

枣粮间作生态系统土壤氮空间分布特性

尹 飞^{1,2,3}, 毛任钊², 傅伯杰^{1,*}, 陈明灿³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021; 3. 河南科技大学, 洛阳 471003)

摘要: 基于枣粮间作复合生态系统内部异质性, 通过在不同位置采样测定, 探讨了枣粮间作系统内土壤氮素空间分布特性。结果表明: (1) 枣粮间作生态系统中, 在小麦收获期和玉米收获期两个时期, 土壤全氮和硝态氮含量均存在明显的垂直和水平两个方向空间变异性。而土壤铵态氮含量极低且没有明显的空间变异; (2) 与全氮相比, 枣粮间作系统中硝态氮空间变异性更强, 且随着时间变化其空间分布特性有明显变化; (3) 氮素施用量对土壤全氮和硝态氮空间变异有正向作用, 而植株对氮的吸收利用可以降低土壤氮素分布空间差异程度。各因子对土壤全氮空间变异影响强弱顺序为氮吸收量 > 氮素施用量 > 土壤含水量; 对土壤硝态氮空间变异影响强弱顺序为氮素施用量 > 土壤全氮含量 > 氮素吸收量 > 土壤含水量。

关键词: 枣粮间作; 全氮; 硝态氮; 分布; 空间异质性

文章编号: 1000-0933(2009)01-0325-07 中图分类号: Q147, S314, S665.1 文献标识码: A

Spatial distribution of soil nitrogen in a jujube-crop intercropping ecosystem

YIN Fei^{1,2,3}, MAO Ren-Zhao², FU Bo-Jie^{1,*}, CHEN Ming-Can³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China

2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang 050021, China

3 Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0325 ~ 0331.

Abstract: The widely cultivated jujube-crop intercropping ecosystem (JCIE) is an important pattern of agro-forestry in North China. The spatial distribution of soil nitrogen in this system has not been well documented yet. In order to understand the spatial heterogeneity of this intercropping system, an experiment was carried out at Dashujin village, Nanpi County, Hebei Province during 2005–2006. Soil samples were collected from different sites in JIE, i. e. 0.25 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4.5 m, and 6.5 m away from the jujube row, in five successive soil depths, i. e. 0–20, 20–40, 40–60, 60–100 and 100–150 cm, to determine the spatial distribution of soil total nitrogen (TN), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$). The results showed that both horizontal and vertical variances of the distribution for soil TN and $\text{NO}_3\text{-N}$ in JIE were significant at harvest of wheat and maize. However, no spatial variance was found for the distribution of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$. The variance in soil $\text{NO}_3\text{-N}$ was greater than that in TN and the characteristics of their spatial variance was also different. Along the 0–150 cm soil profile, soil TN first decreased, then increased with the increase in soil depth. The lowest soil TN concentration occurred in 60–100 cm soil layer. The characteristics of spatial variance of $\text{NO}_3\text{-N}$ were more complex than that of TN. Within 2 m (at wheat harvest) or 3 m (at maize harvest) to the jujube tree row, soil $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration was the highest at 40–60 cm, then it decreased with the increase in soil depth. The variance of $\text{NO}_3\text{-N}$ was greater closing to jujube row, whereas TN was more consistent. The results showed that fertilizer application positively affected the horizontal variance of soil TN and $\text{NO}_3\text{-N}$, while N uptake had a negative effect on it. N uptake, followed by N application rate and soil water content, was important factors influencing the spatial variance of soil TN. To the spatial

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121106); 国家自然科学基金资助项目(40621061)

收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2008-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@mail.rcees.ac.cn

variance of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$, order of the influencing factors in importance was N application rate > soil TN concentration > N uptake > soil water content.

