

# 贵州喀斯特山地农业系统不同种植区休耕地土壤水溶性氮素组成及分布特征

杨成<sup>1</sup>, 孟凡非<sup>1</sup>, 崔丽芳<sup>1</sup>, 彭艳<sup>1</sup>, 范百龄<sup>1</sup>, 刘涛泽<sup>2</sup>

(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 550081)

**摘要:** 选择贵州喀斯特山地农业系统不同种植区休耕地土壤作为研究对象, 对其水溶性氮素组成及分布特征进行了研究。结果表明: 休耕地土壤 SON 含量范围为 4.11~14.34 mg/kg, 平均含量为 8.62 mg/kg。不同种植区休耕地土壤 SON 含量存在较大差异, 但差异不显著( $p>0.05$ ), SON 占 TSN 的比例差异极显著( $p<0.01$ ), 传统农业种植区 SON 的变异较大, 其它种植区的较小。水溶性氮素组成以 SON 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为主, 不同种植区的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  占 SIN 的比例差异不显著( $p>0.05$ ), 而两者占 TSN 及 SIN 占 TSN 的比例差异极显著( $p<0.01$ )。传统农业种植区表层和深层土壤 SIN 的含量都要比其它种植区高, SON 则相反, 说明不同类型的农业对土壤氮的影响不同。不同种植区表层土  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TSN、SON 含量差异极显著( $p<0.01$ )。除了打通种植区, 其它种植区  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量随着土层的增加总体上表现出下降的规律。除了大冲种植区在 0~30 cm 深度先增加后降低的规律外, 其它种植区  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量自土壤表层到 30 cm 深度随着土层的增加而增加, 自 30 cm 深度往下随着土层的增加而下降。TSN 和 SON 中除了青岩种植区随着土壤表层到 20 cm 深度处降低外, 其它种植区随着土壤表层到 20 cm 深度处先增加, 然后从 20 cm 深度往下随着土层的增加再降低。SON 容易向下淋失, 不易在土层深部发生积累, 造成氮素的流失和带来环境污染风险, 应引起重视。

**关键词:** 水溶性氮; 喀斯特山地农业系统; 休耕地; 土壤

中图分类号: P595; S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2019)02-0161-09 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.044

土壤水溶性氮指的是土壤中可以溶于水或稀盐溶液的那部分氮素<sup>[1-3]</sup>。水溶性氮是土壤氮素最为活跃的组成部分, 可以直接或间接地被植物吸收和利用, 但因其具有比较强的迁移性, 很容易随水分运移而发生径流或淋溶损失, 对水环境造成污染<sup>[3-6]</sup>。土壤中的无机氮是土壤氮素最活跃的组分之一, 约占土壤全氮的 1%~5%, 这部分氮是植物吸收利用的主要对象<sup>[3]</sup>。土壤中的有机氮是土壤氮素的主要形态, 占土壤氮素总量的 95%以上<sup>[7-8]</sup>, 水溶性有机氮 (SON) 约占耕作土壤全氮的 0.3%~1%<sup>[9]</sup>, 是土壤中微生物氮的重要来源, 可以被一些植物直接吸收利用<sup>[8, 10]</sup>。前人研究表明土壤 SON 也是土壤氮素流失的主要形态<sup>[6, 11]</sup>, 稻田土壤中 SON 的流失占施用氮肥量的 3.35%<sup>[6]</sup>, SON 流失约

占林地土壤氮素淋溶损失的 90%以上<sup>[12]</sup>。因此, 土壤水溶性氮尤其是 SON 受到了人们的广泛关注<sup>[3, 13-16]</sup>。

目前, 国内外学者对其它地区不同生态系统土壤水溶性氮素的迁移、转化等方面开展了大量的研究工作<sup>[8, 17-21]</sup>。如 Wang 等<sup>[16]</sup>开展了农业土壤中不同肥料尿素、粪肥、秸秆对土壤氮素矿化、可溶性有机氮 (SON) 动态及其淋溶能力方面的研究。Nie 等<sup>[6]</sup>开展了不同施肥类型水稻土剖面中可溶性有机氮分布特征的研究。牛颖权等<sup>[3]</sup>开展了天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征的研究。王吉等<sup>[22]</sup>对青藏高原 2 500~5 500 m 的不同海拔, 高寒草原、草甸、草地、林地、荒漠、盐碱地等不同植被类型土壤可溶性氮的组成特征及其影响因素开展

收稿日期: 2018-11-06; 改回日期: 2018-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41563013、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); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]141、黔教合 KY 字[2016]161)。

第一作者简介: 杨成(1979-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要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.

研究。张彪等<sup>[7]</sup>对福建建瓯万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量开展研究工作。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<sup>[23-24]</sup>,其碳酸盐岩出露面积占全省土地总面积的73%,喀斯特山地农业生态环境条件较差<sup>[25]</sup>,然而对该区农业生态系统土壤中水溶性氮素尤其是SON含量、分布特征、相互关系等方面的研究较少。而休耕地是贵州喀斯特山地农业系统中的一部分,选择其土壤的水溶性氮素开展研究,对该系统氮素的迁移、转化、利用及循环方面有着重要意义。因此,本文以贵州喀斯特山地农业系统不同种植区休耕地土壤作为研究对象,对传统农业种植区、现代农业种植区、高强度土地利用和生活污水灌溉种植区及混合农业种植区休耕地表层土壤及土壤剖面水溶性氮的含量及其分布特征进行研究,旨在初步评价喀斯特山地农业系统不同种植区休耕地土壤水溶性氮含量差异、分布特征及相互关系,为今后进一步深入研究喀斯特山地农业生态系统土壤氮迁移、转化、利用和循环提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部的云贵高原东斜坡地带,地处 $106^{\circ}7' \sim 107^{\circ}7'E$ , $26^{\circ}11' \sim 27^{\circ}22'N$ 。东南与黔南布依族自治州的瓮安、龙里、惠水、长顺四县接壤,西靠安顺地区的平坝县和毕节地区的织金县,北邻毕节地区的黔西、金沙两县和遵义市的遵义县。土地总面积为 $8\,034\text{ km}^2$ ,85%的地区为喀斯特地貌<sup>[26]</sup>。

