

种植模式对喀斯特山地农田土壤可溶性氮含量、组分及迁移的影响

杨成^{1*} 孟凡非¹ 彭艳¹ 崔丽芳¹ 刘涛泽² 罗绪强³

(¹贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ³贵州师范学院地理与资源学院, 贵阳 550018)

摘要 以贵州喀斯特山地 6 种不同种植模式农田土壤为对象, 研究种植模式对农田土壤可溶性氮含量、组分及迁移的影响。结果表明: 6 种不同种植模式农田土壤可溶性无机氮 (SIN)、可溶性有机氮 (SON) 和可溶性总氮 (TSN) 含量分别为 3.75~95.15、21.17~155.91 和 28.76~188.95 mg·kg⁻¹, 平均含量分别为 26.49、59.76 和 86.25 mg·kg⁻¹; 不同种植模式中 SIN 含量表现为葱-姜轮作>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-葱连作>葱-休耕>葱-水稻轮作, SON 含量表现为葱-葱连作>葱-姜轮作>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-休耕>葱-水稻轮作, TSN 含量表现为葱-姜轮作>葱-葱连作>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-休耕>葱-水稻轮作; 土壤 SON/TSN 的比例占 60% 以上, 最高可达 82.4%, 为农田土壤可溶性氮的主要组分; 6 种不同种植模式农田土壤 SIN 和 SON 含量在 0~60 cm 土层中, 表现为随着土层的增加而下降; 种植模式对农田土壤可溶性氮含量和组分有着显著影响, SON 为农田土壤氮流失的主要形态, 应引起重视。

关键词 可溶性有机氮; 种植模式; 土壤; 喀斯特地区

Effects of cropping patterns on the content, composition and migration of soluble nitrogen in cropland soil in karst region. YANG Cheng^{1*}, MENG Fan-fei¹, PENG Yan¹, CUI Li-fang¹, LIU Tao-ze², LUO Xu-qiang³ (¹College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; ²State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ³School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China).

Abstract: We examined the effects of six different cropping patterns on the content, composition and migration of soluble nitrogen in cropland soils in Guizhou karst region. The results showed that the contents of soil soluble inorganic nitrogen (SIN), soluble organic nitrogen (SON) and soluble total nitrogen (TSN) ranged from 3.75 to 95.15 mg·kg⁻¹, 21.17 to 155.91 mg·kg⁻¹ and 28.76 to 188.95 mg·kg⁻¹, with a mean value of 26.49, 59.76 and 86.25 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of SIN under different cropping patterns were as the following order: chive-ginger rotation land > chive-maize rotation land > chive-waterlogged and fallowed land > chive-chive continuous cultivation land > chive-fallowed land > chive-rice rotation land. For SON, the order was: chive-chive continuous cultivation land > chive-ginger rotation land > chive-maize rotation land > chive-waterlogged and fallowed land > chive-fallowed land > chive-rice rotation land. For TSN, the order was: chive-ginger rotation land > chive-chive continuous cultivation land > chive-maize rotation land > chive-waterlogged and fallowed land > chive-fallowed land > chive-rice rotation land. SON and NH₄⁺-N were the main components of soil soluble nitrogen. The SON/TSN ratios were more than 60%, with the highest of 82.4%. The contents of SIN and SON

国家自然科学基金项目(41563013、41563007 和 41571130042)、贵州省科技厅科技计划项目(黔科合 SY 字(2012)3165、黔科合基础(2018)1074 号)和贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]161)资助。

收稿日期: 2019-01-11 接受日期: 2019-05-09

* 通讯作者 E-mail: yang-cheng513@163.com

decreased with soil depth at 0–60 cm layers. Our results indicate that cropping patterns have significant impacts on the content and composition of soluble nitrogen in cropland soil. SON is the major form of nitrogen loss from cropland soil, which should be paid attention to.

Key words: soluble organic nitrogen; cropping pattern; soil; karst region.

氮是生态系统中重要的营养元素之一,土壤氮不仅是植物营养的重要来源,也是造成水体富营养化的诱发因素(叶花等,2011; Huang *et al.*, 2017)。土壤可溶性氮是指能被水或盐溶液浸提出来的这部分氮,包括可溶性无机氮和有机氮(Murphy *et al.*, 2000; Willett *et al.*, 2004),由于其为溶解态,很容易随着径流或淋溶方式流出土体,引起环境污染(Lusk *et al.*, 2016; Hua *et al.*, 2018; Nie *et al.*, 2018)。越来越多的研究表明,土壤可溶性有机氮(SON)也是土壤氮流失的主要形态(Fang *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2015; Nie *et al.*, 2018)。稻田土壤SON的流失占施用氮肥量的3.35%(Nie *et al.*, 2018),SON的流失约占林地土壤氮淋失的90%以上(Qualls *et al.*, 1991)。因此,土壤可溶性氮越来越受到人们的关注(Song *et al.*, 2008; 丁九敏等,2010; Huang *et al.*, 2014; 何传瑞等,2016; Lusk *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018)。目前对土壤可溶性氮的研究主要集中在森林(Michalzik *et al.*, 1999; 赵满兴等,2009; 张彪等,2010; 陈印平等,2013; 王洁等,2015; 肖好燕等,2016)、草地(王文颖等,2016; Lusk *et al.*, 2018)、湿地及其他生态系统(周碧青等,2016; Yusuf *et al.*, 2017)。研究显示,不同土壤类型、不同土地利用方式对土壤可溶性氮有着较大的影响(杨斌等,2007; 吕学军等,2011; 孔祥忠等,2015; 王洁等,2015; 牛颖权等,2016)。然而,对不同种植模式对农田土壤可溶性氮的研究相对较少。喀斯特面积在我国分布广泛,贵州作为我国乃至世界喀斯特发育最典型、最复杂、分布面积最大的片区之一(张殿发等,2002; 高贵龙等,2003),其碳酸盐岩出露面积占全省土地总面积的73%。与其他地区相比,喀斯特山地农业地质生态环境脆弱、土壤贫瘠、浅薄,具有其特殊性(王世杰等,2007; 任明强等,2009)。目前在喀斯特地区开展种植模式对农田土壤可溶性氮影响方面的研究还不多(Song *et al.*, 2017),很有必要开展该方面的研究工作。本研究以贵州喀斯特山地农田土壤为对象,开展葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕6种不同种植模式对农田土壤可溶性氮含量、组分及迁移影响的研究,旨在更

