

黄土高原典型土壤有机氮矿化过程中非交换性铵态氮的变化

李紫燕^{1,2}, 李世清^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以黄土高原从北向南不同地区典型土壤类为对象, 采用 Bremner 淹水培养法, 研究黄土高原不同生境条件下土壤有机氮矿化过程中非交换性铵态氮的变化。结果表明: 土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 随 Bremner 法淹水培养时间延长, 含量增加。不同土壤类型在培养 20 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量存在显著差异($p = 0.0229$), 而培养 40 d 和 60 d 时差异不显著(p 分别为 0.1379 和 0.1159)。培养期间非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量均表现为以土垫旱耕人为土最大, 其次是黄土正常新成土, 筒育干润均腐土和干湿砂质新成土较小; 添加有机物料极显著影响培养期间的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量(培养 20 d、40 d 和 60 d 时 p 分别为 0.0002、0.004 和 0.0003), 表现为紫花苜蓿和长芒草土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量均极显著高于不添加有机物料的对照土壤; 在培养 20 d、40 d 和 60 d 时, 加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 土样非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量显著大于不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 土样(p 分别为 0.0037、0.0033 和 0.0027), 这是土壤对 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 固定的必然结果; 不同植被类型土壤培养 20 d 时的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量差异显著($p = 0.0434$), 培养 40 d 和 60 d 时差异不显著(p 分别为 0.7378 和 0.5375); 长期秸秆和氮肥配施土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量大于不施肥对照土壤, 但差异不显著土壤黏粒、全氮和有机质与培养 0 d、20 d、40 d 和 60 d 时土壤的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均呈极显著正相关; 而非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量与粘粒无相关性, 但与全氮和有机质呈显著正相关。

关键词: 非交换性铵态氮; 土壤类型; 植被类型; 有机物料

中图分类号: S153.61

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)02-0306-05

Change of Non-exchangeable Ammonium Nitrogen in the Process of Organic Nitrogen Mineralization of Typical Soils on Loess Plateau

LI Zi-yan^{1,2}, LI Shi-qing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the content change of non-exchangeable ammonium nitrogen during the process of soil organic nitrogen mineralization, the typical soils collected from north to south on Loess Plateau were chosen as the material, and the Bremner incubation method was conducted and the soils were incubated for 60 d. The results showed that the contents of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increased with increasing the incubation time. The amount increased for non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ existed significant difference ($P = 0.0229$) among the different soil types after the 20d of incubation, however, it was not significantly different when incubation at 40 d ($P = 0.1379$) and 60 d ($P = 0.1159$). The increased amount of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ during the incubation indicated as the following tendency, namely, Eum-Orthic Anthrosols > Los-Orthic Entisols > Hap-Ustic Isohumisols > Ust-Sandiic Entisols. Organic material influenced significantly the increased amount of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (P was 0.0002, 0.0004 and 0.0003 when incubated at 20 d, 50 d and 60 d, respectively). $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increased remarkably when *Stipa bungeana* and *Medicago sativa* were added compared with no addition. The contents of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increased significantly when added $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ compared without addition at 20 d, 40 d and 60 d of incubation and P was 0.0037, 0.0033 and 0.0027, respectively. It was the result that the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ from $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ was fixed within the soil. The increased amount of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ increased significantly for different soils, on which different vegetation types grew before the collection of soil samples, when incubated at 20 d ($P = 0.0434$), but not significantly at 40 d and 60 d ($P = 0.7378$ and 0.5375). The increased amount of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the soil, on which crop straw and nitrogen fertilizer had been incorporated for a long-term period, was larger than that of no addition, but it was not significantly different among these two fertilization models. Soil clay, total N and organic matter were positively correlated remarkably with the contents of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, the increased amount of non-exchangeable $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ had no correlation with soil clay, whereas it had significantly positive correlation with total N and organic matter.

Key words: Non-exchangeable ammonium nitrogen; soil type; vegetation type; organic material

* 收稿日期: 2006-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(90502006, 30571116)

作者简介: 李紫燕(1977-), 女, 在职博士, 从事土壤-植物氮素营养研究; 通讯作者: 李世清, 男, 博导, 从事土壤-植物氮素营养研究。

越来越多的研究表明,土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不仅占土壤全氮量比例较高^[1],而且土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的释放对植物吸氮量有较高的贡献,贡献率高达 50%~80%^[2]。因此,被认为非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是土壤的有效氮潜在"氮库",它是植物生育期间的重要有效氮素来源。国内外学者利用同位素示踪法研究认为,当季由施肥"新固定的铵"较为有效^[3,4],在没有植物吸收情况下,有机氮矿化释放出的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可被黏土矿物固定。一般认为,贮存在矿物晶层中的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不能被微生物利用,因此可避免硝化和淋溶损失,对减少土壤氮素损失有利^[5,6]。国内外目前对于影响土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 固定与释放因素的研究方面^[7~11],取得了大量进展,发现非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的高低主要受土壤类型、土壤矿物组成、气候条件、人为活动(如耕作、施肥、灌溉)、土壤 pH 值、土壤钾浓度及有机质含量等因素影响。黄土高原上形成的黄土性土壤,黏土矿物类型主要为 2:1 的型蒙脱石、伊利石等,它们对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有较强的固定能力,我们过去进行的研究已证明了这一点^[2]。