关口种植区(GK)位于贵阳市花溪区黔陶乡政府东部, $106^{\circ}45' \sim 106^{\circ}48'E$ , $26^{\circ}19' \sim 26^{\circ}22'N$ ,东抵谷洒村,南抵马场村,西抵黔陶村,北抵龙里县水场乡,海拔 $1\,030 \sim 1\,250\text{ m}$ ,土壤为硅质黄壤土,土壤质地为砂壤土,土壤多呈中性。粮食作物以水稻、玉米为主,经济作物以油菜、蔬菜为主,该种植区主要为传统农业种植模式,管理较粗放,大部分农田主要施用化学肥料,少部分农田施用化学肥料和农户自产的畜禽粪便,肥料主要在冬、春季播种期施入,秋收后大部分农田休耕,部分农田种植自用蔬菜或油菜。

马场种植区(MC)位于贵阳市花溪区黔陶乡政府东部, $106^{\circ}45' \sim 106^{\circ}46'E$ , $26^{\circ}18' \sim 26^{\circ}19'N$ ,东抵

龙里县民主乡、高坡乡石门村,南抵半坡村,西抵黔陶村、赵司村、骑龙村,北抵关口村,平均海拔 $1\,030\text{ m}$ ,土层深厚,土质肥沃,为砂性土壤。粮食作物以水稻、玉米为主,该种植区为现代农业种植模式,建有现代农业种植基地,为贵阳市香葱的规模化种植基地。该区的农田主要为葱-葱连作、葱-稻轮作、葱-姜轮作及葱-玉米轮作的农田利用方式,在香葱的种植过程中,每茬香葱的种植会施入大量的牛粪、猪粪、鸡粪等肥料和复合肥作为底肥,在香葱的生长期间还施入尿素。

打通种植区(DT)位于贵阳市花溪区久安乡南面, $106^{\circ}59' \sim 106^{\circ}60'E$ , $26^{\circ}49' \sim 26^{\circ}50'N$ ,为岩溶低中山与侵蚀低中山丘陵,海拔在 $1\,090 \sim 1\,450\text{ m}$ 之间,土壤以硅铝质黄壤分布最广,多黄沙泥、黄泥、冷沙泥和胶泥土土属。主要种植水稻、玉米及蔬菜。该区为混合农业种植区,一部分农田种植水稻后,冬季休耕或种植自用蔬菜或油菜,另一部分农田作为蔬菜种植基地,四季种植蔬菜,为传统农业的粗放管理、现代农业的高强度土地利用和高频率化肥施用的混合土地利用的种植方式。

青岩种植区(QY)位于贵阳市南郊 $29\text{ km}$ , $106^{\circ}37' \sim 106^{\circ}44'E$ , $26^{\circ}17' \sim 26^{\circ}23'N$ ,东接黔陶乡,西与燕楼乡、马铃乡相连,南与惠水县接壤,海拔 $1\,100 \sim 1\,300\text{ m}$ ,为黄壤,土壤显中性、微酸性。该种植区以蔬菜种植为主,建有蔬菜种植基地,四季种植蔬菜,在蔬菜种植中高频率的施用化学肥料、农家肥和一部分人粪尿,利用村寨排放的生活污水进行灌溉。

大冲种植区(DC)位于清镇市红枫湖镇西面, $106^{\circ}23' \sim 106^{\circ}24'E$ , $26^{\circ}30' \sim 26^{\circ}31'N$ 。海拔在 $1\,280 \sim 1\,350\text{ m}$ 之间,属丘陵谷地,为黄壤酸性土。该种植区以蔬菜种植为主,建有绿色蔬菜高效农业示范园,在蔬菜的种植中主要施用化学肥料和有机肥。

然而在以上不同种植区中,随着城镇化的发展以及各种原因,每年都有不少的种植地休耕,地里长满杂草。因此,我们选择传统农业种植区的关口、现代农业种植区的马场、大冲,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的青岩、混合农业种植区的打通的休耕地作为研究对象。

### 1.2 样品采集与处理

于2017年10月,采集了传统农业种植区的关口、现代农业种植区的马场、大冲,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的青岩、混合农业种植区的打通的休耕地的表层土样和