好地了解种植模式对喀斯特山地农田土壤可溶性氮含量、组分及迁移的影响,为喀斯特山地农业合理施肥、提高氮肥的利用效率、减少氮流失、保护环境等提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区黔陶马场位于贵州省贵阳市花溪区东南部,(106°43′E—106°50′E,26°17′N—26°24′N),土地总面积为74.98 km²,耕地面积为567 hm²,其中农田377 hm²,旱地190 hm²,属亚热带季风湿润气候,无霜期在260 d以上,平均降雨量1100 mm,年平均气温为14.9℃,7月最高气温33.6℃,1月最低气温-3℃,年有效积温在4500℃以上,土壤为硅质黄壤土。研究区是一个以农业为主的乡镇,有7个行政村。近年来,政府投入大量资金建设现代高效农业基地,以马场村为核心,建成200 hm²的香葱种植区,并以此辐射带动周边村寨发展466 hm²香葱种植规模。在该区的土地种植模式中,有四季进行香葱种植的葱-葱连作方式,有入秋以后对农田进行翻耕,开始进行香葱的种植,直到春天采收后与姜、玉米、水稻作物轮作的种植模式;有入秋以后种植香葱,到5、6月香葱采收以后整理农田,施完肥后用水浇灌休耕,入秋以后再行香葱种植的种植模式;有香葱或其他作物采收以后休耕1~2年不等的种植模式。该区施用的肥料为牛粪、猪粪、鸡粪等有机肥料、复合肥及尿素。

1.2 样品采集与处理

于2017年10月,我们采集了黔陶马场现代农业种植基地的葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕6种不同种植模式的农田表层土壤和剖面土壤样品。对每一种种植模式的土壤采集中,在基地选定5个典型的地块,每一个地块按照“S”形的布点方式,采集5个表层土样(0~20 cm),每个土壤样品采集该点附近的3个土样混合而成。剖面样品按照“S”形的布点方式,采用土钻采集0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm土层的样品,采集3个剖面土壤样品收集

表 1 土壤样品的基本性质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 1 Basic properties of soil samples

种植模式	pH	有机质	全氮	全磷	全钾
葱-葱连作	5.7±0.14	82.11±11.99	1.70±0.21	1.77±0.39	4.60±0.28
葱-姜轮作	5.2±0.40	87.96±9.26	1.92±0.47	1.95±0.58	4.46±0.85
葱-玉米轮作	5.1±0.24	83.52±6.17	1.30±0.33	1.89±0.45	4.35±0.23
葱-水稻轮作	6.2±0.34	81.35±9.26	1.43±0.22	2.25±0.53	5.01±0.93
葱-水淹休耕	6.2±0.18	90.75±7.38	1.44±0.10	2.16±0.23	4.55±0.22
葱-休耕	6.6±0.05	83.65±10.67	1.94±0.27	1.06±0.67	3.80±0.52

对应层位土样混合成一个样品。一共采集了表层土壤样品 30 份,剖面土壤样品 36 份。样品采集回来后分成两份,一份在 4 °C 下保存,用于水溶性氮的测定,另一份风干研磨过筛后保存,用于其他指标的测定。土壤样品的基本性质见表 1。

1.3 测定项目及方法

土壤可溶性无机氮、可溶性总氮、可溶性有机氮测定方法如下(周晓光等 2010):

土壤可溶性无机氮(SIN):采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液作为浸提剂,土水比为 1:5,在 $220 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下,室温振荡提取 2 h,用中速定量滤纸过滤后,滤液用 Cleverchem380 全自动间断化学分析仪(德国)对提取液的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量进行测定,两者之和为可溶性无机氮。

土壤可溶性总氮(TSN):将上述滤液采用碱性过硫酸钾氧化法测定其可溶性总氮。其中:氧化剂为 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 和 3% 的 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 配比,在 120 °C 的高压灭菌锅中氧化 30 min 后,利用 Cleverchem380 全自动间断化学分析仪测定。

土壤可溶性有机氮:土壤可溶性总氮(TSN)和可溶性无机氮(NO_3^--N 与 NH_4^+-N 之和)含量之差,即 $\text{SON} = \text{TSN} - (\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N})$ 。

其他指标按常规方法测定。

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据统计与处理,SPSS 18.0 软件进行方差分析、多重比较,Origin 9.0