然而对有机氮矿化过程,特别是在淹水培养条件下黄土高原典型土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 动态变化过程的研究较少。本实验通过淹水培养试验,测定在土壤氮素矿化过程中非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化及其影响因素,为充分了解黄土高原主要土壤氮库,判断用淹水培养法评价土壤供氮能力时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化对供氮能力测定结果的影响等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和有机物料

从黄土高原由北向南依次在神木、安塞、富县、洛川、杨凌等地分别采取不同植被类型(林地、草地、农田、裸地)条件下 0~20 cm 土层土样(表 2~1),并记录海拔高度和经、纬度;土壤类型根据中国土壤系统分类标准确定^[13]。在每田块采集 3 点 0~20 cm 土层土样,将其混合组成样品后,装入密封袋带回实验室。土样经风干、研磨后过 3 mm 筛,以研

究 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 回收率及测定有关土壤性质指标。

采集 C/N 较高的长毛草(C/N 比为 43.3)和 C/N 较低的紫花苜蓿(C/N 比为 21.7),烘干、粉碎、过 0.25 mm 筛后,备用。有机物料采集 C/N 较高(43.3)的长毛草和 C/N 较低(21.7)的紫花苜蓿,烘干、粉碎、过 0.25 mm 筛后,备用。

1.2 试验设计

试验设 3 个因子:土壤、添加有机物料和铵态氮肥,土壤包括 22 个;添加有机物料设不加和分别加入低 C/N 的苜蓿、高 C/N 的长毛草等 3 种情况;铵态氮肥设不添加和添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等 2 个水平,组成完全方案,共 132 个处理组合,每个重复 2 次。有机物料和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 添加量按 200 mg N/kg 土添加,用 Bremner 提出的淹水法培养法(5 g 土壤+12.5 ml 蒸馏水)进行淹水培养,培养管用 80 ml 加塞塑料离心管。分别在培养 0 d、20 d、40 d 和 60 d 时将离心管中的土壤在 50℃ 下烘干,研细,过 0.25 mm 筛,以测定非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,测定时重复 2 次以上。

1.3 测定方法

植物茎叶烘干、粉碎、过 0.25 mm 筛后,全氮用开氏法测定全氮;土壤可浸取态矿质氮 Bremner 法浸取,连续流动分析仪测定;土壤有机质用重铬酸钾-外加热容法^[14];壤全氮用开氏法基本性质用常规法^[15]进行测定。土壤可浸取态矿质氮用流动分析仪测定^[16];非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 用 Bremner-Silvar^[17,18]法测定,其主要步骤为,称取 1.00 g 过 100 目筛的土样,将其置于 200 ml 高型烧杯中,加入 20 ml 碱性次溴酸钾(KBrO)溶液,并用盖子盖住,摇匀后静置 2 h。加蒸馏水 60 ml,在电炉或电热板上暴沸 5 min,冷却,静置(最好过夜)。倾去上层清液,以 0.5 mol/L KCl 溶液将土样洗入 100 ml 离心管中,土液体积共 80 ml,振荡数次,离心(离心速度为 1 000 转/分)共 10 min。然后倾去上层清液,如此再洗 1 次,将洗净的土样加入 20 ml 5 mol/L HF-HCl 溶液,振荡 24 h 后,用自动定氮仪测定(加入 15 ml 10 mol/L KOH),用 2% 硼酸溶液吸收,0.01 mol/L 的 H_2SO_4 滴定。