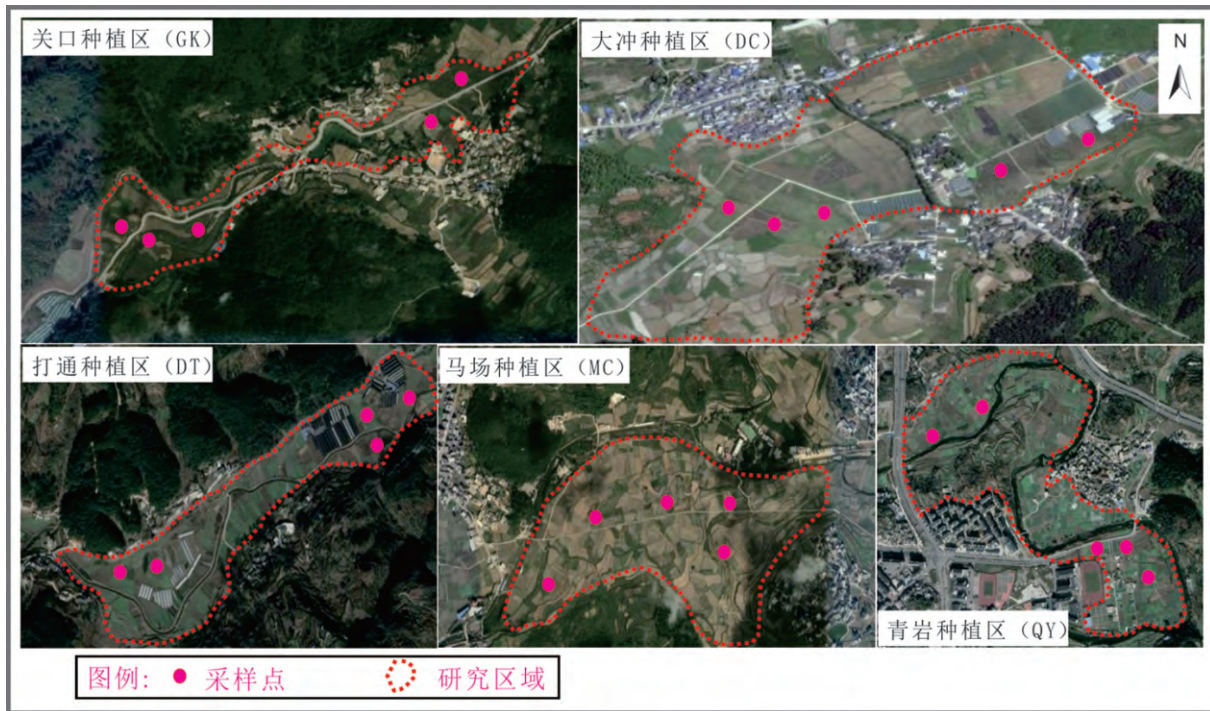


图1 采样点分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of sampling sites for fallowed cropland soils

剖面土样 采样点分布见图 1。在每一种植区中,选择 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对应层位土样混合成一个样品。一共采集了表层土壤样品 25 份,剖面土壤样品 30 份。采集回来的样品分成两份,一份作为鲜样过 3 mm 后于 4 °C 下保存,用于水溶性氮的测定,另一份风干研磨过 1 mm 和 0.25 mm 筛后保存,用于其它指标的测定。

### 1.3 样品分析方法

取过好筛的新鲜土样 20 g,采用液土比为 5:1 的去离子水作为浸提剂,在室温条件下振荡提取 30 min<sup>[3]</sup>,用便携式多参数分析仪(雷磁 DZB-712,上海)测定提取液 pH 和电导( EC)。部分上清液用 0.45 μm 的水系混合纤维滤膜过滤后,用 Vario TOC/TN 仪(德国)测定提取液的水溶性总氮(TSN)。用 Cleverchem380 全自动间断化学分析仪(德国)对提取液的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量进行测定。土壤水溶性有机氮(SON)为水溶性总氮(TSN)和无机氮(SIN)(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 之和)含量之差,

即 SON = TSN - SIN, SIN = NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N。另取 20 g 新鲜土样,用烘干法测定土壤含水率。

### 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、多重比较和相关性分析,Origin 9.0 软件进行图的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植区休耕地土壤 SON 含量

表 1 为不同种植区休耕地土壤 SON 含量。从表中可看出,本研究的不同种植区休耕地土壤 SON 的含量为 4.11~14.34 mg/kg,平均值为 8.62 mg/kg。大冲和马场种植区休耕地土壤 SON 的含量较高,其含量分别为 10.4 和 10.24 mg/kg。关口和打通种植区土壤 SON 的含量较低,其含量分别为 7.13 和 6.15 mg/kg。不同种植区休耕地土壤 SON 的平均含量从高到低的排序为大冲>马场>青岩>关口>打通。马场、大冲、青岩种植区土壤 SON 占 TSN 的比例相对较高(表 2)。其中,马场种植区的最高,为 85.5%,其次是大冲的 75.5%和青岩种植区的 71.0%。关口和打通种植区土壤 SON 占 TSN 的比例相对较低,分别为 60.5%和 53.3%。经单因素方差分析(One-Way ANOVA)表明本研究的不同种植区休耕地土壤 SON 的含量存在差异,但差异不显著

( $p>0.05$ ),而 SON 占 TSN 的比例差异达到了极显著水平( $p<0.01$ )。现代农业种植区的马场、大冲和高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的青岩休耕地土壤的 SON 占 TSN 的比例差异不显著( $p>0.05$ ),传统农业种植区的关口、打通休耕地土壤的 SON 占 TSN 的比例差异也不显著( $p>0.05$ )。此外,还可以看出传统农业种植区的关口土壤 SON 的变异相对较大,变异系数为 53%;现代农业种植区的马场、大冲,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的青岩和混合农业种植区的打通土壤 SON 的变异相对较小,变异系数为 20%~29%。

