

新疆绿洲长期连作棉田土壤氮储量及其垂直分布特征

景 峰¹, 郭成藏¹, 谈建鑫¹, 康亚龙², 曹晶晶¹, 田宝庚¹, 刘建国^{1*}

(1.石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003; 2.巴州农业技术推广中心, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要:通过长期定位试验,设置了不同连作年限(1、5、10、15、20、25、30年)和3个土层深度(0~20、20~40 cm和40~60 cm),研究了新疆绿洲长期连作棉田土壤氮储量的动态变化及其垂直分布特征。结果表明,新疆绿洲棉花长期连作过程中,土壤全氮储量均呈增加趋势,但是在不同的年限,增加的程度不同;棉花短期连作(5年和10年)0~60 cm土壤全氮储量是一个明显的渐增过程,随后是一个缓慢增长的积累过程。从增长速率来看,0~60 cm土壤氮储量的增长速率表现为先下降后上升,最后趋于稳定的变化趋势。土壤容重与土壤全氮含量呈极显著的负相关关系。从不同土层深度来看,各年限的土壤全氮储量随深度增加均有降低的趋势,表层土壤(0~20 cm)全氮储量均大于深层土壤(20~40 cm和40~60 cm),并且随着连作年限的增加,0~60 cm剖面土壤全氮储量表聚性越来越明显。从不同连作年限来看,短期连作时期(5~10年)土壤全氮储量的增加体现在0~60 cm各个深度,而经过长期连作后(10~30年),土壤深层20~40 cm深度的氮储量会逐渐增加,但40~60 cm深度增加较缓慢。总之,新疆绿洲棉田土壤中的氮是“氮汇”,并且棉花连作增加了各土层的土壤氮储量,提高了新疆绿洲棉田的持续供氮能力。

关键词:新疆绿洲;棉花;连作;全氮储量;分布特征

中图分类号:S158.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)06-0545-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0143

Storage and Vertical Distribution Characteristics of Nitrogen in the Continuously Cropped Cotton Field in Xinjiang Oasis, China

JING Feng¹, GUO Cheng-zang¹, TAN Jian-xin¹, KANG Ya-long², CAO Jing-jing¹, TIAN Bao-geng¹, LIU Jian-guo^{1*}

(1.Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2.Bavaria Agricultural Technology Promotion Center, Kuerle 841000, China)

Abstract: The objective of the experiment was to investigate the storage and vertical distribution characteristics of nitrogen in the continuously cropped cotton field in Xinjiang oasis. This experiment was conducted at the Shihezi University experiment station in Shihezi, China. The experiment consisted of seven continuous cropping periods (1, 5, 10, 15, 20, 25 years and 30 years) and three soil depths (0~20, 20~40 cm and 40~60 cm). Results showed that soil total nitrogen storage increased as the duration of continuous cropping increased, but the degree of increase of continuous cropping treatments were different, the soil total nitrogen storage initially increased obviously in the 5 years and 10 years treatment, and then increased slowly after 10 years. As for the growth rate, 0~60 cm depth soil nitrogen storage's growth rate showed initially decreased, then increased, and then stabilized as the duration of continuous cropping increased. Besides, soil total nitrogen content had significantly negative correlation with soil bulk density. As for different soil depths, the soil total nitrogen storage of each continuous cropping periods decreased as the soil depth increased, and surface soil (0~20 cm depth) nitrogen storage was higher than deeper soil (20~40 cm depth and 40~60 cm depth). Besides, with the year of continuous cropping increased, the properties of surface-aggregation of total nitrogen storage in 0~60 cm depth soil became more obviously. As for different years of continuous cropping, with the year of continuous cropping increased from 5 years to 10 years, the soil nitrogen storage of three soil depths (0~20, 20~40 cm and 40~60 cm) were all increased, however, after long-term continuous cropping (10~30 years), the soil nitrogen storage of 20~40 cm depth increased gradually, but the 40~60 cm depth increased more slowly. In a word, the nitrogen of Xinjiang oasis cotton field was nitrogen sink, besides, continuous cropping could increase the soil nitrogen storage of 0~20, 20~40 cm and 40~60 cm depth, improve the soil nitrogen supplying capacity in the continuously cropped cotton field in Xinjiang oasis.