软件进行图的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式农田土壤可溶性氮含量特征

2.1.1 土壤 SIN 含量特征 从表 2 可见,6 种不同种植模式农田土壤 NH_4^+-N 含量范围为 3.02~56.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 18.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,葱-姜轮作土壤 NH_4^+-N 含量最高,为 37.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,葱-水稻轮作土壤 NH_4^+-N 含量最低,为 4.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同种植模式农田土壤 NH_4^+-N 平均含量由高到低的排序为葱-姜轮作>葱-水淹休耕>葱-葱连作>葱-玉米轮作>葱-休耕>葱-水稻轮作。葱-葱连作的种植模式农田土壤 NH_4^+-N 含量与葱-姜轮作、葱-水稻轮作的种植模式土壤 NH_4^+-N 含量差异显著($P < 0.05$)。葱-姜轮作与葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕土壤 NH_4^+-N 含量差异显著($P < 0.05$)。葱-水稻轮作与葱-水淹休耕土壤 NH_4^+-N 含量差异显著($P < 0.05$)。其他种植模式农田土壤 NH_4^+-N 含量之间差异不显著($P > 0.05$)。 NO_3^--N 含量范围为 0.1~39.11 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 7.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,葱-姜轮作土壤 NO_3^--N 含量最高,为 15.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,葱-水稻轮作土壤 NO_3^--N 含量最低,为 0.99 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 NO_3^--N 平均含量由高到低的排序为葱-姜轮作>葱-玉米轮作>葱-葱连作>葱-水淹休耕>葱-休耕>葱-水稻轮作。葱-姜轮作土壤 NO_3^--N

表 2 不同种植模式农田土壤可溶性无机氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 2 Soluble inorganic nitrogen concentration in farmland soils from different cropping patterns

种植模式	NH_4^+-N			NO_3^--N			SIN		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
葱-葱连作	21.09	16.23	18.05±1.88	11.85	3.35	8.51±3.57	32.94	20.35	26.56±4.56
葱-姜轮作	56.04	11.85	37.85±21.32	39.11	2.17	15.6±15.38	95.15	18.53	53.45±33.68
葱-玉米轮作	26.97	9.11	16.73±6.85	33.45	1.44	11.73±13.27	51.81	11.24	28.46±15.56
葱-水稻轮作	6.94	3.02	4.79±1.59	1.68	0.39	0.99±0.49	7.90	3.75	5.78±1.88
葱-水淹休耕	24.31	14.16	18.26±3.91	28.29	1.42	8.4±11.29	47.82	18.03	26.66±13.59
葱-休耕	25.34	11.48	15.88±5.61	5.62	0.10	2.17±2.11	27.84	11.58	18.05±6.19

含量与葱-水稻轮作、葱-休耕土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量差异显著 ($P < 0.05$) 其他种植模式土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量之间差异不显著 ($P > 0.05$)。SIN 含量变化范围分别为 3.75~95.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 26.49 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,葱-姜轮作土壤 SIN 含量最高,为 53.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 葱-水稻轮作土壤 SIN 含量最低,为 5.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。SIN 平均含量由高到低的排序为葱-姜轮作 > 葱-玉米轮作 > 葱-水淹休耕 > 葱-葱连作 > 葱-休耕 > 葱-水稻轮作。葱-姜轮作土壤 SIN 含量与葱-葱连作、葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕土壤 SIN 含量差异显著 ($P < 0.05$) 葱-玉米轮作与葱-水稻轮作土壤 SIN 含量的差异显著 ($P < 0.05$) 其他种植模式土壤 SIN 含量之间差异不显著 ($P > 0.05$)。6 种不同种植模式土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、SIN 含量差异可达 19、391、25 倍,说明土地的种植模式对农田土壤有着较大影响。

2.1.2 土壤 SON 含量特征 表 3 显示 6 种不同种植模式农田土壤 SON 含量范围为 21.17~155.91 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 59.76 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同种植模式农田土壤 SON 含量存在明显差异,葱-葱连作土壤 SON 含量最高,为 93.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为葱-姜轮作的,为 89.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 葱-水稻轮作的含量最低,为 27.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。分析表明,葱-葱连作土壤 SON 含量显著高于葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕的 ($P < 0.05$) 葱-葱连作土壤 SON 含量为葱-水稻轮作的 7 倍。葱-姜轮作土壤 SON 含量也显著高于葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕的 ($P < 0.05$) 而其他种植模式农田土壤 SON 含量之间差异不显著 ($P > 0.05$)。土壤 SON 平均含量由高到低的排序为葱-葱连作 > 葱-姜轮作 > 葱-玉米轮作 > 葱-水淹休耕 > 葱-休耕 > 葱-水稻轮作。由此可看出,不同的种植模式对农田土壤 SON 的影响很大。此外,不同的种植模式中,葱-水稻轮作土壤 SON/TSN 的比例最高,为 82.4% 其他种植模式

土壤 SON/TSN 的比例都高达 60% 以上。

2.1.3 土壤 TSN 含量特征 6 种不同种植模式农田表层土壤 TSN 含量范围为 28.76~188.95 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 86.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,葱-姜轮作土壤 TSN 含量最高,为 142.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为葱-葱连作的,为 120.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 葱-水稻轮作土壤 TSN 含量最低,为 33.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 TSN 平均含量由高到低的排序为:葱-姜轮作 > 葱-葱连作 > 葱-玉米轮作 > 葱-水淹休耕 > 葱-休耕 > 葱-水稻轮作。经分析,种植模式为葱-葱连作、葱-姜轮作与葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕之间土壤 TSN 含量差异显著 ($P < 0.05$) 其他种植模式之间土壤 TSN 含量差异不显著 ($P > 0.05$) (表 3)。