表 1 不同种植区休耕地土壤 SON 含量

**Table 1 Variations of SON contents in fallowed cropland soils from different planting areas mg/kg**

种植区	最大值	最小值	平均值	Cv
MC	12.78	7.24	10.24	0.27
GK	13.80	5.09	7.13	0.53
DT	8.53	4.11	6.15	0.29
DC	14.34	7.60	10.40	0.25
QY	10.94	6.11	9.16	0.20

表 2 不同种植区休耕地土壤各氮组分比例

**Table 2 Proportions of different soil nitrogen compositions in fallowed cropland soils from different planting areas**

种植区	指标	均值/(mg/kg)	占 SIN/%	占 TSN/%
MC	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.86	49.4	7.2
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.88	50.6	7.4
	SIN	1.74		14.5
	SON	10.24		85.5
	TSN	11.98		
GK	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	3.42	73.7	29.0
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1.23	26.5	10.4
	SIN	4.64		39.4
	SON	7.13		60.5
	TSN	11.78		
DT	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	3.74	69.3	32.4
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1.66	30.7	14.4
	SIN	5.40		46.8
	SON	6.15		53.3
	TSN	11.54		
DC	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2.38	70.4	17.3
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	1.00	29.6	7.3
	SIN	3.38		24.5
	SON	10.40		75.5
	TSN	13.78		
QY	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	3.05	81.6	23.6
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.69	18.5	5.4
	SIN	3.74		29.0
	SON	9.16		71.0
	TSN	12.90		

## 2.2 不同种植区休耕地土壤水溶性氮组成及分布特征

从表 2、图 2 可以看出,不同种植区休耕地土壤

水溶性氮组成以 SON 为主。本研究区休耕地土壤 SON 的含量范围在 4.11~14.34 mg/kg 之间,SON 占 TSN 的比例由高到低的排序为马场>大冲>青岩>关口>打通。其中,马场种植区休耕地土壤 SON 占 TSN 的比例最高,为 85.5%,其次为大冲和青岩种植区的休耕地,分别为 75.5%和 71.0%;打通种植区的最低,为 53.3%。土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量范围在 0.24~6.87 mg/kg 之间,平均含量为 2.69 mg/kg,打通种植区休耕地的最高,为 3.74 mg/kg,马场种植区休耕地的最低,为 0.86 mg/kg,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均含量由高到低的排序为打通>关口>青岩>大冲>马场。土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量范围在 0.17~2.6 mg/kg 之间,平均含量为 1.09 mg/kg,打通种植区休耕地的最高,为 1.66 mg/kg,青岩种植区休耕地的最低,为 0.69 mg/kg,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的平均含量由高到低的排序为打通>关口>大冲>马场>青岩。土壤 SIN 的组成以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为主,总体上不同种植区休耕地土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 占 SIN 的比例都要比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的高。分析结果显示不同种植区休耕地土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占 SIN 的比例差异不显著( $p>0.05$ ),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 占 TSN 的比例差异显著( $p<0.05$ ),NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占 TSN 的比例差异极显著( $p<0.01$ )。不同种植区中,休耕地土壤 SIN 的含量范围在 0.41~8.1 mg/kg 之间,平均含量为 3.78 mg/kg,打通种植区休耕地土壤 SIN 的含量最高,为 5.4 mg/kg,马场的最低,为 1.74 mg/kg,SIN 的平均含量由高到低的排序为打通>关口>青岩>大冲>马场。经分析不同种植区休耕地土壤的 SIN、SON 占 TSN 的比例差异极显著( $p<0.01$ )。

## 2.3 各形态氮在休耕地土壤剖面中的变化特征

图 3 为不同种植区休耕地各形态氮在土壤剖面中的变化。从图中可看出,本研究的不同种植区休耕地各层土壤中各氮的含量变化较大。在 0~20 cm 的表层土中,不同种植区休耕地的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量存在较大差异,青岩的最高,其次为关口,马场的最低,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量由高到低的排序为青岩>关口>打通>大冲>马场。经分析,不同种植区表层土的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量差异达到极显著水平( $p<0.01$ )。除了打通种植区土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 随着表层到 20 cm 深度时其含量在下降,20~40 cm 深度表现出增加的趋势,40~60 cm 呈现降低又增加的规律外,马场、关口、大冲、青岩 4 个种植区休耕地土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量随着土层的增加总体上表现出下降的规律。青岩种植区休耕地土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在土层 20~30 cm 深度时急

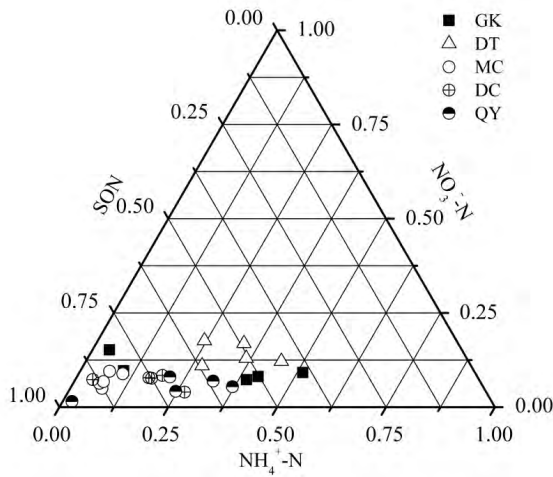


图 2 不同种植区休耕地土壤水溶性氮组成三角图  
Fig.2 Triangular diagram for water-soluble nitrogen of fallowed cropland soils from different planting areas