Keywords: Xinjiang oasis; cotton; continuous cropping; total nitrogen storage; distribution characteristics

收稿日期:2015-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31260307)

作者简介:景 峰(1990—),男,新疆哈密人,硕士研究生,研究方向为农田生态环境。E-mail: 1445888676@qq.com

*通信作者:刘建国 E-mail: l-jianguo@126.com

氮(N)是农田生态系统的重要营养元素之一,在调节农田生态系统的结构、组成和功能等方面具有重要作用^[1-4]。农田生态系统中大多数的 N 储存在土壤有机质中,其储存氮素的多少主要与气候对其生物进程的影响程度和有机质的腐解有关^[5]。而土壤的供氮能力通过土壤氮储量的大小来反映^[6],土壤氮储量的变化能够反映出土壤中的氮是“氮汇”还是“氮源”。因此,通过研究长期连作棉田土壤氮储量的变化,阐明长期连作棉田土壤氮的源汇变化,对评价长期连作棉田土壤质量和肥力的影响具有十分重要的意义。

长期连作会造成连作障碍,导致土壤病害加重、土壤肥力下降、作物减产等问题^[7-10]。而在新疆绿洲棉区,棉花长期连作过程中伴随着长期施肥和全量的秸秆还田,其中仅施用氮、磷、钾肥可以增加土壤全氮的储量^[6],而单施化肥后,土壤全氮含量及氮储量呈现出缓慢增加,但差异不显著^[11];秸秆还田能够降低土壤容重,增加土壤氮含量,与此同时也会加剧病虫害并且秸秆腐解会释放化感物质产生自毒作用^[12-13]。总的来说,在棉花长期连作的过程中,利与弊共存。前人关于连作对土壤养分、理化性状等方面的影响已经做了一些研究^[14-15],但新疆绿洲棉花长期的连作后,棉田土壤中的氮储量是否已经达到饱和?关于这方面的研究报道较少。因此,本研究以 30 年土壤长期连作定位试验为背景,探讨新疆绿洲连作棉田土壤氮储量的变化,从而阐明棉花长期连作对土壤的持续供氮能力的影响,为衡量和评价长期连作对土壤质量和肥力的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验小区位于石河子大学农学院试验站(86°03'E,45°19'N)长期连作定位试验田。海拔 443 m,年平均日照时间达 2 865 h,大于 10℃积温为 3 480℃,无霜期 160 d,年平均降水量 208 mm,平均蒸发量 1 660 mm,属温带大陆性气候,光照资源丰富而降雨稀少,温度日差较大,为典型的绿洲灌溉农业区。供试土壤为壤土。

1.2 田间试验设计

本试验在石河子大学农学院试验站棉花长期连作定位试验田进行,设有连作 1、5、10、15、20、25 年和 30 年棉田连作小区,共计 7 个处理,每个处理 3 次重复,每个小区面积 1.5 m×1.5 m。每年秋季棉花收获后将全部秸秆(平均 7 000 kg·hm⁻²)用铡刀切成 5~8 cm,

即模拟大田生产棉花秸秆机械还田方式,入冬前结合施化肥翻入耕层,然后冬灌种植的棉花品种为“新陆早 46 号”,按“30+60+30”宽窄行距配置,采用膜下滴灌,2004 年 4 月 20 日播种,留苗密度为每公顷 19.8 万株,7 月 9 日打顶。全生育期滴灌 11 次,滴灌总量 5 400 m³·hm⁻²,共施纯氮 495 kg·hm⁻²,30%作基肥,其余随水追施尿素 753 kg·hm⁻²,磷酸二氢钾 10 kg·hm⁻²。其他管理措施同一般大田管理。

1.3 样品采集及测定方法

于 2014 年棉花播种前采集土壤样品,在每个小区用土钻分 3 个层次取样,每 20 cm 一个层次,取样深度 0~60 cm。自然风干后,磨细,过 0.15 mm 筛,用于测定全氮。

土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤容重采用环刀法取样,105℃烘干测定。

1.4 数据处理及计算

土壤剖面第 i 层土壤的氮平均密度 ρ_m (kg·m⁻³)= $\rho_i \times N_i \times 10$

式中: ρ_i 为相应层次土壤容重(g·cm⁻³); N_i 为土壤全氮含量(g·kg⁻¹)。

土壤全氮储量计算公式:

$$STN_s = \sum_{i=1}^n (N_i \times \rho_i \times T_i) \times 10^{-1}$$

式中: STN_s 为特定深度的土壤全氮储量(t·hm⁻²); N_i 为第 i 层土壤的全氮含量(g·kg⁻¹); ρ_i 为第 i 层土壤容重(g·cm⁻³); T_i 为第 i 层土壤厚度(cm); n 为土层数。

运用 Excel 2007 及 SPSS 19.0 对实验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同连作年限土壤容重和全氮含量的变化

如图 1 所示,新疆绿洲棉花经过连年的种植,土壤容重在 1.19~1.50 g·cm⁻³,而且随着土层深度的增加,不同连作年限棉田的土壤容重均逐渐增大。相同土层不同连作年限条件下,随着棉花连作年限的增加,各层土壤容重均表现为 1 年>5 年>10 年>15 年>20 年>25 年>30 年,与 1 年相比,30 年 3 个土层容重分别降低了 10.35%、12.14%、12.08%。