Key Words: jujube-crop intercropping ecosystem; total nitrogen; nitrate nitrogen; distribution; spatial heterogeneity

枣粮间作复合生态系统是我国主要的农林间作复合生态系统模式之一^[1],在华北有着广泛的分布,在盐碱、干旱等贫瘠土壤条件地区的生态环境建设中具有十分重要的生态意义^[2]。氮素是植物必需的3大营养元素之一,对植物的生长发育具有重大影响。前大量的研究表明,氮素营养不但对作物的生长发育和产量作用显著,而且对农产品的品质也有着显著影响^[3~5]。无机氮中的硝态氮还是一种重要的环境污染物质,它引起的地下水污染问题已成为一个全球性问题,成为全世界生态学家重点关注的焦点问题^[6~8]。平衡施肥是解决农业发展与环境保护的一条有效途径,对农业用地土壤氮状况进行科学认识是平衡施肥的前提。但前人对于枣粮间作这种高度异质性复合生态系统土壤氮空间分布特性的研究还鲜见报道。本文通过研究枣粮间作系统土壤全氮、硝态氮和铵态氮的空间分布特性,以期为正确、全面地认识枣粮间作生态系统氮素营养状况,科学地进行氮肥管理,实现枣粮间作系统可持续管理提供依据,为其它农林间作模式的可持续管理研究做出有益的探索。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况和采样点设置

试验于2005~2006年在河北省南皮县大树金村进行。试验区属暖温带半干旱季风气候,年平均降水量550.0mm(74%分布在6~8月份),年平均蒸发量2138.6mm,年均气温12.3℃。本试验选用的枣粮间作生态系统(jujube/crop intercropping ecosystem, JCIE)带宽15m,单枣行南北向种植,枣树(*Ziziphus jujube* Mill)株距3m。枣粮间作作物为小麦(*Triticum aestivum* L.)和玉米(*Zea mays* L.)。小麦品种为石家庄8号,2005年10月9日播种,2006年6月10日收获,播量 270kg hm^{-2} ,麦枣间距1.15m,小麦行距15cm。玉米品种为郑单958,于2006年6月14日播种,9月22日收获,播量 37.5kg hm^{-2} ,玉米枣间距2.2m,玉米行距60cm,株距25cm。

枣粮间作生态系统中,在枣树种植行两侧不同距离处设置采样点,具体为:距枣树0.25、1、2、3、4.5m和6.5m。重复3次。

1.2 田间肥料管理

在小麦播种区内,于2005年10月6日施用 450kg hm^{-2} 磷酸二铵(N18,P46)做基肥,2006年4月8日追施 450kg hm^{-2} 尿素(N46.4)。2006年6月14日在玉米播种区内施用 150kg hm^{-2} 磷酸二铵, 300kg hm^{-2} 尿素。枣树在4月10日追肥,每株穴施1.1kg枣树专用肥(N13,P15,K12),0.55kg尿素。施深30cm,施用点为枣树基部0.5m范围内。

1.3 土样采集及预处理

分别于2006年6月11日(小麦收获期)和9月24日(玉米收获期),在各采样点进行采样。距枣树0.25m处样点避开枣行施肥点,并且不同采样时期各采样点处的具体采样位置之间在平行于枣树种植行方向上间隔20cm。土壤样品用土钻分层钻取,即按0~20cm(L1)、20~40cm(L2)、40~60cm(L3)、60~100cm(L4)和100~150cm(L5)分5层采集。

采集的每个土样经充分混匀后都分成2部分保存。一部分(大约100g)装入密封袋中,并尽快置于-20℃冰箱中保存,用于无机氮的测定;另一部分(大约200g)装入布制的采样袋中自然风干,而后研磨并通过0.149mm筛,用于土壤全氮的测定。

1.4 测定方法

(1)土壤全氮的测定 土壤全氮含量用凯氏法进行测定^[9]。

(2) 土壤无机氮的测定 称取 12g 新鲜土样,用 100ml 0.01mol L⁻¹ CaCl₂ 溶液振荡浸提 1h 后进行过滤,浸提液用全自动流动分析仪(FS-IV, O. I., Analytical, USA)测定无机氮(可同时测定硝态氮和铵态氮)。同时,另取 35~40g 土样立即测定土壤含水量用于土壤无机氮含量的校正^[10]。