剧下降,到 30 cm 以后随着土层深度的增加变化不大。关口种植区土壤的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量从表层到 60 cm 土层深度在逐渐下降。土层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  中,在 0~20 cm 的表层土中,马场种植区的最高,其次是关口种植区,打通种植区的最低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量由高到低的排序为马场>关口>大冲>青岩>打通,经分析不同种植区表层土  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量差异达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。除了大冲种植区在 0~30 cm 深度中表现出先增加后降低的规律外,马场、关口、打通、青岩种植区  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  随着土壤表层到 30 cm 深度处表现出随土层增加而增加的规律,自 30 cm 深度往下,随着土层的增加含量在下降。在 TSN 和 SON 中,除了青岩种植区随着土壤表层到 20 cm 深度处降低外,其它种植区表现为随土壤表层到 20 cm 深度处先增加,20 cm 深度往下,随土层的增加含量在降低。从图中还明显看出,在 0~30 cm 的表层土中,现代农业种植区的马场、大冲,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的青岩休耕地土

壤 TSN、SON 的含量与传统农业种植区的关口种植区和混合农业种植区的打通存在明显差异,差异达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。

### 2.4 土壤水溶性氮与 pH、EC 和含水率的相关性分析

对土壤水溶性氮与 pH、EC 和含水率因子进行了相关性分析,结果见表 3。从结果可看出,土壤 TSN 含量与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 SON 之间的关系是极显著的正相关性,与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 pH 之间的关系为一般的正相关关系,与 EC 和含水率为负相关关系。土壤 SON 与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为一般的正相关关系,与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为显著的负相关关系,与 TSN 之间的关系是极显著的正相关关系,与 pH、EC、含水率为一般的负相关关系。土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与 SON 为显著的负相关关系,与 pH 为显著的正相关关系,与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TSN、EC、含水率为一般正相关关系。土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、SON、含水率为一般的正相关关系,与 TSN 为极显著的正相关性,与 pH、EC 为负相关关系。

## 3 讨论

水溶性氮素是土壤氮素最活跃的重要组成部分,其含量的高低决定着土壤氮素的可利用性,对研究土壤氮素迁移、转化、利用和氮循环有着重要意义<sup>[8, 27-28]</sup>。因此,许多研究者开展大量该方面的研究工作<sup>[21, 29]</sup>。牛颖权等<sup>[3]</sup>对天津盐渍化的农田和荒地土壤 SON 进行研究,得出农田土壤的 SON 含量为 5.1~13.4 mg/kg,荒地土壤的 SON 为 1.0~12.9 mg/kg,农田和荒地的 SON 含量差异明显。杨绒等<sup>[17]</sup>对黄土高原地区不同生态系统土壤的 SON 进行研究,发现黑垆土、红油土和淋溶褐土中 SON 的平均含量分别为 24.75、39.10 和 41.80 mg/kg,占土壤 TSN 的 51.25%、68.28% 和 68.57%。Christoua 等<sup>[30]</sup>的研究结果显示,土壤可溶性有机氮占土壤可

表 3 土壤水溶性氮与 pH、EC 和含水率的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of water-soluble nitrogen, pH, EC and water contents in fallowed cropland soils

项目	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	SON	TSN	pH	EC	含水率
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	1	0.183	0.213	0.532**	-0.187	-0.264	0.175
$\text{NH}_4^+\text{-N}$		1	-0.477*	0.148	0.397*	0.104	0.227
SON			1	0.782**	-0.099	-0.074	-0.253
TSN				1	0.100	-0.067	-0.086
pH					1	0.713**	0.337
EC						1	0.398*
含水率							1