新疆绿洲棉区土壤全氮在棉花连作过程中时间和空间(垂直)方向表现出不同的差异,随连作时间的延长土壤全氮含量呈增加趋势,而同一连作年限土壤全氮含量随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势(图 2)。

相对于 1 年棉田而言,连作 30 年在 0~20 cm 土壤全氮含量增加了 241.07%,20~40 cm 增加了 259.67%,40~60 cm 增加了 276.44%。虽然新疆绿洲长期连作棉田配合的秸秆还田技术,可有效地提高土壤全氮含量,但增加的程度不同;随深度的增加,全氮增加的程度有所降低,土壤全氮含量在 0~60 cm 深度 3 个土层均有增加。棉花连作初期(<5 年) 0~60 cm 深度土壤全氮含量都有一个明显的增加的过程,随后 5~10 年土壤全氮含量在 20~40 cm 深度增加较为明显,最后,25~30 年土壤全氮含量增加较为缓慢。

2.2 土壤容重和全氮含量之间的关系

由于随着连作年限的增加,各土层的土壤容重在逐渐降低,而土层的全氮含量却在逐渐增加,为了确定土壤容重和全氮含量是否存在一定的负相关关系,通过将不同连作年限的土壤容重和全氮含量进行负指数线性拟合(图 3),结果表明,二者之间存在极显著的负相关关系, R^2 为 0.981,说明通过连年的种植棉花,棉田土壤的物理性质和化学物质含量均发生了变化。

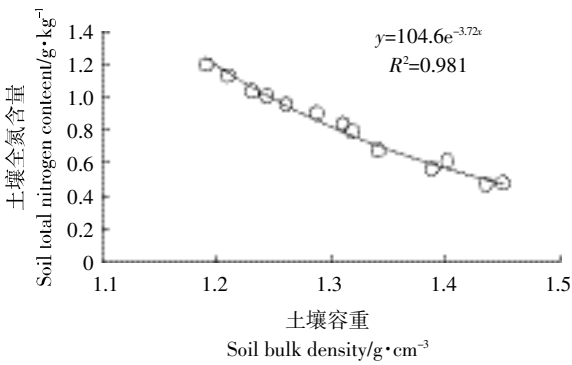


图 3 土壤容重与全氮含量的关系

Figure 3 Relationships between soil bulk density and soil total nitrogen content

2.3 不同连作年限土壤氮密度的分布特征

总体上,随着深度的增加,不同连作年限棉田的土壤氮密度都表现出逐渐降低的趋势。在不同土层中,随着连作年限的增加,土壤氮密度都表现出逐渐增加的趋势(图 4)。就具体表现而言,不同土层土壤氮密度的显著增加时期和缓慢积累时期不同。0~20 cm 土层中,随着连作年限的增加,土壤氮密度表现出

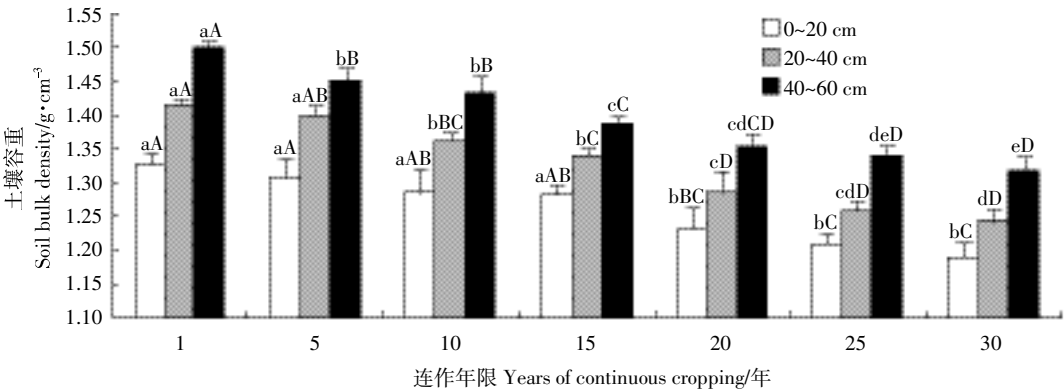


图 1 不同连作年限棉田土壤容重的变化

Figure 1 Soil bulk density in the different years of continuous cropping cotton field