1.5 数据分析

各土层硝态氮浓度([NO₃⁻]_i)和铵态氮浓度([NH₄⁺]_i)分别按公式(1)和(2)进行计算:

$$[\text{NO}_3^-]_i = \frac{[\text{NO}_3^-]'_i}{(1 - \text{RWC}_i)} \quad (1)$$

$$[\text{NH}_4^+]_i = \frac{[\text{NH}_4^+]'_i}{(1 - \text{RWC}_i)} \quad (2)$$

式中,[NO₃⁻]'_i和[NH₄⁺]'_i分别代表用流动分析仪测定出的各土层鲜土样中硝态氮和铵态氮浓度,RWC_i代表该土样的相对含水量。实验数据用 Microsoft Excel 2000、SPSS 13.0 和 DPS 数据处理系统进行统计分析,置信水平为 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤全氮空间分布特性

2.1.1 小麦收获期土壤全氮空间分布特性

从图 1 可以看出,枣粮间作生态系统土壤全氮含量在垂直和水平方向上都具有明显的空间变异性。从垂直方向看,在 0~100cm 土层中,全氮含量随土层深度增加呈逐渐降低趋势,而 100~150cm 土层中土壤全氮含量又有所回升。0~20cm 土层全氮含量最高,60~100cm 土层中最低。

从水平方向上看,不同土层全氮含量变化趋势不尽相同。0~20cm 土层全氮含量随距枣树种植行距离的增加,呈先升高后降低的趋势,最高值出现以 3m 样点处,最低值出现在 0.25m 样点处。而 20~150cm 各土层全氮含量总体上随距枣树种植行距离的增加而降低,其中以 60~100cm 土层全氮含量降低最为明显。以上变化表明,枣行对其附近区域不同土层全氮含量具有不同的影响,它降低了 0~20cm 土层全氮含量,同时增加了下层土壤中全氮含量,呈现出土壤全氮由 0~20cm 土层向下部土层迁移的趋势。并且,枣树种植行对土壤全氮空间分布的影响程度随着距枣行距离的增加而逐渐减弱。

2.1.2 玉米收获期土壤全氮空间分布特性

与小麦收获期相似,在玉米收获期各土层全氮也呈现出垂直和水平方向空间变异特性(图 2)。垂直方向上,0~20cm 土层全氮含量最高,在 0~100cm 土壤深度内随土层深度增加而明显降低,而后在 100~150cm 土层中又有明显升高。水平方向上,0~20cm 土层全氮含量随着距枣树种植行距离增加先升高后降低,最大值

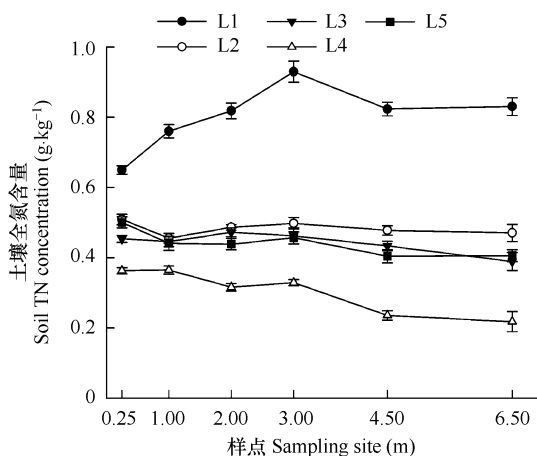


图 1 小麦收获期各土层土壤全氮空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of TN in various soil layers at wheat harvesting in JCIE

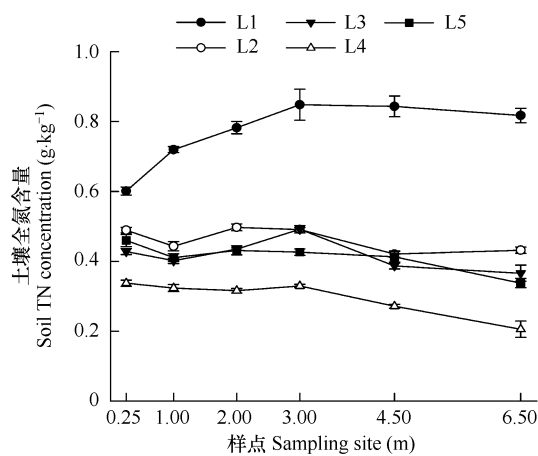


图 2 玉米收获期各土层土壤全氮空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TN in various soil layers at maize harvesting in JCIE