2.2 不同种植模式农田土壤可溶性氮组分特征

从表 4 可看出,6 种不同种植模式农田表层土壤可溶性氮组成以 SON 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为主。土壤 SON/TSN 的比例范围为 63.8%~82.4%, 由高到低的排序为葱-水稻轮作 > 葱-葱连作 > 葱-休耕 > 葱-玉米轮作 > 葱-水淹休耕 > 葱-姜轮作。其中,葱-水稻轮作土壤 SON/TSN 的比例最高,为 82.4%, 其次为葱-葱连作的,为 76.0%, 葱-姜轮作的最低,为 63.8%, 明显可以看出不同种植模式农田土壤 SON/TSN 的比例最高可达 82.4% 其他种植模式土壤 SON/TSN 的比例占 60% 以上,说明了本研究的 6 种不同种植模式农田土壤可溶性氮组成以 SON 为主。经分析表明:种植模式为葱-姜轮作和葱-水稻轮作之间土壤 SON/TSN 的比例存在显著性差异 ($P < 0.05$) 而其他种植模式之间土壤 SON/TSN 的比例差异不显著 ($P > 0.05$)。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{TSN}$ 的比例范围为 14.6%~26.5%, 由高到低的排序为葱-休耕 > 葱-姜轮作 > 葱-水淹休耕 > 葱-玉米轮作 > 葱-葱连作 > 葱-水稻轮作。其中,葱-休耕最高,为 26.5%, 其次为葱-姜,为 25.2% 葱-水稻轮作最低,为 14.6%。种植模式为葱-休耕与葱-葱连作、葱-水稻轮作之间,葱-姜轮作

表 3 不同种植模式农田土壤可溶性有机氮含量和占可溶性总氮的比例

Table 3 SON content and SON/TSN ratio in farmland soils from different cropping patterns

种植模式	SON ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			SON/TSN (%)		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
葱-葱连作	155.91	44.65	93.73±43.46	82.56	68.69	76.0±6.71
葱-姜轮作	128.4	48.7	89.35±33.44	85.78	33.85	63.8±21.25
葱-玉米轮作	92.66	41.56	55.24±21.65	83.29	45.15	66.1±16.10
葱-水稻轮作	33.16	21.17	27.61±4.36	88.54	73.62	82.4±6.65
葱-水淹休耕	62.67	25.08	51.5±15.07	77.66	34.40	65.4±17.82
葱-休耕	52.14	28.71	41.1±8.75	76.20	60.32	69.5±8.12

表 4 不同种植模式农田土壤各氮组分比例
Table 4 Proportions of different soil nitrogen compositions in farmland soils from different cropping patterns

种植模式	指标	均值 (mg · kg ⁻¹)	占 SIN (%)	占 TSN (%)
葱-葱连作	NH ₄ ⁺ -N	18.05	69.0	16.7
	NO ₃ ⁻ -N	8.51	31.0	7.3
	SIN	26.56		24.0
	SON	93.73		76.0
	TSN	120.29		
葱-姜轮作	NH ₄ ⁺ -N	37.85	73.8	25.2
	NO ₃ ⁻ -N	15.6	26.2	11.0
	SIN	53.45		36.3
	SON	89.35		63.8
	TSN	152.8		
葱-玉米轮作	NH ₄ ⁺ -N	16.73	66.7	20.4
	NO ₃ ⁻ -N	11.73	33.3	13.5
	SIN	28.46		33.9
	SON	55.24		66.1
	TSN	83.7		
葱-水稻轮作	NH ₄ ⁺ -N	4.79	82.9	14.6
	NO ₃ ⁻ -N	0.99	17.1	3.0
	SIN	5.78		17.6
	SON	27.61		82.4
	TSN	33.39		
葱-水淹休耕	NH ₄ ⁺ -N	18.26	75.4	23.3
	NO ₃ ⁻ -N	8.40	24.6	11.3
	SIN	26.66		34.6
	SON	51.50		65.4
	TSN	78.16		
葱-休耕	NH ₄ ⁺ -N	15.88	88.7	26.5
	NO ₃ ⁻ -N	2.17	11.3	3.9
	SIN	18.05		30.5
	SON	41.10		69.5
	TSN	59.15		

与葱-水稻轮作之间土壤 NH₄⁺-N/TSN 的比例存在显著性差异 (P<0.05)。NO₃⁻-N/TSN 的比例范围为 3.0%~13.5%，由高到低的排序为：葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-姜轮作>葱-葱连作>葱-休耕>葱-水稻轮作。其中葱-玉米最高，为 13.5%，其次为葱-水淹休耕，为 11.3%，葱-水稻轮作最低，为 3.0%。6 种不同的种植模式之间土壤的 NO₃⁻-N/TSN 的比例差异都不显著 (P>0.05)。土壤 SIN 的组成以 NH₄⁺-N 为主，总体上 6 种不同种植模式农田土壤的 NH₄⁺-N/TSN 的比例都要比 NO₃⁻-N 的高。

2.3 不同种植模式农田土壤剖面可溶性氮含量特征

从图 1 可看出，在 0~60 cm 土层中 6 种不同种植模式农田土壤 NH₄⁺-N 随着土层的增加其含量在下降，40 cm 往下后，NH₄⁺-N 含量基本趋于稳定。在 0~20 cm 的表层土中，不同种植模式农田土壤的 NH₄⁺-N 含量存在较大差异，葱-葱连作的最高，其次

