Pot}^{-1}$) in 0-40 cm layer under different treatments among three continuous crop cultivations

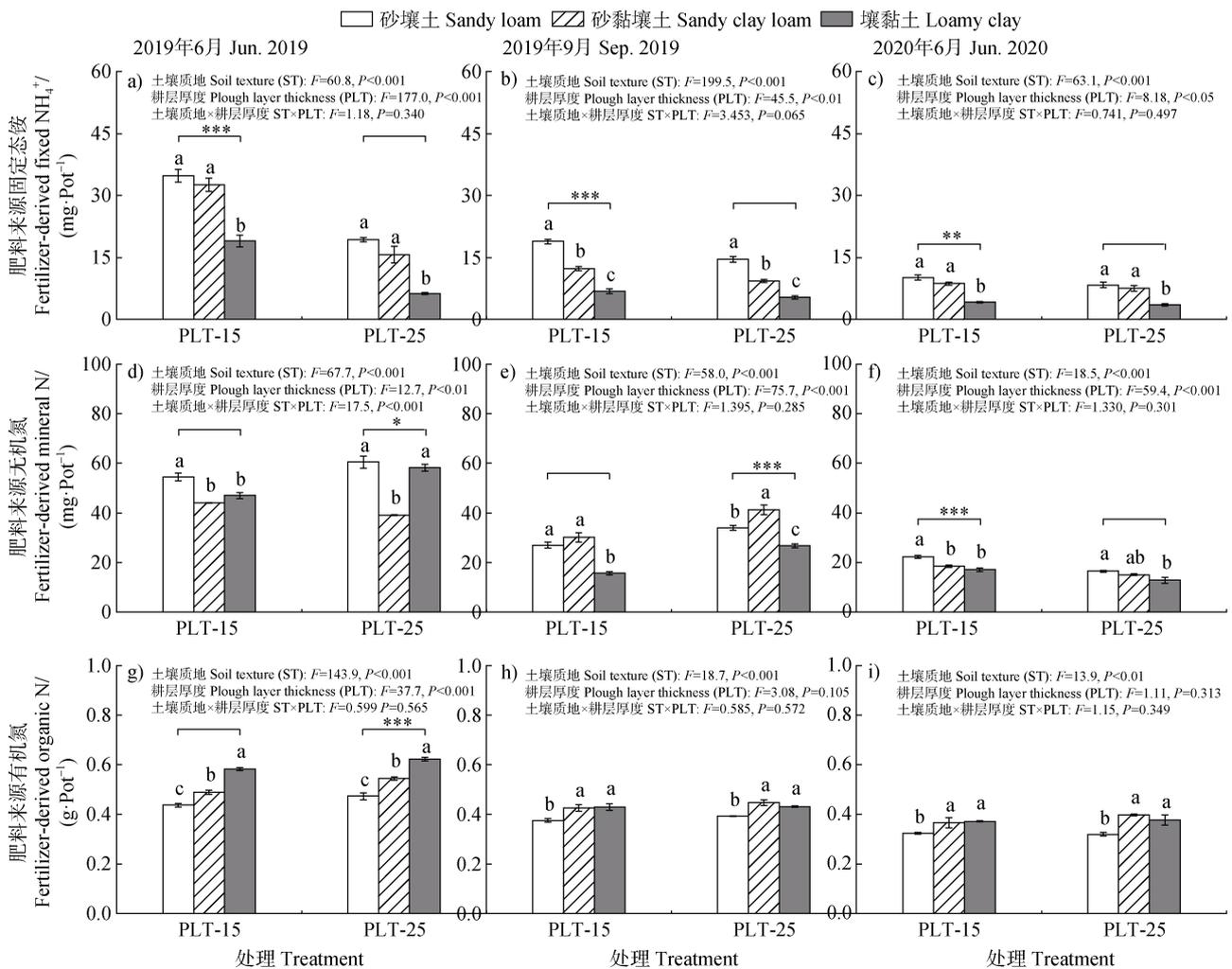
	2019-06	2019-09	2020-06
砂壤土 Sandy loam	0.539c	0.431c	0.350b
砂黏壤土 Sandy clay loam	0.582b	0.483a	0.406a
壤黏土 Loamy clay	0.668a	0.457b	0.393a
耕层厚度 Plough layer thickness 15cm	0.580	0.447	0.381
耕层厚度 Plough layer thickness 25cm	0.613**	0.467*	0.386
两因素方差分析 Two-way ANOVA			
土壤质地 Soil texture (ST)	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.01$
耕层厚度 Plough layer thickness (PLT)	$P<0.01$	$P<0.05$	ns
土壤质地×耕层厚度 ST×PLT	ns	ns	ns