位于 3m 样点处,最小值位于 0.25m 样点处。下部土层全氮含量总体上随着距枣行距离增加而呈降低趋势。

以上分析表明,虽然与小麦收获期相比,玉米收获期土壤全氮有所降低,但土壤全氮空间分布特征以及枣树种植行对土壤全氮空间分布的作用特点没有发生大的变化。

2.2 土壤硝态氮空间分布特性

2.2.1 小麦收获期土壤硝态氮空间分布特性

2006 年小麦收获期,枣粮间作生态系统各土层土壤硝态氮含量分布状况如图 3 所示。从图 3 可以看出,枣粮间作生态系统土壤硝态氮含量具有明显的垂直和水平方向上空间差异性。

垂直方向上变化情况在不同样点间存在较大差别。0.25 ~ 2m 样点土壤硝态氮含量在 0 ~ 150cm 剖面上随着土层深度的增加而明显升高。3 ~ 6.5m 样点土壤硝态氮含量在 0 ~ 60cm 土层中随着土层深度的增加明显增加,而后随着土层深度的增加呈现降低趋势,40 ~ 60cm 土层中硝态氮含量最高,0 ~ 20cm 土层中硝态氮含量最低。同时,不同样点硝态氮在垂直方向上的差异程度有明显差别。总体上看,距枣树种植行越近,硝态氮在不同土层中变异程度越大。0.25m 样点各土层硝态氮最大值与最小值相差 60.2 mg kg^{-1} ,而 6.5m 样点各土层硝态氮最大值与最小值仅相差 3.0 mg kg^{-1} 。

水平方向上变化情况因不同土层而异。100 ~ 150cm 土层土壤硝态氮含量随着距枣树种植行距离的增加迅速降低。60 ~ 100cm 土层硝态氮含量从距枣树种植行 0.25m 到 2m 逐渐降低,从 2m 到 3m 有明显增加,而后随着距枣树种植行距离增加再次呈现下降趋势。0 ~ 60cm 土层硝态氮含量总体上随着距枣树种植行距离增加呈现出先增加后降低的趋势,最高值位于 3m 样点处。同时,不同土层硝态氮含量在水平方向上的变异程度不同。100 ~ 150cm 土层硝态氮含量变异程度最大,6.5m 样点与 0.25m 样点相比,土壤硝态氮含量下降了 56.3 mg kg^{-1} ,下降幅度达到 85.5%。0 ~ 100cm 土层中硝态氮含量水平方向上变异程度较低,特别是 0 ~ 20cm 土层硝态氮含量低且均匀。

2.2.2 玉米收获期土壤硝态氮空间分布特性

从图 4 可以看出,玉米收获期各土层硝态氮分布具有明显的空间差异性。在垂直方向上,不同样点硝态氮变化趋势有所差别。0.25 ~ 3m 样点在 0 ~ 150cm 剖面上,随着土层深度增加,硝态氮含量迅速增加。4.5m 和 6.5m 样点硝态氮含量随着土层深度增加呈现先增加后降低的变化趋势,最大值出现在 40 ~ 60cm 土层。同时,各样点土层间硝态氮含量差异程度随着距枣树种植行距离的增加而明显减小。以 0.25m 和 4.5m 两个样点为例,各土层硝态氮含量最大值和最小值相差分别为 76.0 mg kg^{-1} 和 5.0 mg kg^{-1} ,表明枣行提高了土壤硝态氮含量在土壤剖面上的变异程度,且影响强度随着距枣树种植行距离增加而减弱。