注: \*\*为  $p < 0.01$ ; \*为  $p < 0.05$ 。



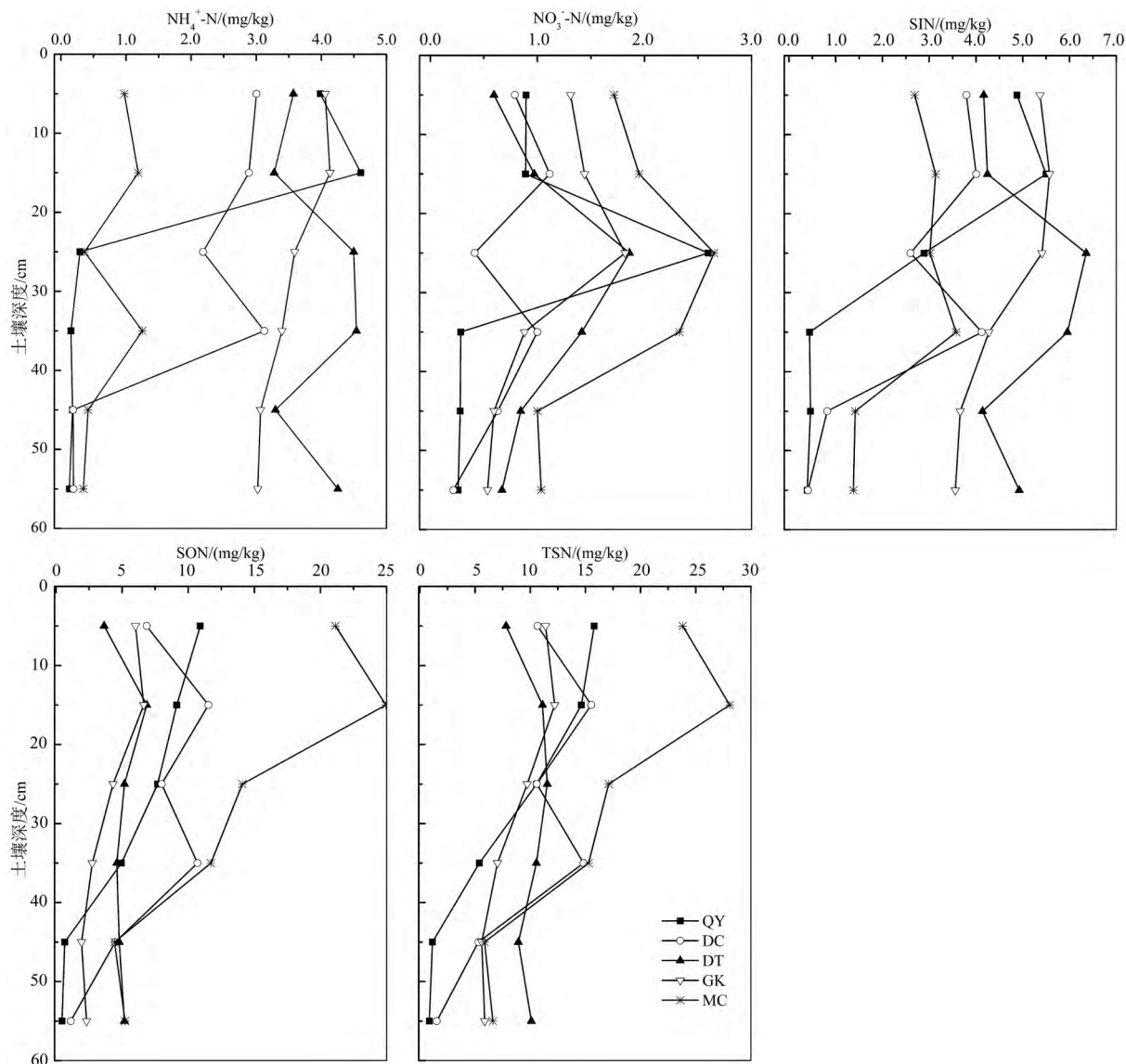


图3 不同种植区休耕地各形态氮在土壤剖面中的变化

Fig.3 Variations of different soil nitrogen contents in fallowed cropland soil profiles from different planting areas

溶性总氮的  $57 \pm 8\%$ 。本研究结果中,贵州喀斯特农业系统不同种植区休耕地土壤的 SON 含量为  $4.11 \sim 14.34 \text{ mg/kg}$ ,与牛颖权等<sup>[3]</sup>研究得出的农田土壤的 SON 含量接近。不同种植区休耕地土壤 SON 含量及 SON 占 TSN 的比例存在较大差异,SON 含量高的种植区是含量低种植区的 3.5 倍,SON 占 TSN 的比例相差达 32%。现代农业种植区,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区休耕地土壤 SON 的含量和 SON 占 TSN 的比例要比传统农业种植区休耕地土壤的 SON 含量高。据我们调查,在现代农业种植区中,为了更好地提高作物的产量,获得更高的经济效益,人们在作物的种植中向农田中施入大量牛粪、猪粪等农家肥和化肥作为底

肥,一年可以种植 3~4 茬。在高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区中,人们对农田的高度利用和化肥的高频率施用及利用人粪尿及生活污水进行灌溉。这些有机物料的大量施入增加了土壤氮素含量,提高了土壤的供氮能力。而在传统农业种植区中,人们施入土壤中的有机物料的量以及对土地的利用强度相对低,管理都比较粗放。因此,导致了现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区土壤 SON 的含量和 SON 占 TSN 的比例要比传统农业种植区的高。周碧青等<sup>[21]</sup>对亚热带不同果园土壤可溶性有机氮的研究也发现,果园土壤 SON 的含量高跟有机肥的大量施入有关。Wang<sup>[16]</sup>等的研究也表明土壤中施

用尿素会降低土壤 SON 含量,而施用粪肥和秸秆可提高土壤 SON 含量,说明土壤中 SON 含量的高低跟施入的有机物料有关。此外通过本研究结果也看出,传统农业种植区中土壤 SON 的变异相对较大,而现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区中土壤 SON 的变异相对较小,原因可能是在传统农业种植区中,人们施入土壤的肥料种类不一、数量相对低、对土地的利用与管理等方面存在较大的差别,而在现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区中,人们向土壤中施入的肥料种类、数量和管理等方式都基本接近,而且大量肥料施入和高强度利用和精细管理后,使得氮含量在不同区域土壤中差异变小。

牛颖权等<sup>[3]</sup>对天津盐渍化农田和荒地土壤的研究结果显示, $\text{NO}_3^-$ -N 和 SON 是土壤水溶性氮素的主要组分,分别占农田土壤 TSN 的 38%~72% 和 26%~60%,荒地土壤的 32%~75% 和 16%~58%。而本研究的结果显示,贵州喀斯特农业系统不同种植区休耕地水溶性氮组成以 SON 和  $\text{NH}_4^+$ -N 为主,休耕地土壤 SON、 $\text{NH}_4^+$ -N 占 TSN 的比例分别为 53.29%~85.48% 和 7.18%~32.41%。Nie<sup>[6]</sup>等对不同施肥类型水稻土的可溶性有机氮的研究得出,在 0~20 cm 的表层土中,可溶性有机氮占总可溶性氮的比例为 54%~64%,在 40~60 cm 可增加到 63%~97%。原因可能与不同地区土壤类型、施入土壤的肥料、管理模式等因素有关。总体上本研究区的休耕地土壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 占 SIN 的比例都要比  $\text{NO}_3^-$ -N 的高。不同种植区休耕地土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N/SIN 和  $\text{NO}_3^-$ -N/SIN 的比例差异不显著 ( $p>0.05$ ), $\text{NH}_4^+$ -N/TSN 差异达到显著水平 ( $p<0.05$ ), $\text{NO}_3^-$ -N/TSN 的差异达到极显著水平 ( $p<0.01$ )。在土壤 SIN 中,本研究结果显示传统农业种植区土壤 SIN 的含量要比现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的高,不同种植区中土壤 SIN/TSN 的差异达到极显著水平 ( $p<0.01$ ),与 Andraski 等<sup>[31]</sup>、葛体达等<sup>[32]</sup>研究的有机管理模式土壤 SIN 含量低于常规生产系统土壤的结果一致。