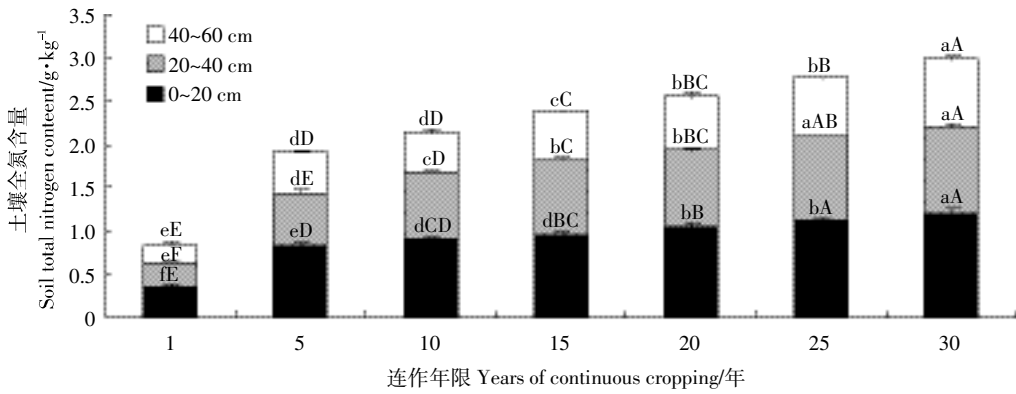


图 2 不同连作年限棉田土壤全氮含量的变化

Figure 2 Soil total nitrogen content in the different years of continuous cropping cotton field

了先显著增加期(<5 年),随后的缓慢积累时期(>5 年),40~60 cm 土层的土壤氮密度亦有相似的规律。但在 20~40 cm 土层中,虽然土壤氮密度在 5 年显著增加,但这种显著增加时期延续到了 10 年,随后才表现出缓慢的积累时期。另外,连作 30 年的棉田土壤各深度氮储量均为 1 年的 3 倍,并且连作 5~30 年棉田的土壤各深度氮密度均大于 1 年。

2.4 不同连作年限土壤氮储量的分布特征

虽然连作 30 年的棉田 0~60 cm 土壤全氮储量显著大于 1 年的棉田($P<0.05$),但不同连作年限棉田 0~60 cm 深土壤全氮储量随时间延长有增加的趋势(图 5)。长期连作棉区土壤-植被的演变,增加了 0~60 cm 土层的氮储量,并且导致了不同年限的棉田土壤氮储量的差异。连作 30 年的棉田 0~60 cm 土壤全氮储量显著高于 1 年的棉田,但就土壤 0~20 cm 全氮储量占总剖面比例来看,30 年的比例为 37.88%,1 年的比例为 40.70%,即连作 30 年的棉田 0~20 cm 全氮储量占总剖面比例低于 1 年的棉田。从整个剖面的氮储量分布比例看,不同连作年限的棉田都具有极为相似的格

局,即浅层的土壤氮储量占较大比例,而深层土壤占得比例较小,并且这种趋势随棉花的长期连作而有增加的趋势。

与 1 年土壤氮储量($2.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,连作 5、10、15、20、25 年和 30 年,0~60 cm 土层全氮储量分别增加了 128.70%、158.18%、174.82%、206.85%、223.59% 和 240.87%,而且连作时间越长,0~60 cm 深土壤全氮储量增加量越大。从不同土层来看,0~60 cm 土壤全氮储量在不同土层的分配 0~20 cm 占 0~60 cm 的比例最大,0~20 cm 占 0~60 cm 的比例在 1~30 年分别为 40.7%、41.57%、39.82%、39.5%、38.01%、37.53% 和 37.88%,而 40~60 cm 占 0~60 cm 的比例最小,40~60 cm 占 0~60 cm 的比例在 1~30 年分别为 26.31%、27.22%、22.61%、24.01%、26.73%、25.92% 和 28.26%。

全氮储量的增长率不同,在 0~20 cm,随着连作年限的增加,土壤氮储量的增长率在缓慢增加,在 20~40 cm,随着连作年限的增加,土壤氮储量的增长率表现出先明显增加(<10 年),随后缓慢增加(10~25 年),最后达到稳定的趋势。40~60 cm,随着连作年限

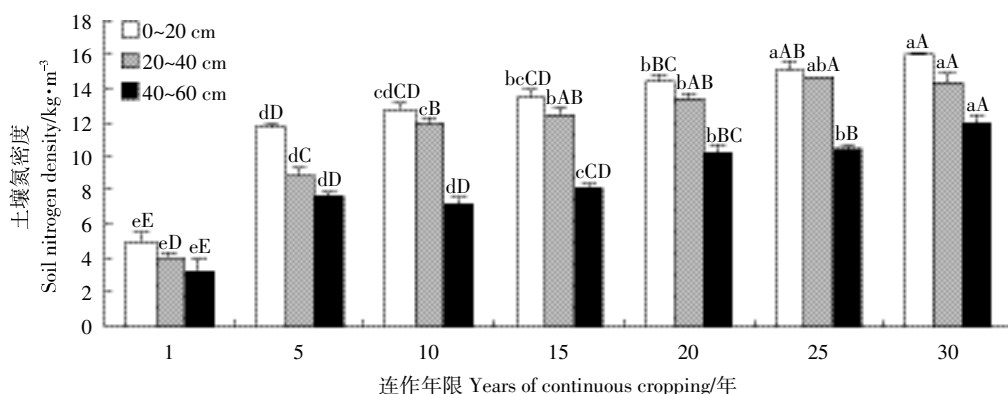


图 4 不同连作年限土壤氮密度的分布特征

Figure 4 Distribution characteristics of soil nitrogen density in the different years of continuous cropping