表 1 供试土壤

编号	采样点	经度, 纬度	海拔/m	地形	植被	土壤类型
1	神木六道沟 ¹	E110°22′ 1.38″ N38°47′ 35.22″	1198	坡地	黄豆	干湿砂质新成土 ⁷
2	神木六道沟	E110°22′ 2.22″ N38°47′ 35.1″	1202	坡地	弃耕土壤	干湿砂质新成土
3	神木六道沟	E110°22′ 6.78″ N38°47′ 34.5″	1291	坡地	紫花苜蓿	干湿砂质新成土
4	神木六道沟	E100°22′ 3.66″ N38°47′ 40.44″	1216	坡地	弃耕土壤	干湿砂质新成土
5	神木六道沟	E110°21′ 57.6″ N38°47′ 41.28″	1189	坡地	苜蓿	干湿砂质新成土
6	神木六道沟	E110°21′ 56.7″ N38°47′ 42.05″	1188	坡地	黄豆	干湿砂质新成土
7	安塞墩山 ²	E109°18′ 51.18″ N36°51′ 13.56″	1289	坡地	谷子	黄土正常新成土 ⁸
8	安塞墩山	E109°18′ 48.24″ N36°51′ 12.72″	1293	坡地	沙打旺	黄土正常新成土
9	安塞墩山	E109°19′ 5.88″ N36°51′ 33.6″	1193	坡地	刺槐	黄土正常新成土
10	安塞纸坊沟 ³	E109°15′ 9.72″ N36°44′ 52.8″	1137	坡地	刺槐	黄土正常新成土
11	安塞纸坊沟	E109°15′ 13.02″ N36°44′ 33.6″	1250	坡地	柠条	黄土正常新成土
12	安塞纸坊沟	E109°15′ 9.48″ N36°44′ 25.2″	1123	坡地	谷子	黄土正常新成土
13	富县子午岭 ⁴	E109°08′ 55.2″ N36°05′ 27.48″	1228	坡地	裸地(开垦时间较短)	黄土正常新成土
14	富县子午岭	E109°08′ 55.2″ N36°05′ 27.48″	1228	坡地	松树	黄土正常新成土
15	富县子午岭	E109°08′ 55.2″ N36°05′ 27.48″	1228	坡地	裸地(开垦时间较短)	黄土正常新成土
16	富县子午岭	E109°08′ 55.2″ N36°05′ 27.48″	1196	坡地	混交林	黄土正常新成土
17	富县子午岭	E109°26′ 59.7″ N35°59′ 34.44″	1196	坡地	蒿草	简育干润均腐土 ⁹
18	富县子午岭	E109°26′ 59.7″ N35°59′ 34.44″	1196	坡地	蒿草	简育干润均腐土
19	洛川 ⁵	E109°24′ 25.8″ N35°43′ 52.5″	1116	平地	紫花苜蓿	简育干润均腐土
20	洛川	E109°24′ 25.8″ N35°43′ 51.88″	1115	平地	玉米	简育干润均腐土
21	杨凌 ⁶	E108°5′ 10.71″ N34°17′ 4.35″	520	平地	小麦	土垫旱耕人为土 ¹⁰
22	杨凌	E108°5′ 10.71″ N34°17′ 4.35″	520	平地	小麦	土垫旱耕人为土

1) Shengmu Liudaogou; 2) Ansai Dunsan; 3) Ansai Zhifanggou; 4) Fuxian Ziwu ling; 5) Luochuan; 6) Yangling; 7) Ust- Sandiic Entisols; 8) Los- Orthic Entisols; 9) Hap- Ustic Isohumisols; 10) Eum- Orthic Anthrosols.

表 2 供试土壤性质

编号	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	黏粒含量/% (< 0.001 mm)	起始 NH ₄ ⁺ - N /(mg·kg ⁻¹)	非交换性铵态氮 NH ₄ ⁺ - N (mg·kg ⁻¹)
1	4.25	0.24	18.9	7.1	155.5
2	2.95	0.26	14.9	5.0	160.7
3	3.94	0.24	11.9	7.3	160.3
4	3.00	0.21	15.4	5.3	169.8
5	6.75	0.31	13.9	8.1	148.5
6	5.19	0.25	13.1	6.3	163.4
7	10.29	0.51	16.7	6.6	167.2
8	10.29	0.53	15.7	6.6	170.1
9	12.54	0.72	17.8	9.7	169.0
10	14.29	0.56	13.2	7.9	156.0
11	15.15	0.70	17.5	8.6	178.6
12	15.89	0.81	19.2	8.7	188.8
13	14.12	0.75	21.3	7.2	191.7
14	40.64	1.52	12.1	11.9	223.5
15	26.53	1.21	19.4	10.6	186.6
16	30.40	1.41	13.9	11.6	188.0
17	17.92	0.98	19.9	8.7	190.7
18	18.88	0.81	18.2	8.4	228.9
19	11.97	0.59	21.3	7.6	208.6
20	13.39	0.69	28.5	6.4	197.7
21	18.09	0.93	32.6	9.0	246.8
22	24.57	1.16	40.0	12.9	248.9

2 结果与分析

2.1 不同土壤有机氮矿化过程中非交换性 NH₄⁺ - N 的变化

本研究发现,不同土壤非交换性 NH₄⁺ - N 显著不同

表 3 不同土壤有机氮矿化过程矿物
非交换性 NH₄⁺ - N 的变化

土壤类型	样品数	非交换性 NH ₄ ⁺ - N / (mg·kg ⁻¹)				增加量 / (mg·kg ⁻¹)			增加率 / %		
		0 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d
干湿砂质新成土	6	159.7D	183.2C	181.3C	172.5	23.5b	21.6a	12.8a	14.7	13.5	8.0
黄土正常形成土	10	177.8C	219.8B	205.4	200.1B	42.0ab	27.5a	22.3a	23.6	15.5	12.5
间育干润均腐土	4	196.4B	221.6B	216.5	218.2B	25.1b	20.1a	21.8a	12.8	10.2	11.1
土垫旱耕人为土	2	247.8A	304.4A	288	286.5A	56.5a	40.2a	38.7a	22.8	16.2	15.6