本研究中,不同种植区休耕地 0~20 cm 表层土中的  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、SON 都存在较大差异, $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量差异达到了极显著水平 ( $p<0.01$ )。除了打通种植区土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 随着表层到 20 cm 含量在下降,20~40 cm 增加,40~60 cm 降低又增加的规

律外,马场、关口、大冲、青岩种植区休耕地土壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 随着土层的增加总体上表现出下降的规律。青岩种植区休耕地土壤在土层 20~30 cm 深度处急剧下降,30 cm 以后土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 随着土层增加含量变化不大。关口种植区土壤从表层到 60 cm, $\text{NH}_4^+$ -N 是逐渐下降的。在  $\text{NO}_3^-$ -N 的垂直变化中,除了大冲种植区在 0~30 cm 先增加后降低的规律外,马场、关口、打通、青岩种植区的  $\text{NO}_3^-$ -N 随土壤表层到 30 cm 随土层的增加而增加,自 30 cm 深度往下,随着土层的增加, $\text{NO}_3^-$ -N 含量在下降。在 TSN 和 SON 的变化中,除了青岩种植区为随着土壤表层到 20 cm 深度处降低外,其他种植区随着土壤表层到 20 cm 深度先增加,20 cm 深度往下,随着土层的增加而降低,说明土壤中 SON 容易向下淋溶而流失。在牛颖权等<sup>[3]</sup>的研究中,农田和荒地土壤 TSN 含量均是随着剖面深度的增加呈降低趋势,但农田土壤在 40 cm 以下有显著增加趋势,荒地则变化不大。原因是农田土壤深处的氮素积累可能与施肥、灌溉,以及氮素向下淋溶在土壤深处积累有关。土壤 SON 随着土壤深度增加呈降低趋势,且都是在 0~20 cm 处土壤中 SON 含量变化较快,20 cm 向下变化不大,与土壤 SON 容易向下淋溶有关。从本研究中也看出,SON 容易向下淋失,不易在土层深部发生积累,容易造成氮素的流失和对环境带来潜在的污染。本研究也显示 SIN 含量不仅在传统农业种植区表层土壤中要比现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的高外,在深层土壤中传统农业的总体上也要比现代农业,高强度土地利用、高频率化肥施用和生活污水灌溉种植区的高,而 SON 则相反,说明不同类型的农业对土壤氮的影响不同<sup>[31-32]</sup>。

## 4 结论

贵州喀斯特山地农业系统不同种植区休耕地土壤 SIN、SON 含量范围分别为 0.41~8.1、4.11~14.34 mg/kg,平均含量为 3.78 和 8.62 mg/kg,不同种植区休耕地土壤 SON 含量存在较大差异,但差异不显著。土壤水溶性氮素组成以 SON 和  $\text{NH}_4^+$ -N 为主,SON 占 TSN 的比例高达 85.5%,不同种植区休耕地土壤的 SIN、SON 占 TSN 的比例差异显著。表层土中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、TSN、SON 含量存在显著差异,在垂直变化上, $\text{NH}_4^+$ -N 总体上表现为随着土层的增加而下降。 $\text{NO}_3^-$ -N 表现为自土壤表层到 30 cm

深度随着土层的增加而增加,30 cm 深度往下,随着土层的增加而下降。TSN 和 SON 表现为随着表层到 20 cm 深度处先增加,从 20 cm 深度往下,随着