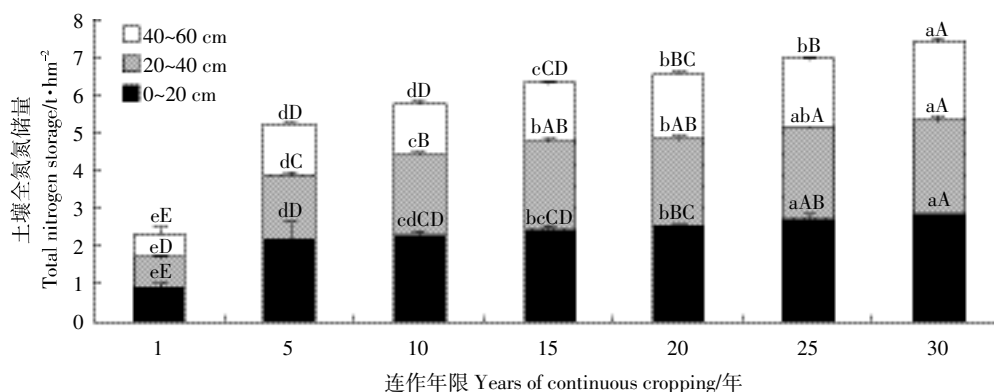


图 5 不同连作年限土壤全氮 0~60 cm 储量

Figure 5 Soil total nitrogen storage of 0~60 cm depth in the different years of continuous cropping

的增加,土壤氮储量的增长率表现出先缓慢降低,随后显著增加,接着缓慢增加并积累,最后又显著增加的趋势。

2.5 土壤氮分层比率

图 6 显示了土壤氮的分层比率。可以发现,在连作 1 年土壤,0~20 cm 与 20~40 cm 以及 0~20 cm 与 40~60 cm 层次之间的单位深度氮储量比率分别为 1.17 和 1.48。随着连作年限的增加,5、10、15、20、25、30 年棉田 0~20 cm 与 20~40 cm 的单位深度氮储量比率分别降低至 1.29、1.09、1.05、1.10、1.13 和 1.13,0~20 cm 与 40~60 cm 的单位深度氮储量比率分别降低至 1.59、1.74、1.57、1.49、1.51 和 1.36。

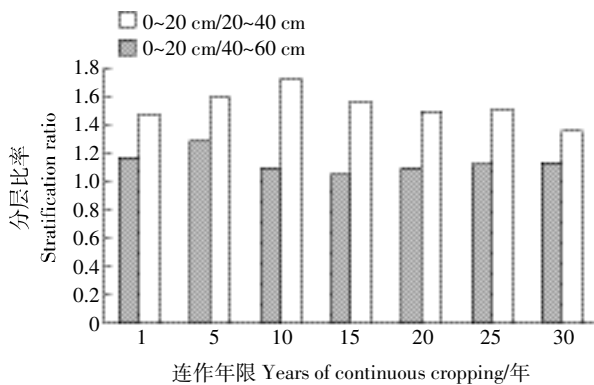


图 6 单位深度土壤氮储量的分层比率

(0~20 cm/20~40 cm 和 0~20 cm/40~60 cm)

Figure 6 Stratification ratios (0~20 cm/20~40 cm and 0~20 cm/40~60 cm) for soil N stocks per unit depth

2.6 土壤全氮储量增长速率

由图 7 可以看出,0~60 cm 土层氮储量增长速率的变化趋势表现为先下降后上升,最后趋于稳定。其中,连作初期(1~5 年)的土壤氮储量增长速率最高,16~20 年最低。在土壤氮储量增长速率降低阶段,连作 1~5、6~10、11~15 年和 16~20 年的 0~60 cm 土壤

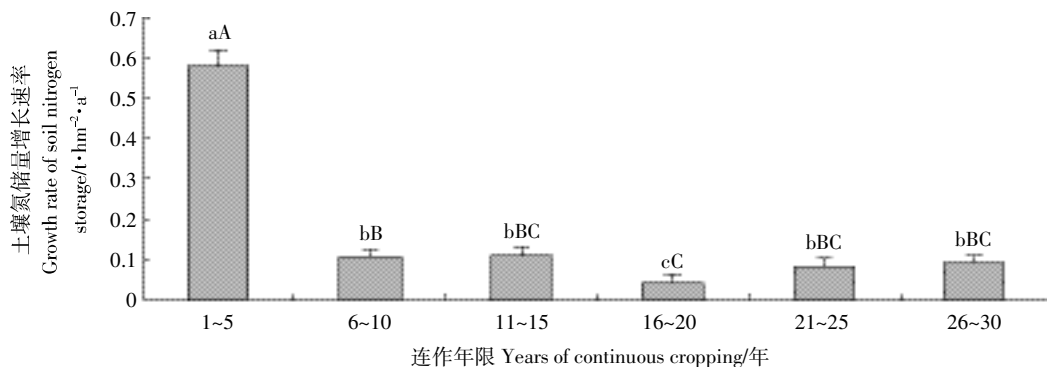


图 7 0~60 cm 土层不同连作年限土壤氮储量增长速率的变化

Figure 7 Growth rate of soil nitrogen storage of 0~60 cm depth in the different years of continuous cropping