玉米收获期硝态氮含量在水平方向的变化趋势因土层不同而不同。60 ~ 100cm 土层硝态氮含量均随着

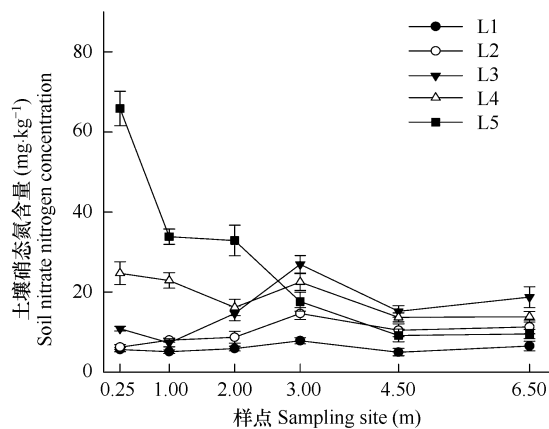


图 3 小麦收获期各土层土壤硝态氮空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of nitrate nitrogen in various soil layers at wheat harvesting in JCIE

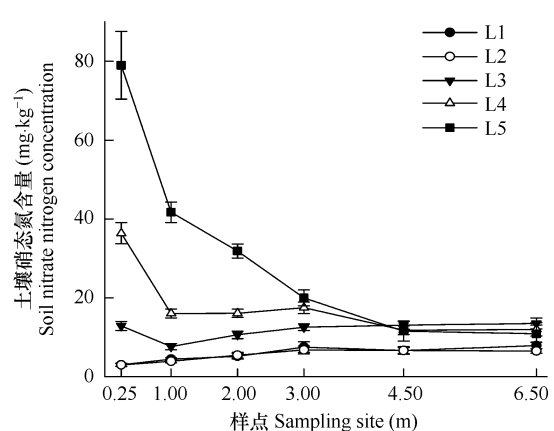


图 4 玉米收获期各土层土壤硝态氮空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of nitrate nitrogen in various soil layers at maize harvesting in JCIE

距枣树种植行距离的增加而迅速降低,0~60cm 土层硝态氮含量在水平方向上变化不大,总体上随着距枣树种植行距离的增加而略有增加。表明下部土层硝态氮含量空间分布状况受枣行的影响较大。

与小麦收获期相比,玉米收获期 0.25m 和 1m 样点 0~60cm 土层硝态氮含量稍有增加,平均增加 1.37 mg kg⁻¹,而 100~150cm 土层硝态氮含量有较大升高,分别为 13.9 mg kg⁻¹和 7.9 mg kg⁻¹,说明枣行近周土壤中硝态氮在玉米生育期内有淋溶的趋势。

2.3 土壤铵态氮空间分布特性

小麦及玉米收获期枣粮间作生态系统土壤铵态氮空间分布特性见图 5 和图 6。从图 5、图 6 可以看出,在小麦及玉米收获期,枣粮间作生态系统各土层土壤铵态氮含量均较低,均在 0.5~2.3 mg kg⁻¹之间,表明铵态氮在该试验区作物氮素营养方面作用不大。并且,各土层铵态氮在垂直和水平方向的空间分布没有显著差异性,空间分布较均一,受枣粮间作这种异质性生态系统的影响较小。

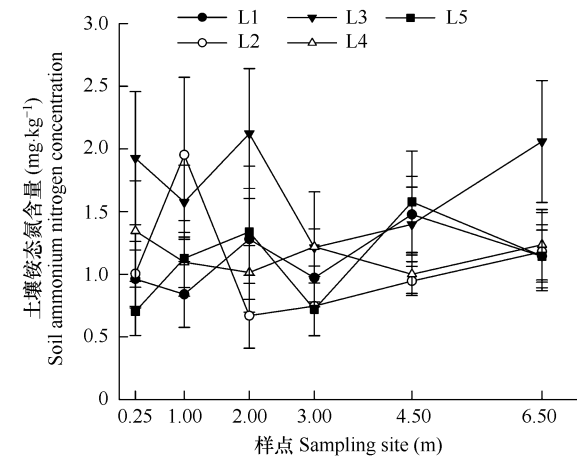


图5 小麦收获期各土层土壤铵态氮空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of ammonium nitrogen in various soil layers at wheat harvesting in JCIE