注:同一列中平均值后不同的大写或小写字母分别表示差异极显著($p < 0.01$)或显著($P < 0.05$),相同的字母表示差异不显著($P > 0.05$),下表同。

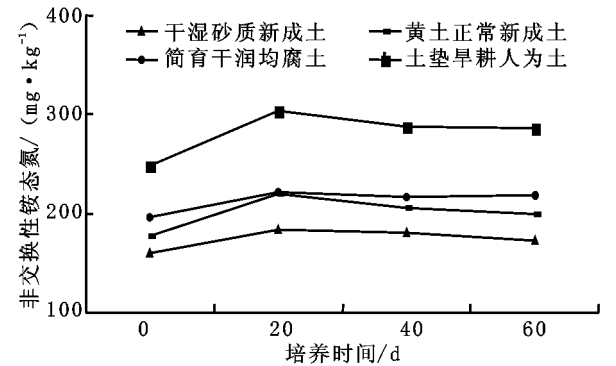


图 1 淹水培养过程中非交换性铵态氮的变化

2.2 添加有机物料对有机氮矿化过程矿物非交换性 NH₄⁺ - N 态氮的影响

从平均看,添加有机物料对培养 20 d、40 d 和 60 d 非交

(表 3),无论在那个培养阶段,从土垫旱耕人为土、筒育干润均腐土、黄土正常形成土、干湿砂质新成土,非交换性 NH₄⁺ - N 含量依次下降。从起始非交换性 NH₄⁺ - N 看,这 4 种的非交换性 NH₄⁺ - N 分别为 247.8 mg/kg、196.4 mg/kg、177.8 mg/kg 和 159.7 mg/kg,可见,黄土高原土壤非交换性 NH₄⁺ - N 从南到北依次降低。

非交换 NH₄⁺ - N 平均量随培养时间的变化趋势见图 1。从图 1 可知,非交换性 NH₄⁺ - N 随培养时间延长,含量增加。从非交换性 NH₄⁺ - N 增加量(培养期间测定的非交换性 NH₄⁺ - N 时含量与 0 d 的差值)看(表 3),不同土壤类型间存在显著差异($p = 0.0229$)。在培养 20 d 时,土垫旱耕人为土的非交换性 NH₄⁺ - N 增加量最高,为 56.5 mg/kg,黄土正常新成土、筒育干润均腐土和干湿砂质新成土的非交换性 NH₄⁺ - N 增加量依次降低,分别为 42.0 mg/kg、25.1 mg/kg 和 23.5 mg/kg,三者间差异不显著;干湿砂质新成土的非交换性 NH₄⁺ - N 增加量最小。土垫旱耕人为土的非交换性 NH₄⁺ - N 增加量分别比黄土正常新成土、筒育干润均腐土和干湿砂质新成土增加 14.5(34.5%)、31.4 mg/kg(125.1%) 和 33.0 mg/kg(140.4%)($p < 0.05$)。

不同土壤类型在培养 40 d 和 60 d 时的非交换性 NH₄⁺ - N 增加量差异不显著(p 分别为 0.1379 和 0.1159),培养 40 d 时非交换性 NH₄⁺ - N 的增加量大小顺序为土垫旱耕人为土(40.2 mg/kg) > 黄土正常形成土(27.5 mg/kg) > 干湿砂质新成土(21.6 mg/kg) > 筒育干润均腐土(20.1 mg/kg),培养 60 d 时非交换性 NH₄⁺ - N 的增加量从土垫旱耕人为土(38.7 mg/kg)、黄土正常形成土(22.3 mg/kg)、筒育干润均腐土(21.8 mg/kg)和干湿砂质新成土(12.8 mg/kg)依次降低。

各期非交换性 NH₄⁺ - N 的增加量均表现为土垫旱耕人为土最大,其次是黄土正常新成土,筒育干润均腐土和干湿砂质新成土较小,这可能与土垫旱耕人为土黏粒含量最高,干湿砂质新成土黏粒含量最小有关。

换性 NH₄⁺ - N 有极显著影响, p 分别为 0.0002、0.004 和 0.0003。培养 20 d 时,添加紫花苜蓿和长芒草土壤的非交换性 NH₄⁺ - N 分别为 79.9 mg/kg 和 66.4 mg/kg,分别比不加有机物料对照土壤(57.1 mg/kg)增加 22.8 mg/kg(39.9%) 和 9.3 mg/kg(16.3%);培养 40 d 时,添加紫花苜蓿和长芒草土壤的非交换性 NH₄⁺ - N 分别为 74.8 mg/kg 和 53.7 mg/kg,分别比不加有机物料对照土壤(47.2 mg/kg)增加 27.6(58.5%) 和 6.5(13.8%);培养 60 d 时,添加紫花苜蓿和长芒草的非交换性 NH₄⁺ - N 分别为 61.9 mg/kg 和 47.5 mg/kg,分别比不加有机物料对照土壤(41.1 mg/kg)增加 20.8 mg/kg(50.6%) 和 6.4 mg/kg(15.6%)。