是葱-休耕，葱-水稻的最低。除了葱-休耕土壤 NO₃⁻-N 含量随着土壤表层到 60 cm，含量在逐渐下降外，其他 5 种种植模式为 NO₃⁻-N 含量表现为随着土壤表层到下层，含量波动下降，到 60 cm 又有所增加。葱-葱连作和葱-姜轮作方式 NO₃⁻-N 表现为自土壤表层到 25 cm 深度变化较大。葱-葱连作、葱-休耕、葱-姜轮作方式表层土壤 SIN 含量相对于其他种植模式的相对高。葱-葱连作表层土壤的 SON 含量和其他种植模式之间有着显著的差异。6 种不同种植模式农田土壤 SIN 和 SON 从表层到 60 cm，都表现为随着土层的增加而下降的规律。不同种植模式农田土壤表层各形态氮的含量存在较大差异(图 1)，说明土壤各形态氮受到土地种植模式的影响比较大。6 种不同种植模式下农田各层土壤 SON/TSN 的比例范围为 41.63%~84.57%，平均值为 70.85%，可以看出，SON 也是土壤剖面各土层中的主要组分。

2.4 不同种植模式下农田土壤 SIN、SON 与 TSN 相关性分析

从表 5 可看出，6 种不同种植模式中，葱-水稻轮作农田土壤的 SIN 与 TSN 之间相关性不显著，葱-休耕、葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作、葱-水淹休耕 5 种种植模式农田土壤的 SIN 与 TSN 之间具有显著的相关性。其中葱-玉米轮作、葱-水淹休耕为显著的正相关关系，葱-休耕、葱-葱连作、葱-姜轮作农田土壤的 SIN 与 TSN 达到极显著的正相关关系。SON 与 TSN 也具有显著相关性。其中葱-姜轮作农田土壤的 SON 与 TSN 呈显著的正相关关系，

表 5 不同种植模式土壤 SIN、SON 与 TSN 的相关关系
Table 5 The relationships between SIN, SON and TSN of farmland soils from different cropping patterns

种植模式	相关系数	
	指标	TSN
葱-葱连作	SIN	0.912**
	SON	0.977**
葱-姜轮作	SIN	0.761**
	SON	0.847**
葱-玉米轮作	SIN	0.725*
	SON	0.926**
葱-水稻轮作	SIN	0.479
	SON	0.969**
葱-水淹休耕	SIN	0.684*
	SON	0.883**
葱-休耕	SIN	0.947**
	SON	0.876**

** P<0.01, * P<0.05, μ=5。

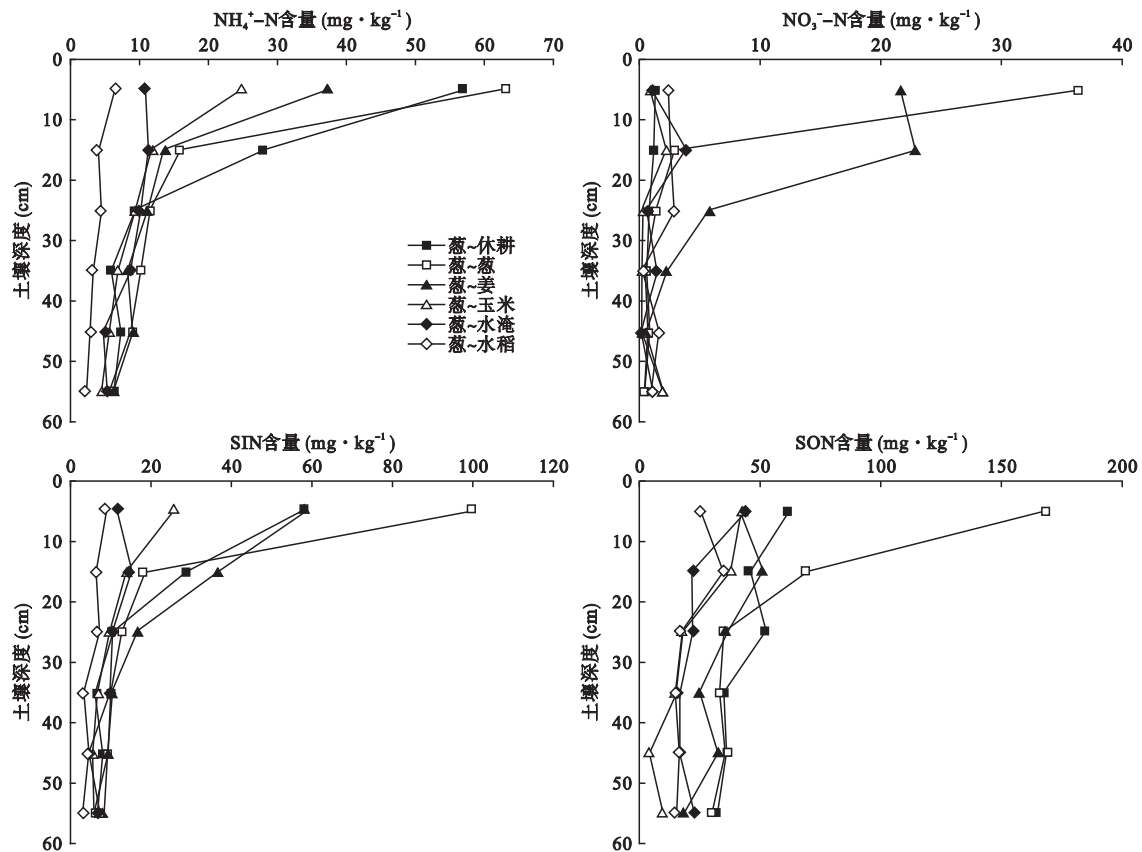


图 1 可溶性氮在农田土壤剖面中的变化

Fig.1 Variations of soluble nitrogen contents in farmland soil profiles from different cropping patterns