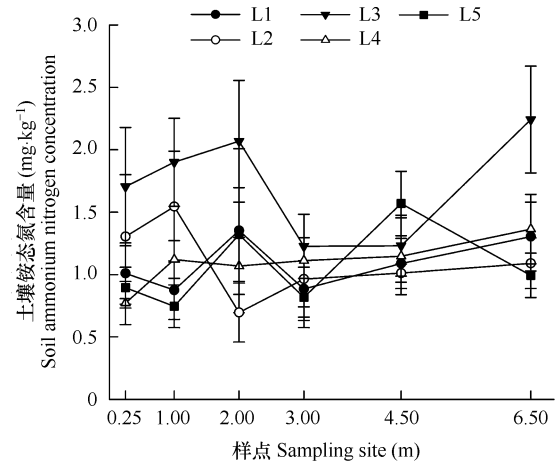


图6 玉米收获期各土层土壤铵态氮空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of ammonium nitrogen in various soil layers at maize harvesting in JCIE

2.4 土壤氮素空间分布特性影响因子通径分析

由于试验地枣粮间作系统中土壤铵态氮分布不存在明显的空间差异性,所以只对土壤全氮和硝态氮空间分布影响因子进行了分析,结果见表 1。

表 1 影响因子与土壤氮素水平变异通径分析
Table 1 Path analysis of influencing factors and horizontal variance of soil N

因变量 Dependent variable	影响因子* Influencing factor	直接通径系数 Direct path-coefficient	间接通径系数 Indirect path-coefficient				总通径系数 Total path-coefficient
			通过 path X1	通过 path X2	通过 path X3	通过 path X4	
全氮 Total N	X1	0.0999	—	—	0.1270	—	0.2269
	X2	0.4231	—	—	-0.1795	—	0.2436
	X3	-0.5244	0.0242	—	—	—	-0.5002 *
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	X1	0.1446	—	—	-0.1351	0.0346	0.0441
	X2	0.3005	—	—	0.4917	0.0621	0.8543 **
	X3	-0.2523	-0.0373	—	—	0.0134	-0.2762
	X4	0.2837	—	—	0.0248	—	0.3085

X1:土壤含水量 soil water content,X2:氮素施用量 N application rate,X3:氮素吸收量 N uptake,X4:土壤全氮含量 Soil TN concentration

对土壤全氮空间分布影响因子进行通径分析发现,3 个影响因子直接通径系数和总通径系数顺序均为氮吸收量^[11]>氮素施用量>土壤含水量。其中氮吸收量对土壤全氮空间分布变异程度有显著负向作用,而其

它 2 因素则加剧了土壤全氮空间变异。同时,土壤含水量主要是通过影响氮吸收来间接地影响土壤全氮空间分布变异性,而其它 2 因子主要是通过直接作用影响土壤全氮分布空间差异性。

土壤硝态氮分布空间差异性影响因子总通径系数顺序为氮素施用量 > 土壤全氮含量 > 氮素吸收量 > 土壤含水量。可见施用化学氮肥对枣粮间作系统土壤硝态氮分布空间差异性的影响要大于对土壤全氮分布的影响。氮素吸收量对土壤硝态氮空间变异有负向作用,而其它因子则表现出提高了土壤硝态氮空间变异程度。同时,氮素施用量主要通过影响植株对氮素吸收而间接对土壤硝态氮分布产生影响。