本研究同时发现,添加紫花苜蓿培养后固定的非交换性 NH₄⁺ - N 比添加长芒草增加 14.4 mg/kg(30.3%)($p < 0.05$);在培养的各个阶段,添加紫花苜蓿土壤非交换性 NH₄⁺ - N 的增加量均比添加长芒草和对照土壤高,这可能与添加紫花苜蓿后能够矿化出较多的 NH₄⁺ - N 有关。

表 4 有机物料对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量的影响 (n= 22)

培养时间	非交换性氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				增加量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			增加率/%		
	0 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d
对照 CK	183. 8	240. 9C	231. 0B	224. 9C	57. 1C	47. 2C	41. 1C	31. 1	22. 4	22. 4
紫花苜蓿	183. 8	263. 7A	258. 5A	245. 6A	79. 9A	74. 8 A	61. 8A	43. 5	33. 6	33. 6
长芒草	183. 8	250. 2B	237. 5B	231. 3B	66. 4B	53. 7B	47. 5B	36. 1	25. 8	25. 8

2.3 加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响

在培养 20 d、40 d 和 60 d 时, 加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 与不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理土样非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量存在显著差异, p 分别为 0. 0037、0. 0033 和 0. 0027; 与培养前相比, 加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 后培养土样非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量显著大于不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 土样 ($p < 0. 05$): 培养 20 d、40 d 和 60 d 时加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 土样的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量分别

为 89. 2 mg/kg 、81. 4 mg/kg 和 68. 7 mg/kg , 同期不加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 土样的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量分别为 46. 4 mg/kg 、35. 6 mg/kg 和 31. 5 mg/kg , 前者比后者分别增加 42. 8 mg/kg (92. 2%)、45. 8 mg/kg (125. 5%) 和 37. 2 mg/kg (118. 1%), 显然接近 1/4 的肥料 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在培养期间被矿物固定, 说明矿物对肥料 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的固定不容忽视, 被固定的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 而且能保持较长时间。

表 5 加氮处理对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量的影响 (n= 22)

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	非交换性氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				增加量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			增加率/%		
	0 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d
0	183. 8	230. 2B	219. 4B	215. 3B	46. 4a	35. 6a	31. 5a	25. 3	19. 4	17. 2
200	183. 8	273. 0A	265. 2A	252. 5A	89. 2a	81. 4a	68. 7a	48. 6	44. 3	37. 4

2.4 长期施肥对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响

以杨陵土垫旱耕人为土为例, 研究长期施肥土壤对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量的影响(表 6)。在培养起始时, 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本相同, 长期不施肥和长期氮肥与秸秆配施土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 246. 8 mg/kg 和 248. 9 mg/kg , 培养后 2 种土壤的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均增加。结果表明(表 6), 在培养 20 d、40 d 和 60 d 时, 秸秆与氮肥长期配施与不施肥对照土壤的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量无显著性差异, p 分别为 0. 116 6、0. 128 0 和 0. 235 0。总体上表现为秸秆与氮肥配施土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量大于不施肥对照土壤: 培养 20 d、40 d 和 60 d 时秸秆与氮肥配施土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量分别比不施肥对照土壤增加 14. 8 mg/kg (30. 1%)、- 1. 6 mg/kg (- 3. 9%) 和 26. 4 mg/kg (103. 5%), 产生这一现象的原因可能与秸秆和氮肥长期配施增加了土壤易矿化氮有关。

2.5 植被类型对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量的影响

在培养起始(表 7), 不同植被类型土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在一定差异, 表现为农田土壤> 草地土壤> 裸地土壤

> 林地土壤, 农田土壤较高必然与长期施氮有关。培养后各土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均增加, 以培养 20 d 时增加幅度最大, 以后呈现下降或稳定趋势。

不同植被类型土壤在培养 20 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增量差异显著 ($p = 0. 043\ 4$), 其中林地土壤增加量最大, 为 56. 4 mg/kg , 显著大于草地和农田土壤增加量; 裸地、草地和农田土壤的增加量分别为 37. 9 mg/kg 、30. 8 mg/kg 和 25. 1 mg/kg , 三者间差异不显著。不同植被土壤间非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量在培养 40 d 和 60 d 时差异不显著 (p 分别为 0. 737 8 和 0. 537 5), 培养 40 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量大小顺序为林地 (28. 1 mg/kg) > 草地 (27. 9 mg/kg) > 裸地 (26. 6 mg/kg) > 农田 (20. 5 mg/kg); 而在 60 d 时, 大小顺序为草地 (26. 1 mg/kg) > 林地 (23. 1 mg/kg) > 农田 (17. 2 mg/kg) > 裸地 (17. 1 mg/kg)。显然, 在培养 20 d 和 40 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量顺序与起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本一致, 培养 60 d 时, 与起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的顺序相比发生了变化。

