

# 积盐对设施栽培土壤酸度及酸组成的影响

倪中应<sup>1</sup>, 石一珺<sup>1</sup>, 章明奎<sup>2</sup>

(1. 桐庐县农业和林业技术推广中心, 浙江 桐庐 311500; 2. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** [目的] 探讨盐渍化对土壤酸度的可能影响, 为了解设施栽培土壤的酸化过程提供依据。[方法] 采集了不同酸化特征的设施栽培土壤、露天栽培土壤和自然酸性土壤等 3 类表层土壤和剖面分层土壤样品, 通过化学分析和室内添加肥料盐及土壤洗盐模拟试验, 比较研究设施栽培土壤、露天栽培土壤与自然酸性土壤中活性酸、潜性酸、盐基饱和度之间关系差异及其受土壤盐分积累的影响。[结果] 与自然酸性土壤相比, 设施栽培土壤的酸是人为输入式, 其酸化主要发生在表层, 土壤剖面呈自上而下下降。在相同交换性酸水平的条件下, 设施栽培土壤的 pH 值最低, 其次为露天栽培土壤, 而自然酸性土壤的 pH 值相对较高。在相同土壤 pH 值的情况下, 自然酸性土壤的盐基饱和度明显低于设施栽培土壤和露天栽培土壤, 而设施栽培土壤的盐基饱和度高于露天栽培土壤; 设施栽培土壤的交换性酸中活性酸组成比例高于自然酸性土壤。增加中盐的积累可显著降低设施栽培土壤 pH 值; 设施栽培土壤的盐分淋洗过程在降低土壤盐分的同时也降低了土壤的活性酸(提高了土壤的 pH 值)。[结论] 盐分的积累增强了设施栽培土壤中潜性酸向活性酸的转化, 高量施用化肥不仅可直接通过酸性物质的输入促进土壤 pH 值的下降, 同时由此引起的盐分也可在一定程度上进一步降低土壤的 pH 值。

**关键词:** 设施栽培; 土壤酸化; 活性酸; 积盐

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)06-0043-06

**中图分类号:** S153.4

**文献参数:** 倪中应, 石一珺, 章明奎. 积盐对设施栽培土壤酸度及酸组成的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 43-48. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 007; Ni Zhongying, Shi Yijun, Zhang Mingkui. Effects of salt accumulation on acidification and acid composition in protected soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 43-48. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 007

## Effects of Salt Accumulation on Acidification and Acid Composition in Protected Soils

NI Zhongying<sup>1</sup>, SHI Yijun<sup>1</sup>, ZHANG Mingkui<sup>2</sup>

(1. Agricultural and Forestry Technology Promotion Center of Tonglu County, Tonglu, Zhejiang 311500, China; 2. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** [Objective] Investigation of the possible effects of salinization on soil acidity could provide some evidence for understanding the acidification process of protected cultivation soil. [Methods] Three types of surface soils and soil profiles with different acidification characteristics were collected from the protected cultivation farmland, open cultivation farmland and natural acid land. The soils were used for studying the differences in relations among active acid, potential acid and base saturation, and the effects of salt accumulation on soil acidity by means of chemical analysis and simulation tests of fertilizer salt addition and salt leaching. [Results] There was some difference in acidity between the protected soils and natural acidic soils. The acid in the protected cultivation farmland was human input, which was different from natural acid soils. Soil acidification of the protected soils mainly occurred in the surface layer, and decreased from the top to the bottom. Under the condition of the same exchangeable acid content, the pH value of the soils from the protected cultivation farmland was the lowest, followed by open cultivation farmland, while the pH value of natural acid soils was relatively high. At the same soil pH values, base saturation of natural acidic soils was

收稿日期: 2017-04-17

修回日期: 2017-05-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“水耕人为土诊断层/诊断特性的空间分布规律与田间识别模式研究”(41571207); 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B04)

第一作者: 倪中应(1966—), 男(汉族), 浙江省桐庐县人, 本科, 高级农艺师, 主要从事土壤与肥料技术方面的研究。E-mail: hztlzny@163.com。

通讯作者: 章明奎(1964—), 男(汉族), 浙江省绍兴市人, 博士, 教授, 主要从事土壤管理方面的研究。E-mail: mkzhang@zju.edu.cn。

significantly lower than those of the protected cultivation farmland and the open cultivation farmland, and base saturation of soils from the protected cultivation farmland was higher than that of open cultivation farmland. The proportion of active acid in the exchangeable acid of the protected cultivation soils was higher than that of the natural acid soil. Increasing the accumulation of soil salt can decrease soil pH value. Salt leaching process of the protected cultivation soils reduced soil salinity, and it was also accompanied by a decrease in soil active acid and an increase in soil pH value. [Conclusion] The study suggested that the accumulation of salts in soil can enhance the transformation of potential acid to active acid. High amount of application of chemical fertilizer not only can promote the decrease of pH value of soil directly through the input of acidic material, but also can further reduce the pH value of the soil to a certain extent as a result of salt accumulation.