3 结论与讨论

3.1 土壤全氮空间分布

一般认为,农林复合生态系统中,林木可以通过从农作物根系分布范围以下的土层中吸收营养,然后通过林木剪枝,或林木凋落物的形式将养分归还于表层土壤,起到将下部土层养分“泵到”表土层的作用^[12~14]。这可以认为在林带附近区域,下层土壤的养分含量要低于林带间的养分含量,而上层土壤养分含量会高于林带间的养分含量。但本研究的结果却与此不同。研究表明枣树种植行 20cm 以下土层全氮含量高于枣树行间的全氮含量,而 0~20cm 土层全氮含量低于枣树行间全氮含量。此差别可能有两方面的原因。一是枣树本身形态生理特征因素的影响。枣树与绝大多数其它树种不同,它根系分布较浅。同时,并不是整个枣树根系都参与养分吸收,只有直径小于 0.1cm 的枣树根才有吸收功能^[15],而这部分根在枣树基部区域分布较少。二是枣粮间作生态系统田间管理措施的影响。枣树的叶片和枣吊的凋落时间比较集中,主要发生在枣果成熟后。而目前在当地,收获枣果主要是通过“打枣”的方式进行的。即在枣树两侧各铺宽度为 3m 左右的塑料膜,通过击打枣树干、枣树枝将枣果打落。这时,枣叶和枣吊基本上都会随着落下,但是,通常这些枣叶和枣吊都会被洒到枣行之间的作物生长区,所以出现了 0~20cm 土层全氮含量低于枣行间全氮含量的现象。

本研究表明枣粮间作生态系统中 0~20cm 土层全氮含量要显著高于 20cm 以下土层中全氮含量,这与吴刚等^[16]的研究结论不同。这可能与研究区域和研究对象不同有关。同时,田间管理措施的差别可能是此分歧产生的主要原因。在 20 世纪 90 年代初期,秸秆还田还不普及。当时,不仅农产品,而且大量的作物秸秆都被转移出系统,与此相伴而来的就是大量的养分从系统中输出,而这些养分主要来源于 0~20cm 的耕层土壤。而目前,本试验区域已经全面推行秸秆还田措施多年,相当一部分氮素归还于表层土壤,且现在氮肥施用量也比以前有了大幅度提高,所以,出现 0~20cm 土层全氮含量显著高于下层土壤的现象。

3.2 土壤速效氮空间分布

本研究表明在试验区枣粮间作生态系统中,0~150cm 土壤剖面硝态氮存在显著的空间变异性,而铵态氮含量较低且没有显著的空间变异性。在距枣树种植行 2m(小麦收获期)或 3m(玉米收获期)以内,硝态氮含量随土层加深而迅速增加,而其它样点则是先增加后降低,峰值出现在 40~60cm 土层。在整个枣粮间作系统中,0~20cm 土层中硝态氮含量远低于下层土壤。该结论与吴刚等^[16]试验结果相符。

在本研究中,0~60cm 各土层硝态氮含量随着距枣树种植行距离增加呈现出先增加后降低的变化趋势,峰值位于距枣行 3~4.5m 区域;60~150cm 各土层硝态氮含量总体上随着距枣树种植行距离增加而迅速降低。这与刘荣和朱清科^[17]研究结论不同。这可能主要与研究对象不同有关。在防护林型的农林间作生态系统中,很少对林木施用氮肥,所以靠近林带的地方土壤较林带内农田要瘠薄许多。但是在枣粮间作生态系统中,为了实现枣的优质丰收,每年都对枣行进行施氮管理,同时在枣树种植行两侧 1.15m 范围以内不种植间作作物,在 1.15~2.2m 范围内一年只种植一季小麦,这都减少了对硝态氮的吸收利用,致使距离枣树种植行越近,下层土壤中硝态氮含量越高。同时,枣树附近下部土层(特别是 100cm 以下土层)中较高含量的硝态氮会增加其淋溶的风险,增加氮的表现损失,这与尹飞等^[11]的结论相符。

3.3 土壤氮空间分布影响因素

本研究表明氮素施用量对土壤全氮和硝态氮空间变异有正向作用,而植株对氮的吸收利用可以降低土壤氮素分布空间差异程度。但如何通过调整氮施用量、氮肥田间管理措施以及采取适宜管理措施调整植株对氮