表 6 施肥对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响 (n= 22)

施肥方式	非交换性氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				增加量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			增加率/%		
	0 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d
不施肥	246. 8	295. 9	287. 8	272. 2	49. 1a	41. 0a	25. 5a	19. 9	13. 9	8. 8
秸秆+ 氮肥	248. 9	312. 8	288. 3	300. 8	63. 9a	39. 4a	51. 9a	25. 7	12. 6	18. 0

表 7 植被类型对对非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增量的影响

植 被	非交换性氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)				增加量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			增加率/%		
	0 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d	20 d	40 d	60 d
林地 $n= 4$	173. 8B	230. 3a	201. 9a	196. 9a	56. 4a	28. 1a	23. 1a	32. 5	16. 2	13. 3
裸地 $n= 4$	177. 2B	215. 1a	203. 8a	194. 3a	37. 9b	26. 6a	17. 1a	21. 4	15. 0	9. 7
草地 $n= 7$	180. 1B	210. 9a	208a	206. 2a	30. 8b	27. 9a	26. 1a	17. 1	15. 5	14. 5
农田 $n= 7$	195. 7A	220. 9a	216. 2a	212. 9a	25. 1b	20. 5a	17. 2a	12. 8	10. 5	8. 8

3 讨 论

过去大量研究发现, 土壤类型、黏土矿物种类及含量、气候条件、人为活动及有机质是影响土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的主要因子。本研究进行相关分析表明(表 8), 培养前土壤起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与黏粒和全氮与呈极显著正相关相关, 相关系数分别为 0. 875 5 ($p < 0. 000\ 1$) 和 0. 565 4 ($p = 0. 006\ 1$), 与有机质呈显著正相关关系, 相关系数为 0. 467 3 ($p = 0. 028\ 3$); 起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与不同结构体的相关性不同, 土壤起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 <

0. 25 mm 的结构体和 0. 25~ 1 mm 的结构体呈极显著正相关, 相关系数分别为 0. 712 2 ($p = 0. 000\ 2$) 和 0. 429 7 ($p = 0. 045\ 9$), 与 1~ 2 mm 和 2~ 5 mm 的结构体间相关性不显著, 相关系数分别为 0. 334 9 ($p = 0. 127\ 7$) 0. 320 6 ($p = 0. 145\ 8$), 显然, 这正好与 0. 25~ 1 mm 和 < 0. 25 mm 结构体中含有大量黏粒有关, 进一步说明黏粒含量高低显著影响非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。

对在培养期间非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量, 培养 20 d、40 d 和 60 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量与黏粒含量均无显著相关性, 相关系数分别为 0. 096 3 ($p = 0. 669\ 9$)、

0.175 6($p = 0.434\ 4$)和 0.294 6($p = 0.183\ 2$);培养 20 d 时非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量与全氮呈极显著正相关,相关系数为 0.743 5($p < 0.000\ 1$);培养 40 d 和 60 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量与全氮呈显著正相关,相关系数分别为 0.454 2($p = 0.033\ 7$)和 0.455 6($p = 0.033\ 1$);土壤有机质与培养 20 d 时的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量呈极显著正相关,相关系数为 0.733 7($p = 0.000\ 1$);与培养 40 d 时的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量呈显著相关,相关系数为 0.446 2($p = 0.037\ 4$);与培养 60 d 时的非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量均无显著相关性,相关系数为 0.419 9($p = 0.051\ 7$)。全氮和有机质与 60 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量相关性较差,可能与培养 40 d 后全氮和有机质中易矿化的成分逐渐降低,难矿化成分含量趋于恒量有关系。

表 8 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与部分土壤性质的相关系数

非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	结构体		黏粒	全氮	有机质
	< 0.25 mm	0.25~ 1 mm			
0 d	0.7122 ^{* *}	0.4297 [*]	0.8755 ^{* *}	0.5654 ^{* *}	0.4673 [*]
20 d 测定量	0.7193 ^{* *}	0.3248	0.6308 ^{* *}	0.7735 ^{* *}	0.7033 ^{* *}
40 d 测定量	0.7778 ^{* *}	0.2874	0.7705 ^{* *}	0.6684 ^{* *}	0.5878 ^{* *}
60 d 测定量	0.7198 ^{* *}	0.1797	0.7942 ^{* *}	0.6684 ^{* *}	0.5538 ^{* *}
20 d 增加量	0.462 [*]	0.5485	0.0963	0.7435 ^{* *}	0.7337 ^{* *}
40 d 增加量	0.4443 [*]	0.3999	0.1756	0.4542 [*]	0.4462 [*]
60 d 增加量	0.3888	0.1959	0.2946	0.4556 [*]	0.4199