从图 3 可以看出，耕层厚度与土壤质地均会影响化肥氮在土壤各氮库中的分配，但除在施肥当季耕层厚度对 0~40 cm 土层中肥料来源无机氮储量的影响在不同质地潮土中有所差异外，耕层厚度与土壤质地对肥料来源有机氮、无机氮与固定态铵储量的影响均无明显交互作用。

增加耕层厚度会降低化肥氮向潮土固定态铵库中的转化。在施肥当季，PLT-25 处理下不同质地潮土中肥料来源固定态铵储量的平均值为 PLT-15 处理下的 47.8%，不同耕层厚度处理间的差异随作物种植季的增多而减小（图 3a~图 3c）。不同质地潮土中化肥来源固定态铵的储量随土壤黏重程度的增

大而降低（图 3a~图 3c）。

在不同质地潮土中，耕层厚度对化肥来源无机氮储量的影响在不同作物生长季的表现不同。在施肥当季，化肥来源无机氮储量的最大值与最小值分别出现在 PLT-25 处理下的砂壤土与砂黏壤土，为 $60.5 \text{ mg} \cdot \text{Pot}^{-1}$ 与 $39.1 \text{ mg} \cdot \text{Pot}^{-1}$ ，但总体而言，PLT-25 处理下不同质地潮土中肥料来源无机氮储量显著 ($P < 0.05$) 高于 PLT-15 处理（图 3d）。在第 2 个作物生长季，不同耕层厚度处理下的无机氮储量表现出与施肥当季相同的变化趋势，而第 3 个作物生长季的变化趋势则与前 2 个作物生长季相反（图 3e, 图 3f）。



注：***表示不同耕层厚度处理间差异达 0.001 显著水平。Note: *** indicate the difference between the two plough layer thickness treatments at a 0.001 significant level.

图 3 耕层厚度与土壤质地对 0~40 cm 土层中化肥来源有机氮、无机氮与固定态铵储量的影响

Fig. 3 The effects of plough layer thickness and soil texture on the stocks of fertilizer-derived organic N, mineral N and fixed NH_4^+ in 0-40 cm soil layer among three continuous crop cultivations

残留在土壤中的化肥氮主要以有机氮的形式存在,随着作物种植季的增多,化肥来源有机氮的释放量逐渐降低(图 3g~图 3i)。提高耕层厚度可提高化肥氮向有机氮库的转化,这在施肥当季尤为明显(图 3g),PLT-25 处理下砂壤土、砂黏壤土与壤黏土中肥料来源有机氮储量较 PLT-15 处理分别提高了 8.3%、11.3%与 7.0%。同时也可以看出,砂壤土中的化肥来源有机氮储量始终低于砂黏壤土与壤黏土。

3 讨 论

3.1 化肥氮在潮土有机氮、无机氮与固定态铵库中的转化

化肥氮施入土壤后转化为有机氮、无机氮、固定态铵等不同形态的土壤氮,它们在氮素的保蓄与供给中发挥着不同的功能,其中有机氮与固定态铵可作为化肥氮的暂时贮存库,先将土壤中盈余的化肥氮进行固定,然后在有效氮不足时释放出来供作物吸收利用^[22]。本试验中,施肥当季肥料来源有机氮占土壤中化肥氮总残留量的 83.0%~90.8%,其在前茬作物中的释放量占土壤中残留化肥氮总减少量的 77.6%(表 4,图 3),表明土壤微生物对化肥氮的生物固持是潮土中化肥氮素保蓄与供给的一个主要影响机制^[22]。耕层厚度显著影响化肥氮向有机氮、无机氮与固定态铵库的转化,且在不同质地潮土中具有相同的作用效果(图 3)。

增加耕层厚度可提高化肥氮向不同质地潮土有机氮库的转化,提高肥料来源无机氮的供应。在施肥当季 PLT-25 处理下,不同质地潮土中的肥料来源有机氮储量均高于 PLT-15 处理(图 3g~图 3i)。本课题组前期研究表明,增加耕层厚度可提高土壤团聚体的形成与稳定^[4],为新合成的有机氮提供更好的物理保护^[17]。增加耕层厚度后,有机碳与养分储量也相应提高(表 1),可为土壤微生物提供更多的碳源和养分,提高微生物活性及其对化肥氮的固持^[26-27]。土壤微生物对化肥氮素固持的增加也会促进黏土矿物中肥料来源固定态铵的释放^[25],这在一定程度上也解释了 PLT-25 处理下的肥料来源固定态铵储量低于 PLT-15 处理(图 3a~图 3c)。在第 2 个作物生长季,与 PLT-15 处理相比,PLT-25 处理