土层的增加而降低,说明 SON 容易向下淋失,不易在土层深处发生积累,造成氮素的流失和带来潜在的环境污染风险。

## 参 考 文 献

- [1] Murphy D, Macdonald A, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5-6): 374-387.
- [2] Victoria B W, James J G, Andrew J M, et al. Impact of land use on soluble organic nitrogen in soil [J]. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2004, 4(6): 53-60.
- [3] 牛颖权, 李军, 杨曦, 等. 天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征 [J]. *地球与环境*, 2016, 44(2): 169-176.
- [4] Bhogal A, Murphy D, Fortune S, et al. Distribution of nitrogen pools in the soil profile of undisturbed and reseeded grasslands [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(4): 356-362.
- [5] Qualls R G, Richardson C J. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62(2): 197-229.
- [6] Nie S A, Zhao L X, Lei X M, et al. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: Implications for its potential loss [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 58-64.
- [7] 张彪, 高人, 杨玉盛, 等. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1635-1640.
- [8] 李兰海, 刘翔, 朱咏莉. 垦殖对伊犁河谷湿地土壤可溶性有机氮含量的影响 [J]. *南京林业大学学报*, 2017, 41(3): 1-6.
- [9] Jensen L S, Mueller T, Magid J, et al. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(7): 1043-1055.
- [10] David L J, John R H, Victoria B W, et al. Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(3): 413-423.
- [11] Song G, Zhao X, Wang S Q, et al. Dissolved organic nitrogen leaching from rice-wheat rotated agroecosystem in Southern China [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1): 93-102.
- [12] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest [J]. *Ecology*, 1991, 72(1): 254-266.
- [13] Song L C, Hao J M, Cui X Y. Soluble organic nitrogen in forest soils of northeast China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2008, 19(1): 53-57.
- [14] Huang C Y, Jien S H, Chen T H, et al. 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 [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1061-1070.
- [15] Lusk M G, Toor G S, Inglett P W. Characterization of dissolved organic nitrogen in leachate from a newly established and fertilized turfgrass [J]. *Water Research*, 2018, 131(15): 52-61.
- [16] Wang L Y, Zheng X L, Tian F F, et al. Soluble organic nitrogen cycling in soils after application of chemical organic amendments and groundwater pollution implications [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 217: 43-51.
- [17] 杨绒, 严德翼, 周建斌, 等. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性 [J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1397-1403.
- [18] Wu Y J, Clarke N, Mulder J. Dissolved organic nitrogen concentrations and ratios of dissolved organic carbon to dissolved organic nitrogen in throughfall and soil waters in Norway Spruce and Scots Pine Forest Stands throughout Norway [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 210(1): 171-186.
- [19] 周晓光, 黄丹枫, 葛体达, 等. 有机和常规蔬菜生产系统土壤可溶性有机氮含量及特征 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2010, 28(5): 420-438.
- [20] 吕学军, 刘庆, 陈印平, 等. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响 [J]. *农业现代化研究*, 2011, 32(4): 505-508.
- [21] 周碧青, 陈成榕, 张黎明, 等. 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 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(9): 1735-1741.
- [22] 王吉, 杨曦, 朱兆洲, 等. 青藏高原土壤可溶性氮组成特征 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6): 1660-1666.
- [23] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性研究 [J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 77-79.
- [24] 高贵龙, 邓自民, 熊康宁, 等. 喀斯特的呼唤与希望 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003: 1-7.
- [25] 苏维词, 朱文考. 贵州喀斯特地区生态农业发展模式与对策 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2000, 16(1): 40-44.
- [26] 谢红梅. 喀斯特地区土地利用变化与可持续利用研究 [J]. *国土与自然资源研究*, 2012(2): 27-29.
- [27] Xing S H, Chen C R, Zhang H, et al. Genotype and slope position control on the availability of soil soluble organic nitrogen in tea plantations [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 103(1): 245-261.
- [28] Xing S H, Chen C R, Zhou B Q, et al. Soil soluble organic nitrogen and active microbial characteristics under adjacent coniferous and broadleaf



- plantation forests[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(4): 748-757.
- [29] Chen C R, Xu Z H. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(6): 363-378.
- [30] Christou M, Avramides E J, Roberts J P, et al. Dissolved organic nitrogen in contrasting agricultural ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8): 1560-1563.
- [31] Andraski T W, Bundy L G, Brye K R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 29(4): 1095-1103.
- [32] 葛体达, 唐东梅, 宋世威, 等. 不同园艺生产系统土壤可溶性有机氮差异[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 331-336.

## Distribution and Composition of Water-soluble Nitrogen in Abandoned Cropland Soils from Different Cultivated Areas of Karst Mountain Agricultural System in Guizhou

YANG Cheng<sup>1</sup>, MENG Fanfei<sup>1</sup>, CUI Lifang<sup>1</sup>, PENG Yan<sup>1</sup>, FAN Bailing<sup>1</sup>, LIU Taoze<sup>2</sup>

(1. College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The abandoned cropland soils in different cultivated areas of karst mountain agricultural system in Guizhou were selected as research object and its composition and distribution characteristics of water-soluble nitrogen were studied. The results showed that the content of SON ranged from 4.11 mg/kg to 14.34 mg/kg, with an average content of 8.62 mg/kg. No significant difference was found for SON contents of abandoned cropland soils in different cultivated areas ( $p > 0.05$ ), while significant difference for the ratios of SON to TSN ( $p < 0.01$ ). The variation of SON in traditional agricultural cultivated areas was larger than that in other areas. SON and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  were the main form of water-soluble nitrogen in the abandoned cropland soils, the difference of ratio for  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  to SIN was not significant ( $p > 0.05$ ), but the ratio of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  to TSN and SIN to TSN was significant ( $p < 0.01$ ), respectively. The content of SIN in surface and deep soil of traditional agricultural cultivated areas were both higher than that of other areas, but the content of SON was contrary, indicating that different types of agriculture have different effects on nitrogen in soil. There was a significant difference for  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , TSN and SON content in surface soils among different cultivated areas ( $p < 0.01$ ). A downward trend with the increase of soil layer for the content of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was found in these cultivated areas except for Datong area. The content of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  increased with the increase of soil depth from surface to 30 cm, and decreased with the increase of soil depth from 30 cm to deeper layer in these cultivated areas but first increased and then decreased with the increase of soil depth from surface to 30 cm in Dachong area. For TSN and SON, showed that their contents first increased with the depth of soil surface to 20 cm, and then decreased with the increase of soil depth from 20 cm to deeper layer in these cultivated areas but decreased with the increase of soil depth from surface to 20 cm in Qingyan area. indicating that SON is easy to leach downward and not easy to accumulate in the deep layer of soil, causing nitrogen loss and increasing environmental pollution risk, which should be concerned.

**Key words:** Water-soluble nitrogen; karst mountain agricultural system; abandoned cropland; soil