氮储量增长速率分别为 0.58、0.11、0.11 t·hm⁻²·a⁻¹ 和 0.04 t·hm⁻²·a⁻¹,16~20 年期间的增长速率最低,比 1~5 年的增长速率减少了 92.57%。而 21~25 年期间,土壤氮储量的增长速率又逐渐增加,比 16~20 年增加了 91.89%;在 26~30 年期间,增长速率达到稳定,此时的增长速率为 0.09 t·hm⁻²·a⁻¹。

3 讨论

土壤容重是研究土壤氮储量的重要组成部分^[16]。棉花长期连作定位试验的结果显示,随着连作年限的增加,各土层的土壤容重在逐渐降低,其主要原因是棉花连作过程中伴随着秸秆还田和化肥对土壤容重的共同作用,连年的秸秆还田增加了作物残茬,而连年的施用化肥则增加了植物残体在土壤中的残留率^[17],使得土壤的生物活性增加,从而降低了土壤容重^[6]。祝丽香等^[14]研究发现,桔梗连作种植 2 年,其土壤容重明显高于正茬的土壤容重,连作 3~5 年后,土壤容重呈现出上升的趋势。而刘建国等^[15]研究棉花长期连作过程中配合秸秆还田技术,改善了土壤结构,降低了容重,与本研究结果一致。Gong 等^[18]报道河南丰丘长期定位肥料试验具有相似的结果,长期施用化肥与有机肥能够降低土壤的容重。本研究中棉花秸秆也属于有机肥,棉花连作过程中也会施用化肥,因此与 Gong 等^[18]的研究结果也有相似之处。

棉花长期连作过程中,相同土层的土壤全氮含量随着连作年限的增加而增加,这与范亚娜等^[19]的研究结果相似。这主要是由于棉花连作过程中伴随着秸秆还田和化肥对土壤全氮含量的综合作用。秸秆还田增加了土壤有机质的含量^[4],而土壤有机质和土壤全氮含量具有显著的正相关关系^[20-21],从而增加了土壤中的全氮含量;而施用氮肥也能显著提高土壤 0~60 cm 全氮含量^[22]。另外,经研究发现,土壤容重与土壤全氮含

量之间也存在着极显著的负相关关系,这与前人的研究结果完全一致^[23],长期连作配合秸秆还田,降低了土壤容重,从而增加了土壤的全氮含量。这是因为棉花连作导致土壤容重减小,降低了土壤的紧实度,增加了土壤中的氧气含量,这样就能减少土壤中嫌气性细菌将硝态氮转变为产生的 N_2O 和 N_2 向大气环境的排放,既减少了土壤中的氮素损失,又保护了大气环境。

土壤氮储量是反映土壤持续供氮能力的重要指标^[6],土壤容重和土壤全氮含量是土壤氮储量的 2 个重要参数。在棉花长期连作过程中,土壤容重减小,土壤全氮含量增加,从而导致土壤氮储量受到影响。经研究发现,随着连作年限的增加,土壤 0~60 cm 氮储量在逐渐增加,这可能是由于棉花长期连作过程中伴随的长期施用化肥和长期秸秆还田对土壤全氮含量的综合作用大于对土壤容重的影响,从而使得土壤 0~60 cm 氮储量在逐渐增加。