下肥料来源有机氮的释放量(图 3),以及作物中化肥氮的回收率(图 2b)和肥料来源无机氮储量及其占土壤总残留氮的比例(图 3e)均较高,表明化肥氮在有机氮库中的暂时储存与后续释放有利于提高化肥氮的有效性^[22]。

固定态铵含量主要取决于土壤中伊利石、水云母、蛭石和蒙脱石等 2:1 型黏土矿物含量^[16, 28]。在本试验中,蒙脱石、蛭石与水云母的总含量随土壤黏重程度的增大而增多(表 2),固定态铵总储量表现为由高到低依次为壤黏土、砂壤黏土、砂壤土(数据未列出),但肥料来源固定态铵储量呈相反的变化趋势。这可能是因为壤黏土中较高的 K^+ (表 1)会与 NH_4^+ 竞争矿物晶格或表面吸附位点,同时,较高的有机质含量(表 1)会导致更多的有机小分子吸附在矿物晶格表面阻碍 NH_4^+ 的进出,从而降低了壤黏土中新旧固定态铵的更替^[29]。此外,与壤黏土相比,砂壤土的肥料来源无机氮储量处于较高水平(图 3d~图 3f),这是因为土壤中肥料来源无机氮含量易受作物吸收、土壤水分等环境因素的影响^[30],在前 2 个作物生长季,砂壤土中作物对化肥氮吸收量较低(图 2a,图 2b),在一定程度上促进了成熟期砂壤土中肥料来源无机氮的累积。而在第 3 个作物生长季,砂壤土中肥料来源有机氮和固定态铵的释放量均较高,也促进了成熟期肥料来源无机氮的积累。

3.2 化肥氮在土壤-作物系统中的去向

被作物吸收、残留于土壤中以及通过淋溶或气体挥发损失是化肥氮施入农田土壤后的 3 个基本去向^[22, 27]。增加耕层厚度有利于化肥氮在施肥当季向有机氮库的转化(图 3g),提高土壤中化肥氮的回收率(图 2)和化肥氮的有效性(图 3d,图 3e),同时,增加耕层厚度可使土壤结构更为疏松,有利于作物形成良好的根系结构,促进作物对水肥的吸收^[4]。因而,PLT-25 处理下前 2 个作物生长季内作物对化肥氮的利用率(图 2a,图 2b)以及作物对化肥氮的累积利用率(表 3)显著高于 PLT-15 处理。随着作物生长季的延续,新合成的有机氮通过土壤有机质的腐殖化过程逐渐转化为较难分解的化合物^[31],土壤中残留化肥氮的释放量减少,化肥来源无机氮的供应量也降低(图 3f),在第 3 个作物生长季,耕层厚度对作物中化肥氮的回收率已无显著影

响(图 2c)。增加耕层厚度也避免了因化肥氮在表层土壤聚集而导致氨挥发损失的加剧^[32],显著降低了化肥氮的当季损失率(图 2g)与化肥氮的累积损失率(表 2)。由此可见,在不同质地潮土中,增加耕层厚度均可提高土壤对化肥氮的保蓄与供给能力,降低化肥氮的损失。

砂粒含量高制约着化肥氮向有机氮的转化,导致砂壤土中化肥氮的总残留量始终低于砂黏壤土与壤黏土(表 4)。砂黏壤土与壤黏土可将更多的化肥氮暂时固定,之后释放出来供作物吸收利用,因而在施肥当季与第 2 个作物生长季,砂黏壤土与壤黏土中作物对化肥氮的利用率高于砂壤土(图 2a~图 2b,表 2)。随着时间的延长,土壤残留化肥氮的释放量降低,以及黏土矿物或团聚体对有机氮的保护作用^[22,33]导致壤黏土中残留化肥氮的有效性不及砂壤土与砂黏壤土(图 3f),所以在第 3 个作物生长季壤黏土中作物对化肥氮的利用率较低。土壤质地对潮土中化肥氮素损失的影响在前 2 个作物生长季的表现不同(图 2g,图 2h)。这可能是在施用氮肥后的冬小麦季,砂壤土中的氨挥发与淋溶损失最多,导致其氮素损失量最大^[18-19]。在夏玉米季,残留化肥氮的氨挥发损失大幅减少^[34],而较高的温度与降雨量,以及壤黏土较差的通气性能,增大了壤黏土中残留化肥氮的反硝化损失^[35]。