葱-休耕、葱-葱连作、葱-玉米轮作、葱-水淹休耕、葱-水稻轮作农田土壤的 SON 与 TSN 呈极显著的正相关关系。

3 讨论

3.1 种植模式对农田土壤可溶性氮含量的影响

本研究结果显示,不同种植模式中土壤的 SIN 存在显著性差异,含量差异可达到 25 倍,说明种植模式差异对土壤 SIN 有着显著影响,这与其他的研究成果相似(Christou *et al.*, 2005; 李菡等, 2010)。孔祥忠等(2015)研究表明,不同种植模式中 SIN 的差异与农田植被、施肥、灌溉等种植模式差异有关,影响土壤无机氮的转化、固定和淋失。在本研究中,6 种不同种植模式土壤 SIN 含量表现出葱-姜轮作>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-葱连作>葱-休耕>葱-水稻轮作的规律。在 6 种不同的种植模式中,在进行葱、姜、玉米种植过程中,频繁地施入农家肥和化肥以及在水淹休耕的整地过程中,施入农家肥和化肥后,用水浇灌方式处理后让农田休耕。因此,导致葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作、葱-水淹休耕

土壤 SIN 含量要比葱-休耕、葱-水稻轮作的高。此外,葱-水稻轮作与其他种植模式有着明显的区别,其 SIN 含量最低,仅为其他种植模式的 1/16,原因是在水稻种植过程中,由于前期香葱种植中,已经施入大量的农家肥和化肥,当地农民在水稻种植过程中,基本上不施入肥料以及稻田的反硝化作用(孔祥忠等, 2015),导致葱-水稻轮作土壤的硝态氮含量很低。

种植模式对土壤 SON 也存在着较大影响。本研究显示,SON 含量表现为葱-葱连作>葱-姜轮作>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-休耕>葱-水稻轮作,土壤 SON 含量相差可达到 7 倍。与其他研究结果一样,显示出种植模式对土壤 SON 有着较大影响。原因与不同种植模式中,由于农作物的不同,管理方式的差异,可能改变输入土壤中的有机物的类型和数量,改变微生物活性和矿化速率,影响土壤氮循环,从而影响到土壤 SON 库的大小和稳定性(孔祥忠等, 2015)。本研究中,葱-葱连作和葱-姜轮作和其他种植模式相比,人们在进行葱、姜种植时都施入大量的牛粪、猪粪、鸡粪等有机物料以及一定量的复

合肥作为底肥,葱连作中一年种植3~4季。葱-玉米、葱-水稻轮作中,很少或基本不施入肥料,主要利用前期葱种植时土壤剩余的养分,由于肥料的施用差异,可能导致了不同种植模式土壤SON存在显著的差异。杨静等(2018)对不施肥、单施化肥、化肥+牛粪、化肥+稻草的不同施肥水稻土SON组分差异及影响因素开展的研究,表明不同施肥处理下土壤SON含量存在显著差异,施肥处理显著提高种植层土壤SON含量,单施化肥、化肥+牛粪、化肥+稻草处理相对于不施肥提高了23.49%、58.70%和106.30%。郝小雨等(2015)研究表明,长期施用有机肥显著提高了土壤SON含量,单施有机肥和有机无机肥配施处理较单施化肥处理SON含量分别增加了34.7%和56.2%。沈玉芳等(2011)研究也表明,土壤可溶性氮与施肥有关。此外,不同的管理方式也可能对土壤SON存在较大影响。在葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作、葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕这些不同的种植模式中,人们对农田的管理方式也存在差异,葱-葱连作、葱-姜轮作、葱-玉米轮作的管理要比葱-水稻轮作、葱-水淹休耕、葱-休耕的精细。因此,除了肥料的施用差异外,管理方式的差异也可能导致了土壤SON存在差异。但从总体上看,种植模式对SIN的影响比SON的大,与Christou等(2005)的研究结果一致。

3.2 种植模式对农田土壤可溶性氮组分的影响

本研究的6种不同种植模式中, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TSN}$ 的比例表现为葱-休耕>葱-姜轮作>葱-水淹休耕>葱-玉米轮作>葱-葱连作>葱-水稻轮作。 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TSN}$ 的比例表现为葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-姜轮作>葱-葱连作>葱-休耕>葱-水稻轮作。总体上6种不同种植模式土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TSN}$ 的比例都要比 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的高,6种不同种植模式之间土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TSN}$ 的比例差异都不显著,这可能与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容易被土壤所吸附,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 容易流失有关(陈效民等,2006)。 SON/TSN 的比例表现为葱-水稻轮作>葱-葱连作>葱-休耕>葱-玉米轮作>葱-水淹休耕>葱-姜轮作,6种不同种植模式土壤可溶性氮组成以SON和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。由此可看出,农田的植被、肥料施用、管理措施差异等不同种植模式对土壤可溶性组分有着较大影响。Christou等(2005)研究结果显示,农业土壤中 SON/TSN 的比例高达57%以上。杨静等(2018)研究表明,长期不同施肥对土壤SON组分含量影响深刻,影响程度因施肥处理而异。叶