另外氮储量在各土层的垂直分布,研究结果不尽一致。贾晓红等^[24]研究表明固沙短期内(<16 年)土壤有机碳氮储量的明显增加主要集中在 0~20 cm,深层土壤(20~100 cm)氮储量无显著的增加趋势。而 Wu 等^[25]经过 28 年的禁止放牧,草场土壤氮储量的显著增加主要发生在 0~10 cm 土层中,但在前 8 年各土层的土壤氮储量没有明显变化。本试验的研究结果与前者相似,即 0~60 cm 土壤全氮储量在不同土层的分配 0~20 cm 占 0~60 cm 的比例最大,然而,0~20 cm 氮储量的增长率却不是一直保持最大。棉花经过 5~10 年的短期连作后,土壤氮储量在 3 个土层中(0~20、20~40 cm 和 40~60 cm)均有显著增加,0~20 cm 土壤氮储量的增长率最大,20~40 cm 次之,而随后的缓慢积累期,20~40 cm 土壤氮储量增长率超过了 0~20 cm,而 40~60 cm 土层的土壤氮储量在逐渐增加但较为缓慢。这说明棉花经过长期连作种植后,土壤深层(20~60 cm)的氮储量会逐渐增加。这是由于新疆棉花的根以质量计,主要分布在 0~20 cm^[26],灌水采用膜下滴灌技术,化肥是随水滴施到土壤表层,而 20~60 cm 土层的土壤容重较大,即土壤较为紧实。再加上新疆降雨量较少,平均蒸发量较大,这些综合因素导致土壤氮素在棉花短期连作期间下渗缓慢,土壤氮素累积在土壤表层(0~20 cm)。然而,棉花经过长期连作后,逐渐降低了各土层的土壤容重,改善了各土层的土壤空间结构,再加上连年的施用化肥和秸秆还田,不断地向土壤中施入氮素,导致土壤表层的氮素向下层迁移,使得土壤深层的氮储量不断增加。

新疆绿洲棉田长期连作过程中土壤全氮储量的时间和空间分布特征,强调了棉花的短期连作和长期连作对表土层及深层土壤乃至 0~60 cm 土层全氮储量产生了重要的影响。虽然新疆绿洲棉花的长期连作,削弱了棉花连作过程中土壤和大气氮交换源效应,但全氮储量的表聚性可能会导致大气氮的源效应从而削弱新疆绿洲棉田土壤氮的汇效应。土壤全氮储量在时间和垂直分布上的差异,究竟是土壤氮来源在时间和空间分布差异还是淋溶导致的结果还有待于进一步研究。

4 结论

(1)新疆绿洲棉花长期连作过程中,土壤全氮储量均呈增加趋势,但在不同年限增加的程度不同;棉花短期连作(5 年和 10 年) 0~60 cm 土壤全氮含量和全氮储量是一个明显的渐增过程,随后是一个缓慢增长的积累过程。从增长速率来看,0~60 cm 土壤氮储量的增长速率表现为先下降后上升高,最后趋于稳定的变化趋势。

(2)新疆绿洲棉花长期连作过程中,土壤全氮储量随深度增加有降低的趋势,并且表层土壤(0~20 cm)全氮储量均大于深层土壤(20~40 cm 和 40~60 cm); 0~60 cm 剖面土壤全氮储量表聚性随连作时间的增加而越来越明显。

(3)短期连作时期(5~10 年)土壤全氮储量的增加体现在 0~60 cm 各个深度,并且经过棉花长期连作后,土壤深层(20~40 cm)的氮储量会逐渐增加,但 40~60 cm 深度增加较缓慢。

参考文献:

- [1] 肖春艳, 贺玉晓, 赵同谦, 等. 退耕湿地典型植被群落土壤氮分布及储量特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 139-147.
XIAO Chun-yan, HE Yu-xiao, ZHAO Tong-qian, et al. Distribution and storage characteristics of soils nitrogen with different plant communities in the riparian wetland recovered from farmlands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 139-147. (in Chinese)
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [3] Fang Y T, Yoh M, Mo J M, et al. Response of nitrogen leaching to nitrogen deposition in disturbed and mature forests of southern China[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(1): 111-120.
- [4] Leip A, Marchi G, Koehler R, et al. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from arable soils in Europe[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(1): 73-94.
- [5] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen stor-