4 结 论

化肥氮施入潮土后主要以有机氮的形式存在,其在氮素保蓄与供给过程中发挥着重要作用。砂粒含量高不利于化肥来源有机氮的保蓄,制约着潮土对化肥氮的保蓄与供给能力的提升,增大了化肥氮的损失。在不同质地潮土中,增加耕层厚度均可显著提高化肥氮向有机氮库中的转化,增大肥料来源无机氮的供给,提高化肥氮的当季利用率,降低化肥氮的损失。化肥氮在有机氮库中的蓄积提高了化肥氮在土壤中的残留量,而残留于土壤中的化肥氮可为后茬作物持续提供有效氮,进一步提高作物对化肥氮的吸收利用。因此,提高耕层厚度、培育肥沃耕层可作为促进典型潮土区氮肥资源高效利用的有效措施。

参考文献 (References)

- [1] Hu J M, Chen S N, Wei X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35 (2): 95—103. [胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (2): 95—103.]
- [2] Zhu C W, Long Q, Dong S G, et al. Effects of rotary and deep tillage modes on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in fluvo-aquic soil under wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (1): 51—63. [朱长伟, 龙潜, 董士刚, 等. 小麦-玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (1): 51—63.]
- [3] Ma Y J, Lan Z Q, Zhang K G, et al. Effects of plough layer thickness on soil nutrients and cucumber root development[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 290: 110498.
- [4] Zhang X F, Yang W L, Xin X L, et al. Poor physical structural components restrict soil fertility and crop productivity for wheat-maize cropping[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 117 (2): 169—184.
- [5] Guo L L, Yang Y, Zhao Y, et al. Reducing topsoil depth decreases the yield and nutrient uptake of maize and soybean grown in a glacial till[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 32: 2849—2860.
- [6] Meena R S, Lal R, Yadav G S. Long-term impacts of topsoil depth and amendments on soil physical and hydrological properties of an Alfisol in central Ohio, USA[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114164.
- [7] Han S, Wu J, Xia W G, et al. Effects of topsoil thickness on crop yields and nutrient uptake as well as soil nutrients[J]. *Soils*, 2018, 50 (5): 881—887. [韩上, 武际, 夏伟光, 等. 耕层增减对作物产量、养分吸收和土壤养分状况的影响[J]. *土壤*, 2018, 50 (5): 881—887.]
- [8] Hu H Y, Ning T Y, Li Z J, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142: 85—94.
- [9] Yu S T, Zhao Y L, Wang Y H, et al. Improvement effects of rotational tillage patterns on soil in the winter wheat-summer maize double cropping area of Huang-Huai-Hai region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (11): 2150—2165. [于淑婷, 赵亚丽, 王育红, 等. 轮耕模式对黄淮海冬小麦-夏玉米两熟区农田土壤改良效应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (11): 2150—2165.]