的吸收利用,来促进枣粮间作系统中氮素的合理分布、实现枣粮间作系统可持续管理有待进一步研究。

References:

- [1] Li W H, Lai S D. Agroforestry in China. Beijing: Science Press, 1994. 157 — 166.
- [2] Tong J X, Li X G, Dou C R, *et al.* The effect on environment and beneficial analysis of grain and jujube intercropping. Journal of Northwest Forestry University, 2003, 18(1): 89 — 91.
- [3] Dalal R C, Strong W M, Cooper J E, *et al.* Prediction of grain protein in wheat and barley in subtropical environment from available water and nitrogen in Vertisols at sowing. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1997, 37: 351 — 357.
- [4] Henning H J, Bea N, Stig M T. Productivity and quality, competition and facilitation of chicory in ryegrass/legume-based pastures under various nitrogen supply levels. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3): 247 — 256.
- [5] Read J J, Reddy K R, Jenkins J N. Yield and fiber quality of Upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3): 282 — 290.
- [6] Zhu J G, Liu G, Han Y, *et al.* Nitrate distribution and denitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation. Chemosphere, 2003, 50: 725 — 732.
- [7] Sánchez-Pérez J M, Antiguada I, Arrate I, *et al.* The influence of nitrate leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country: a case study. The Science of the Total Environment, 2003, 317: 173 — 187.
- [8] Basso B, Ritchie J T. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 108: 329 — 341.
- [9] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [10] Dilly O, Blume HP, Sehy U, *et al.* Variation of stabilized, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. Chemosphere, 2003, 52: 557 — 569.
- [11] Yin F, Mao R Z, Fu B J, *et al.* Horizontal variation of nutrient uptake and apparent loss in jujube/crop intercropping ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2715 — 2721.
- [12] Nair P K R, Kang B T, Kass D C L. Nutrient cycling and soil erosion control in agroforestry systems. In: Agriculture and Environment: Bridging Food Production and Environmental Protection. ASA Special Publ. 60. ASA Madison, 1995. 117 — 138.
- [13] Buresh R J, Tian G. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. Agroforestry Systems, 1997, 38(1-3), 51 — 76.
- [14] Makumba W, Janssen B, Oenema O, *et al.* The long-term effects of a gliricidia-maize intercropping system in Southern Malawi, on gliricidia and maize yields, and soil properties. Agriculture Ecosystems and Environment, 2006, 116: 85 — 92.
- [15] Liu H F, Liu M J. Investigation of the distribution of Jujube roots. Journal of Henan Vocation-Technical Teachers College, 1998, 26(1): 107 — 108.
- [16] Wu G, Feng Z W, Wang X K, *et al.* N, P and K recyclings in an agroforestry ecosystem of Huanghuaihai plain: with Paulownia elongata-intercropped wheat and maize as an example. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(2): 141 — 145.
- [17] Liu R, Zhu Q K. Preliminary survey of soil nutrients of agroforest systems in gully region of Loess Plateau. Journal of Northwest Forestry College, 1993, 8(2): 46 — 51.

参考文献:

- [1] 李文华, 赖世登. 中国农林复合经营. 北京: 科学出版社, 1994. 157 ~ 166.
- [2] 同金霞, 李新岗, 窦春蕊, 等. 枣粮间作的生态影响及效益分析. 西北林学院学报, 2003, 18(1): 89 ~ 91.
- [9] 鲍士旦(主编). 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 枣粮间作养分利用与表观损失空间差异性研究. 生态学报, 2008, 28(6): 2715 ~ 2721.
- [15] 刘荷芬, 刘明久. 枣树根系分布调查. 河南职技师院学报, 1998, 26(1): 107 ~ 108.
- [16] 吴刚, 冯宗炜, 王效科, 等. 黄淮海平原农林生态系统 N、P、K 营养元素循环. 应用生态学报, 1993, 4(2): 141 ~ 145.
- [17] 刘荣, 朱清科. 黄土残塬沟壑区混农林系统土壤养分研究初报. 西北林学院学报, 1993, 8(2): 46 ~ 51.