- age[J]. *Nature*, 1985, 317: 613–616.
- [6] 李双来, 胡 诚, 乔 艳, 等. 水稻小麦种植模式下长期定位施肥土壤氮的垂直变化及氮储量[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1334–1337.
- LI Shuang-lai, HU Cheng, QIAO Yan, et al. Vertical variation and storage of soil total nitrogen in long-term fertilizer experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1334–1337. (in Chinese)
- [7] Zhang W, Long X Q, Huo X D, et al. 16S rRNA-based PCR-DGGE analysis of actinomycete communities in fields with continuous cotton cropping in Xinjiang, China[J]. *Soil Microbiology*, 2013, 66(2): 385–393.
- [8] Zhang X H, Lang D Y, Zhang E H, et al. Diurnal changes in photosynthesis and antioxidants of *Angelica sinensis* as influenced by cropping systems[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(2): 252–258.
- [9] 魏 巍, 许艳丽, 朱 琳, 等. 长期连作对大豆根际土壤镰孢菌种群的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 497–504.
- WEI Wei, XU Yan-li, ZHU Lin, et al. Impact of long-term continuous cropping on the *Fusarium* population in soybean rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 497–504. (in Chinese)
- [10] 吴洪生, 杨筱楠, 周晓冬, 等. 磷石膏专用复混肥缓解红壤花生连作障碍效果[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 1006–1012.
- WU Hong-sheng, YANG Xiao-nan, ZHOU Xiao-dong, et al. Effects of phosphogypsum-containing mixed fertilizer on peanut growth and restoration of soil fertility of continuous monocropping in red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 1006–1012. (in Chinese)
- [11] 高晓宁, 韩晓日, 战秀梅, 等. 长期不同施肥处理对棕壤氮储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 567–572.
- GAO Xiao-ning, HAN Xiao-ri, ZHAN Xiu-mei, et al. Effect of long-term fertilization on total nitrogen storage in a brown soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3): 567–572. (in Chinese)
- [12] Liu J G, Li Y B, Jiang G Y, et al. Allelopathic effect of cotton under continuous cropping[J]. *Allelopathy Journal*, 2008, 21(2): 146–151.
- [13] 李彦斌, 刘建国, 程相儒, 等. 秸秆还田对棉花生长的化感效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4942–4948.
- LI Yan-bin, LIU Jian-guo, CHENG Xiang-ru, et al. The allelopathic effects of returning cotton stalk to soil on the growth of succeeding cotton[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4942–4948. (in Chinese)
- [14] 祝丽香, 霍学慧, 孙洪信, 等. 桔梗连作对土壤理化性状和生物学性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 177–181.
- ZHU Li-xiang, HUO Xue-hui, SUN Hong-xin, et al. Effects of continuous cropping of platycodon grandiflorus on the soil physical-chemical properties and biological properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 177–181. (in Chinese)
- [15] 刘建国, 张 伟, 李彦斌, 等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 725–733.
- LIU Jian-guo, ZHANG Wei, LI Yan-bin, et al. Effects of long-term continuous cropping system of cotton on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in oasis in Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 725–733. (in Chinese)
- [16] 陈安磊, 谢小立, 文苑玉, 等. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 5059–5065.
- CHEN An-lei, XIE Xiao-li, WEN Wan-yu, et al. Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 5059–5065. (in Chinese)
- [17] 李海波, 韩晓增, 王 风. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 384–388.
- LI Hai-bo, HAN Xiao-zeng, WANG Feng. Review of soil carbon and nitrogen cycling under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 384–388. (in Chinese)
- [18] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in north China plain[J]. *Plant and Soil*, 2009, 314(1–2): 67–76.
- [19] 范亚娜, 赵国栋. 陇东地区设施蔬菜连作土壤性质变化趋势[J]. *水土保持学报*, 2007, 27(6): 116–119.
- FAN Ya-na, ZHAO Guo-dong. Changing trend of soil physical and chemical properties under continuous vegetable cultivation in Long-dong region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6): 116–119. (in Chinese)
- [20] 苗 娟, 周传艳, 李世杰, 等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 625–631.
- MIAO Juan, ZHOU Chuan-yan, LI Shi-jie, et al. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 625–631. (in Chinese)
- [21] 邹 焱, 苏以荣, 路 鹏, 等. 洞庭湖区不同耕种方式下水稻土壤有机碳、全氮和全磷含量状况[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 671–674.
- ZOU Yan, SU Yi-rong, LU Peng, et al. Contents of paddy soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different cultivation ways in Dongting Lake region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 671–674. (in Chinese)
- [22] 杜建军, 李生秀, 李世清, 等. 不同肥水条件对旱地土壤供氮能力的影响[J]. *西北农业大学学报(自然科学版)*, 1998, 26(6): 1–5.
- DU Jian-jun, LI Sheng-xiu, LI Shi-qing, et al. The effects of different fertilizer and water conditions on N-supplying capacities in dryland soil[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 1998, 26(6): 1–5. (in Chinese)
- [23] 苗 蕾, 孙玉军, 杨喜田, 等. 太行山南麓 3 种典型人工林土壤碳氮分布特征[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(1): 52–56.
- MIAO Lei, SUN Yu-jun, YANG Xi-tian, et al. Distribution characteristics of carbon and nitrogen in soil of three typical artificial forests in southern foot of Taihang Mountains[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(1): 52–56. (in Chinese)
- [24] 贾晓红, 李新荣, 周玉燕, 等. 干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(3): 938–945.
- JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, et al. Storages and distributed patterns of soil organic carbon and total nitrogen during the succession of artificial sand-binding vegetation in arid desert ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 938–945. (in Chinese)
- [25] Wu L, He N, Wang Y, et al. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil after grazing exclusion in *Leymus chinensis* grasslands of northern China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 37(2): 663–668.
- [26] 闵 伟, 侯振安, 冶 军, 等. 灌溉水盐度和施氮量对棉花根系分布影响研究[J]. *棉花学报*, 2014, 26(1): 58–65.
- MIN Wei, HOU Zhen-an, YE Jun, et al. Effects of water salinity and nitrogen rate on cotton root spatial distribution under drip irrigation with saline water[J]. *Cotton Science*, 2014, 26(1): 58–65. (in Chinese)