- [10] Basir A, Jan M T, Alam M, et al. Impacts of tillage, stubble management, and nitrogen on wheat production and soil properties[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017, 97: 133—140.
- [11] Han S, Wu J, Li M, et al. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (2): 276—284. [韩上, 武际, 李敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (2): 276—284.]
- [12] Shi Y Q, Gao W S, Chen Y Q, et al. Effect of topsoil thickness on soil organic carbon in high-yield and irrigated farmland in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (11): 85—90. [石彦琴, 高旺盛, 陈源泉, 等. 耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (11): 85—90.]
- [13] Liang H, Chen B C, Han H F, et al. Subsoiling 35 cm in depth improve soil physicochemical properties and increase grain yields of wheat and maize in aquic brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25 (11): 1879—1886. [梁海, 陈宝成, 韩惠芳, 等. 深松 35 cm 可改善潮棕壤理化性质并提高小麦和玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (11): 1879—1886.]
- [14] Matus F J, Lusk C H, Maire C R. Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 39 (1-2): 187—201.
- [15] Ge N N, Wei X R, Wang X, et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 172: 148—157.
- [16] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47 (1): 1—14.
- [17] Gentile R M, Vanlauwe B, Six J. Integrated soil fertility management: Aggregate carbon and nitrogen stabilization in differently textured tropical soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 67: 124—132.
- [18] Mehrab N, Chorom M, Hojati S. Effect of raw and NH_4^+ -enriched zeolite on nitrogen uptake by wheat and nitrogen leaching in soils with different textures[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, 47 (10): 1306—1316.
- [19] Pelster D E, Chantigny M H, Angers D A, et al. Can soil clay content predict ammonia volatilization losses from subsurface-banded urea in eastern Canadian soils?[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98: 556—565.
- [20] Tan M Z, Mi S X, Li K L, et al. Application of fuzzy set theory to soil profile texture configuration—A case study of soils in the alluvial plain of Fengqiu County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (2): 221—229. [檀满枝, 密术晓, 李开丽, 等. 模糊集理论在土壤剖面质地构型中的应用—以河南省封丘冲积平原区土壤为例[J]. 土壤学报, 2011, 48 (2): 221—229.]
- [21] Tan M Z, Li K L, Shi X Z, et al. Impact of soil profile texture pattern (SPTP) on wheat yield in North China Plain[J]. Soils, 2014, 46 (5): 913—919. [檀满枝, 李开丽, 史学正, 等. 华北平原土壤剖面质地构型对小麦产量的影响研究[J]. 土壤, 2014, 46 (5): 913—919.]
- [22] Lu C Y, Wang H Y, Chen H H, et al. Effects of N fertilization and maize straw on the transformation and fate of labeled ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ among three continuous crop cultivations[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 275—283.
- [23] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [24] Cao Y C, Zhong M, Gong H, et al. Determining ^{15}N abundance in ammonium, nitrate and nitrite in soil by measuring nitrous oxide produced[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (1): 113—119. [曹亚澄, 钟明, 龚华, 等. N_2O 产生法测定土壤无机态氮 ^{15}N 丰度[J]. 土壤学报, 2013, 50 (1): 113—119.]
- [25] Ma Q, Wu Z J, Pan F F, et al. Effect of glucose addition on the fate of urea- ^{15}N in fixed ammonium and soil microbial biomass N pools[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 168—173.
- [26] Hu G Q, Liu X, He H B, et al. Fate of nitrogen contained in maize stalk mulch in no-tillage system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (4): 963—971. [胡国庆, 刘肖, 何红波, 等. 免耕覆盖还田下玉米秸秆氮素的去向研究[J]. 土壤学报, 2016, 53 (4): 963—971.]
- [27] Wu A L, Wang J S, Dong E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (1): 176—185. [武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (1): 176—185.]
- [28] Wan D J, Zhang Y Z, Feng Y H, et al. Fixed ammonium content of soils on cultivated upland in Hunan Province and its affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (3): 480—483. [万大娟, 张杨珠, 冯跃华, 等. 湖南省主要旱耕地土壤的固定态铵含量及其影响因素[J]. 土壤学报, 2004, 41 (3): 480—483.]
- [29] Zhao W, Liang B, Zhou J B. Residual of applied ^{15}N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 587—596. [赵伟, 梁斌, 周建

- 斌. 施入 ^{15}N 标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用[J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 587—596.]
- [30] Lü H J, He H B, Zhao J S, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373: 595—607.
- [31] Lu C Y, Chen H H, Teng Z Z, et al. Effects of N fertilization and maize straw on the dynamics of soil organic N and amino acid N derived from fertilizer N as indicated by ^{15}N labeling[J]. *Geoderma*, 2018, 321: 118—126.
- [32] Ti C P, Xia L L, Chang S X, et al. Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 141—148.
- [33] Zhang S T, Ren T, Zhou X Q, et al. Effects of rapeseed/wheat—rice rotation and fertilization on soil nutrients and distribution of aggregate carbon and nitrogen[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (1): 194—205. [张顺涛, 任涛, 周橡棋, 等. 油/麦-稻轮作和施肥对土壤养分及团聚体碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 194—205.]
- [34] Que H L, Yang W L, Xin X L, et al. Ammonia volatilization from farmland measured by laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40 (3): 885—890. [阙华礼, 杨文亮, 信秀丽, 等. 基于激光吸收光谱技术的农田氨挥发研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (3): 885—890.]
- [35] Zhu Q, Schmidt J P, Bryant R B. Maize (*Zea mays* L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil—water—topography dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 174—183.

(责任编辑：陈荣府)