* 和* * 分别代表差异达显著和极显著水平。

不同结构体与土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量相关性不同,小于 0.25 的结构体与培养 20 d 和 40 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量显著相关,相关系数为 0.462 ($p = 0.444\ 3$) 0.0304($p = 0.038\ 3$),与培养 60 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量无显著相关性,相关系数为 0.195 9($p = 0.073\ 7$)。0.25~ 1mm 结构体与培养 20 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量显著相关,相关系数为 0.429 7 ($p = 0.0466\ 8$);与培养 40 d、60 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量无显著相关性,相关系数为 0.399 9($p = 0.065\ 2$)和 0.195 9($p = 0.382\ 3$)。

赵明宇^[19]研究发现,土壤有机质、全氮含量与非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均呈较显著的正相关,其相关系数分别为 0.690 4和 0.744 9,施用有机肥土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量有一定减少,可能与试验初期植物吸收氮量较多,而土壤有机氮较少有关。Fright^[20]等研究结果表明有机质、全氮和有机氮含量均无显著相关性。不同研究结果不同,其原因可参考文献:

[1] 郭肠程,韩晓日.我国土壤氮素研究工作的现状与展望[M].北京:科学出版社.1986.

[2] Mengel K, et al. Release of non-exchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season [J]. Soil Science, 1981, 131(4): 226- 232.

[3] 文启孝,张晓华,杜丽娟,等.太湖地区主要土壤中的固定态铵及其有效性[J]. 土壤学报,1988,25(1): 22- 30.

[4] Keerthisinghe G, Mengel K, Datta S K D. The Release of non-exchangeable ammonium` (15N labeled) in wetland rice soils [J]. Soil Sci Soc Am, 1984, 48(2): 291- 294.

[5] 文启孝,等.土壤中的固定态铵[A].中国土壤学会.我国土壤氮素研究作的现状与展望[M].北京:科学出版社,1986. 34 - 35.

[6] Dnuy CF., Beeuchamp EG. Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high and-low-fixing Soil [J]. S S S A. J, 1991. 55: 125- 129.

[7] Kowalenk C G, Solution Yu S. Exchangeable and clay-fixed ammonium in south coast British Columbia soils Can[J]. Soil Sci. 1996. 76: 473- 483.

[8] Yough J. L., Aldag R. W. Inorganic forms of nitrogen in soil[A]. In: Stevenson F. J. Nitrogen in agricultural soils[C]. Agronomy, 1982, 22: 43- 46.

[9] 樊小林,张一平,等.壤土上固定铵动力学研究[J].西北农业大学学报,1994, 22(3): 87- 91.

能包括:(1)土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的来源并非唯一性,虽然有可能来自土壤有机氮矿化和施入的化肥氮,但有相当一部分可能来自成土母质的先天赋予,而且其可能达到的最大含量也只决定于土壤质地和黏土矿物组成,与有机质和有机氮的含量高低无关;(3)由于这些土壤是农田土壤,人们的一切农业措施如施肥将影响着土壤肥力,这些土壤一般较肥沃,从而其非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占全氮的比例相对较少。因此,在高肥力土壤中非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与有机质和有机氮可能无显著相关性。廖继佩、李忠佩等^[11, 21]研究也表明,非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 < 0.01 mm 的物理性黏粒呈显著正相关,但与 < 0.000 1 mm 的黏粒、有机质、全氮、有机氮和 CEC 相关性很差。韩晓日等^[23]指出,不同施肥处理非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与 0.001 mm 黏粒含量呈明显正相关,但与 0.01~ 0.001 mm 黏粒含量之间没有正相关关系。各土带内各土壤成土母质及成土年龄的多样性应该是这一差异的原因之一。本研究发现,土壤起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 < 0.25 mm 结构体、0.25~ 1 mm 结构体、黏粒、有机质和全氮均有显著或极显著相关性。虽然有机质与起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 间存在着正相关,但有机质的影响并非为原因,在黏粒含量高的黄土高原,南部土壤由于植物同化量高,有机质也较高,非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是全氮的一部分,二者也必然具有相关性。黏粒含量可能是影响起始非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的主要因子。< 0.25 mm 和 0.25~ 1 mm 结构体中含有大量黏粒,因此主要与非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈正相关,也似乎是一种必然。

不同土壤和植被有机质、全氮和黏粒含量见表 2。从平均看,不同土壤类型培养 20 d 非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加量大小顺序为土垫旱耕人为土> 黄土正常形成土> 间育干润均腐土> 干湿砂质新成土,这与其有机质、全氮和黏粒的含量从土垫旱耕人为土、黄土正常形成土、间育干润均腐土和干湿砂质新成土依次加降低有关。从植被类型看,裸地和草地非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量较大,这可能与裸地和草地的有机质、全氮和黏粒含量较高,特别是黏粒含量较高时有利于非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的固定有关。