花等(2011)对京郊典型农田土壤易流失氮组分及含量特征及差异的研究发现,大田和菜园土壤氮组分存在着显著差异。TSN中,大田土壤SIN和SON含量基本相同,而在菜园土壤中主要是SIN,随着种植年限的延长, SIN/TSN 的比例从89.56%降低到58.85%, SON/TSN 的比例从10.44%升高到41.15%。由此可看出,种植模式对土壤氮组成有着显著影响。

3.3 种植模式对土壤可溶性氮迁移的影响

本研究的6种不同种植模式农田土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SIN和SON总体上表现为含量随着土层深度的增加而下降,与郭金瑞等(2015)、谢泽宇等(2017)、Siemens等(2002)的研究结果相一致。原因可能是,表层土壤由于生物归还量大,具有较高的有机质含量和养分含量,地下死根、活根分泌物和脱落细胞、作物残茬以及人们施入的大量有机肥等新鲜有机质较多,加上表层土壤良好的透气性等条件,更利于微生物的活动。而在底层土壤,由于其过于紧实,土壤环境条件相对较差,不利于微生物的活动(祁心等,2015)。因此,总体上表现为随着土层深度增加而下降的趋势。不同种植模式下表层土壤可溶性氮含量差异显著,原因与农田种植的植被、施肥种类和数量、管理措施等有关。葱-葱、葱-姜、葱-休耕的种植模式与其他种植模式相比,土壤表层SIN、SON含量较深层土壤的差异更大,原因可能是在葱、姜的种植中,人们频繁地施入大量的肥料有关以及在休耕的过程中,土壤表层生长有大量的杂草等植被,起到固定养分,减少养分流失以及植被死亡之后归还到表层土壤中(郭金瑞等,2015)。已有研究表明,土壤SON是氮素流失的主要形态,会对环境造成污染(Tiemeyer *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2015; Nie *et al.*, 2018)。本研究的6种不同种植模式下0~60 cm各层土壤 SON/TSN 的比例最低为41.63%,最高可达84.57%,SON与TSN具有显著的正相关关系,说明SON是土壤剖面各土层中的主要组分。由此可见,农田大量的有机肥料的施用,也会带来SON的淋溶迁移风险,对SON的迁移及其环境影响应引起重视。

综上所述,种植模式对农田土壤可溶性氮含量有显著影响,土壤SIN相对于SON更容易受种植模式的影响,不同种植模式土壤可溶性氮的变化与农田植被、施肥、灌溉、管理方式等差异有关。种植模式对农田土壤可溶性氮组分有着较大影响,不同种植模式土壤 SON/TSN 的比例达60%以上,SON与

TSN 具有显著的正相关性, SON 是各土层中可溶性氮的主要组分。土壤 SIN、SON 随土层深度增加而减少, 种植模式对 SIN、SON 在土壤剖面中的迁移有影响, SON 为农田土壤氮流失的主要形态, 会带来环境污染风险, 应引起重视。

参考文献

- 陈效民, 吴华山, 孙静红. 2006. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异. *环境科学*, **27**(6): 1217-1222.
- 陈印平, 夏江宝, 曹建波, 等. 2013. 黄河三角洲盐碱地不同混交林土壤可溶性有机碳氮的研究. *水土保持通报*, **33**(5): 87-104.
- 丁九敏, 卜晓莉, 刘 胜, 等. 2010. 2008 年雪灾对武夷山毛竹林土壤微生物生物量氮和可溶性氮的影响. *生态学杂志*, **29**(3): 517-522.
- 高贵龙, 邓自民, 熊康宁, 等. 2003. 喀斯特的呼唤与希望. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 郭金瑞, 宋振伟, 彭宪现, 等. 2015. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价. *农业工程学报*, **31**(6): 178-185.
- 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 2015. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征. *中国农业科学*, **48**(23): 4707-4716.
- 何传瑞, 全 智, 解宏图, 等. 2016. 免耕不同秸秆覆盖量对土壤可溶性氮素累积及运移的影响. *生态学杂志*, **35**(4): 977-983.
- 柯 英, 郭鑫年, 冀宏杰, 等. 2014. 宁夏灌区不同类型农田土壤氮素累积与迁移特征. *农业资源与环境学报*, **31**(1): 23-31.
- 孔祥忠, 于红梅, 束良佐, 等. 2015. 农田种植模式对土壤可溶性氮素含量及迁移的影响. *土壤通报*, **46**(6): 1359-1365.
- 李 菡, 孙爱清, 郭恒俊, 等. 2010. 农田不种种植模式与土壤质量的关系. *应用生态学报*, **21**(2): 365-372.
- 吕学军, 刘 庆, 陈印平, 等. 2011. 黄河三角洲土地种植模式对土壤可溶性有机碳、氮的影响. *农业现代化研究*, **32**(4): 505-508.
- 牛颖权, 李 军, 杨 曦, 等. 2016. 天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征. *地球与环境*, **44**(2): 169-176.
- 祁 心, 江长胜, 郝庆菊, 等. 2015. 缙云山不同土地种植模式对土壤活性有机碳、氮组分的影响. *环境科学*, **36**(10): 3816-3824.
- 任明强, 张家德, 卢正艳, 等. 2009. 贵州喀斯特与非喀斯特农业生态地质环境质量对比研究. *中国岩溶*, **28**(4): 397-401.
- 沈玉芳, 陶武辉, 李世清. 2011. 黄土高原水蚀风蚀交错区施肥对黑麦草农田土壤水溶性有机碳、氮的影响. *自然资源学报*, **26**(8): 1387-1393.
- 王 洁, 杨 曦, 朱兆洲, 等. 2015. 青藏高原土壤可溶性氮组成特征. *生态学杂志*, **34**(6): 1660-1666.
- 王世杰, 李阳兵. 2007. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. *地球科学进展*, **22**(6): 573-582.
- 王文颖, 李文全, 周华坤, 等. 2016. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化. *生态环境学报*, **25**(1): 30-35.
- 谢泽宇, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 2017. 黄土高原不同粮草种植模式土壤碳氮及土壤酶活性. *草业科学*, **34**(11): 2191-2199.
- 肖好燕, 刘 宝, 余再鹏, 等. 2016. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响. *应用生态学报*, **27**(4): 1031-1038.
- 杨 静, 聂三安, 杨文浩, 等. 2018. 不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素. *土壤学报*, **55**(4): 955-966.
- 杨 绒, 严德翼, 周建斌, 等. 2007. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性. *生态学报*, **27**(4): 1397-1403.
- 叶 花, 魏 荔, 赵小蓉, 等. 2011. 京郊典型农田土壤易流失氮组分及含量特征与差异. *农业环境科学学报*, **30**(5): 925-929.
- 赵满兴, 王文强. 2009. 延安人工林地土壤可溶性有机氮(SON)含量分析. *安徽农业科学*, **37**(6): 2617-2619.
- 周碧青, 陈成榕, 张黎明, 等. 2016. 亚热带不同果园土壤可溶性有机氮季节动态及其影响因素. *农业环境科学学报*, **35**(9): 1735-1741.
- 周晓光, 黄丹枫, 葛体达, 等. 2010. 有机和常规蔬菜生产系统土壤可溶性有机氮含量及特征. *上海交通大学学报: 农业科学版*, **28**(5): 420-438.
- 张 彪, 高 人, 杨玉盛, 等. 2010. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量. *应用生态学报*, **21**(7): 1635-1640.
- 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 2002. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性研究. *地理学与国土研究*, **18**(1): 77-79.
- 张宏伟, 康凌云, 梁 斌, 等. 2013. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险. *农业工程学报*, **29**(21): 99-107.
- Christou M, Avramides EJ, Roberts JP, et al. 2005. Dissolved organic nitrogen in contrasting agricultural ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 1560-1563.
- Fang YT, Zhu WX, Gundersen P, et al. 2009. Large loss of dissolved organic nitrogen from nitrogen-saturated forests in Subtropical China. *Ecosystems*, **12**: 33-45.
- Hua KK, Zhu B. 2018. Dissolved organic nitrogen fluxes and crop yield after long-term crop straw incorporation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **112**: 133-146.
- Huang CY, Jien SH, Chen TH, et al. 2014. Soluble organic C and N and their relationships with soil organic C and N and microbial characteristics in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations along an elevation gradient in Central Taiwan. *Journal of Soils and Sediments*, **14**: 1061-1070.
- Huang J, Xu CC, Ridoutt BG, et al. 2017. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production*, **159**: 171-179.
- Lusk M, Toor G. 2016. Dissolved organic nitrogen in urban

- streams: biodegradability and molecular composition studies. *Water Research*, **96**: 225–235.
- Lusk MG, Toor GS, Inglett PW. 2018. Characterization of dissolved organic nitrogen in leachate from a newly established and fertilized turfgrass. *Water Research*, **131**: 52–61.
- Michalzik B, Matzner E. 1999. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem. *European Journal of Soil Science*, **50**: 579–590.
- Murphy DV, Macdonald AJ, Stockdale EA, et al. 2000. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, **30**: 374–387.
- Nie SA, Zhao LX, Lei XM, et al. 2018. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: Implications for its potential loss. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **262**: 58–64.
- Qualls RG, Haines BL, Swank WT. 1991. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology*, **72**: 254–266.
- Siemens J, Kaupenjohann M. 2002. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **165**: 675–681.
- Song G, Zhao X, Wang SQ, et al. 2015. Dissolved organic nitrogen leaching from rice-wheat rotated agroecosystem in Southern China. *Pedosphere*, **25**: 93–102.
- Song LC, Hao JM, Cui XY. 2008. Soluble organic nitrogen in forest soils of Northeast China. *Journal of Forestry Research*, **19**: 53–57.
- Song XW, Gao Y, Green SM, et al. 2017. Nitrogen loss from karst area in China in recent 50 years: An in-situ simulated rainfall experiment's assessment. *Ecology and Evolution*, **7**: 10131–10142.
- Tiemeyer B, Kahl P. 2014. Nitrogen and dissolved organic carbon (DOC) losses from an artificially drained grassland on organic soils. *Biogeosciences*, **11**: 4123–4137.
- Wang LY, Zheng XL, Tian FF, et al. 2018. Soluble organic nitrogen cycling in soils after application of chemical organic amendments and groundwater pollution implications. *Journal of Contaminant Hydrology*, **217**: 43–51.
- Willett VB, Green JJ, Macdonald AJ, et al. 2004. Impact of land use on soluble organic nitrogen in soil. *Water, Air and Soil Pollution*, **4**: 53–60.
- Yusuf S, Audu AA, Wazir M. 2017. Comparative assessment of the environmental dynamics of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic phosphorus (DOP) from three wetlands in Northern Nigeria. *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*, **25**: 151–162.

作者简介 杨成男,1979年生,博士,教授,硕士生导师,研究方向为环境地球化学及农业面源污染防治。E-mail: yang-cheng513@163.com
责任编辑 魏中青