本实验结果表明长期施肥处理与不施肥对照土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增加量在培养 20 d 时差异显著,培养 40 d 和 60 d 差异不显著。韩晓日^[22]棕壤连续 13 年定位试验也表明,长期施用化肥或低量有机肥对土壤非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均无显著影响,而施用高量有机肥区非交换性 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量比试验前平均增加 30.2% 。

4 结 论

山前褶皱丘陵的依次不断隆起是天山北麓内在构造活动的外在表现,反映了第四纪以来由于天山持续隆升,天山北麓在南北向的挤压作用下,山麓带的范围不断向准噶尔盆地方向扩展的演化趋势。

自中生代起,天山地区构造活动比较平静,以风化剥蚀作用为主,到早第三纪末晚第三纪初,古天山已经被剥蚀为起伏平缓的准平原^[1]。山前褶皱丘陵的演化可以分为以下几个阶段:

①晚第三纪中新世,这时天山大部分地区构造活动依然比较平静,第一排褶皱此时已经形成。

②晚第三纪上新世,天山地区开始发生间歇性构造活动,而且越来越强烈。第一排褶皱继续抬升。

③上新世晚期,早更新世初期,天山地区普遍发生了一次强烈的构造运动,岩相上表现为粗粒的西域砾岩开始沉

参考文献:

- [1] 中国科学院新疆地理研究所. 天山山体演化[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [3] 邓起东, 冯先岳, 尤惠川, 等. 新疆独山子—安集海活动逆断裂—褶皱带的变形特征及其形成机制[A]. 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(1)[C]. 北京: 地震出版社, 1991. 17—36.
- [4] 冯先岳, 邓起东, 石监邦, 等. 天山南北缘活动构造及其演化[A]. 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(1)[C]. 北京: 地震出版社, 1991. 1—15.
- [5] 彭希龄. 新疆第四纪沉积序列[A]. 干旱区新疆第四纪研究论文集[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 121—136.
- [6] 王永兴. 天山地区第四纪构造地貌演化—活动性陆内古板缘的一种造山模式[J]. 干旱区地理, 1995, 18(1): 27—35.
- [7] 杨晓平, 邓起东. 新疆独山子背斜的断裂扩展褶皱作用[A]. 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(6)[C]. 北京: 地震出版社, 1998. 66—73.
- [8] 张培震, 邓起东, 徐锡伟, 等. 天山北麓玛纳斯活动逆断裂—褶皱带的变形特征与构造演化[A]. 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究(6)[C]. 北京: 地震出版社, 1994. 18—30.
- [9] Molnar, P., Brown E T., Buchfiel B C., et al. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tianshan, China[J]. Geology, 1994, 102: 583—602.
- [10] Yin A, P Craig, Harrison T M, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tianshan[J]. Tectonics, 1998, (17): 1—27.

(上接第310页)

- [10] 庄作权, 陈鸿从, 等. 台湾土壤铵固定的研究[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 33—37.
- [11] 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 土壤固定态铵的影响因素[J]. 土壤, 2003, 35(1): 36—40.
- [12] 孙艳, 吴守仁. 壤土中固定态铵的含量及其对作物的有效性[J]. 土壤通报, 1989, 20(5): 205—207.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(修订方案)[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 1—218.
- [14] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [15] Bremner J M., Mulvaney C S. Nitrogen Total [A]. In: Page A L(ed). Methods of soil analysis, Part 2[M]. Am. Soc. of Agron. Malison, Wis., 1982. 595—624.
- [16] Smith K A, Scott A. Continuous flow and discrete analysis [A]. In: Smith K A(ed.). Soil analysis[M]. New York: Marcel Dekker, 1983. 115—169.
- [17] Silva J A, Bremner J M. Determination and isolooperatio analysis of different forms of nitrogen in soil. Fixed ammonium [J]. Soil Science society of America Proceeding, 1966, 30: 587—594.
- [18] Keeney D R, Nelson D W. Non-exchangeable ammonium [A]. In: Page A L. ed. Methods of Soil Analysis, Part 2 [M]. Madison, Wisconsin: America Society of Agronomy, 1982. 687—692.
- [19] 赵明宁, 韩晓日, 郭鹏程. 不同施肥条件下土壤固定态铵含量的动态变化[J]. 土壤通报, 1996, 27(2): 79—81.
- [20] Feigin A, Yaalon D II. Non-exchangeable ammonium in soils of Israel and its relation to clay parent materials [J]. Jour of Soil Sci, 1974, 25(3): 384—397.
- [21] 李忠佩, 程励励, 文启孝. 黄淮海平原土壤中的固定态铵[J]. 土壤通报, 1992, 23(5): 200—202.
- [22] 韩晓日, 郭鹏程等. 长期施肥对土壤固定态铵含量及其有效性影响[J]. 植物营养肥料学报, 1998, 41(1): 29—36.