**Keywords:** facility cultivation; soil acidification; active acid; salt accumulation

酸碱度是土壤最为重要的肥力指标之一,其控制着土壤养分元素和污染元素的生物有效性,是反映人为活动对土壤影响的敏感指标<sup>[1-3]</sup>。土壤酸化是自然土壤形成的重要过程之一,但在自然条件下土壤酸化的发生与环境条件密切相关,一般出现在地势较高、地面较为稳定、降水丰沛和容易发生淋溶作用的地区,而且土壤自然酸化是一个长期的过程。近年来,随着我国农业产业结构的调整,设施栽培已成为我国果蔬生产的主要栽培模式和农业增效的重要途径,设施栽培面积逐年增加。在设施栽培条件下,土壤所处的环境条件已大不同于自然状态,形成了独特的土壤温度、水分等土壤物质组成等特征<sup>[4-6]</sup>。设施土壤长期处在“高温、高湿、高复种指数、高施肥量、无降水淋洗”等特殊环境条件下,土壤理化性质可在短时间发生变化<sup>[7-10]</sup>。随着栽培年限的增长,设施土壤中出现的酸化<sup>[11-13]</sup>、盐化<sup>[14-18]</sup>、养分失调<sup>[12-13,19]</sup>、重金属累积<sup>[20]</sup>、微生物区系改变<sup>[8]</sup>等障碍问题日益突出,从而造成作物严重减产。其中,设施土壤的酸化问题最为突出<sup>[21-23]</sup>,而且酸化速率远高于一般农业土壤,一般将其归于高量化肥(特别是氮肥的施用)的施用<sup>[24-28]</sup>。然而,设施土壤的酸化常常伴随着土壤的盐化,后者可能会改变土壤的酸碱离子平衡而影响土壤酸碱度。目前,我国对耕地土壤的酸化程度、范围已有较多的调查,对土壤酸化的成因也作了较为广泛的探讨,但有关这些发生在与自然酸化过程环境完全不同、却酸化速率明显高于自然环境的酸化土壤的酸度特性却关注较少。为了探讨盐渍化对土壤酸化的可能影响,本文通过采集不同酸化程度和积盐水平的设施栽培土壤样品及室内添加肥料盐的土壤培养试验,通过与自然酸性土壤的比较,探讨设施栽培土壤的酸度组成特点及土壤酸化机理。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土壤样品的采集

研究采集的土壤样品涉及剖面分层样和表土样

2类。剖面分层样包括2个设施栽培土壤剖面和2个自然酸性土壤剖面。设施栽培土壤的设施栽培时间在10 a以上,采自浙江省中西部,土壤类型属泥质田(属水稻土土类),成土母质为河流冲积物,每一土壤剖面的分层样采集深度分别为0—15 cm,15—30 cm,30—45 cm,45—60 cm,60—75 cm,75—90 cm。用于比较的2个自然酸性土壤为红壤,采自浙江省金华市,土壤类型为黄筋泥土属(属于红壤亚类);其中1个剖面的利用方式为旱地,另一个剖面的利用方式为林地。

表层土样分为3组不同酸化程度的土壤。第1组为不同栽培年限的设施栽培土壤;第2组为不同种植年限的露天栽培土壤;第3组为自然酸化的土壤,用于比较。第1组和第2组土壤采自浙江省中西部,土壤类型属泥质田(属水稻土土类),样品数各为14个;第3组为红壤,土地利用方式为林地,样品数为12个。采样深度为0—15 cm。样品经室温风干后,过2 mm土筛。所有供试土壤的质地都为黏壤土,黏粒含量在243~278 g/kg之间。设施栽培土壤、露天栽培土壤和自然酸性土壤的水溶性盐分含量分别在0.52~2.43,0.28~0.76,0~0.24 g/k之间g,平均分别为1.17,0.39和0.11 g/kg;它们的CEC分别在20.12~22.03 cmol/kg,19.67~22.54 cmol/kg,11.15~13.76 cmol/kg之间,平均分别为21.48,20.87,12.57 cmol/kg。自然土壤的黏粒矿物主要由高岭石、伊利石和蛭石组成,其它土壤的黏粒矿物主要由伊利石、高岭石、绿泥石和蒙脱石组成。

### 1.2 加盐培养试验

从以上采集的露天栽培土壤中选择2个酸性土壤,进行添加不同浓度(0,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.5 g/kg)的中性盐( $K_2SO_4$ ,模拟施肥残留的盐分),平衡2 d后,测定土壤的pH值和交换性酸。

### 1.3 淋洗试验

从以上采集的表土样品中分别选择3个盐分积累较高的设施栽培土壤和3个盐分较低的自然酸性

土壤,采用泡水方法进行洗盐处理。方法如下:称取土样 150 g 各 2 份,置于烧杯中,加去离子水 150 ml 搅匀平均 1 h 后,清除上清液。2 次洗盐重复上述过程。洗盐处理后的土壤经室内自然风干后,分析土壤 pH 值和交换性酸。

#### 1.4 分析方法

分析土样经室内风干后,分别过 2 和 0.15 mm 土筛用于理化分析。测定项目包括土壤 pH 值(活性酸)、盐分、交换性酸(潜性酸)、阳离子交换量(CEC)和盐基饱和度,用常规方法测定<sup>[29]</sup>。其中,土壤 pH 值采用电位法测定(水土比为 2.5:1);土壤水溶性盐分用去离子水(水土比 5:1)浸提,烘干法测定;土壤交换性酸用 1 mol/L 中性 KCl 交换—中和滴定法测定;阳离子交换量采用醋酸铵平衡法测定。交换性盐基用醋酸铵交换,其中钾、钠用火焰光度计法测定,钙、镁用原子吸收法测定;考虑到设施栽培土壤中含有较多的水溶性盐基(钾、钠、钙、镁),交换性钾、钠、

钙、镁为醋酸铵提取物与水溶物的差值计算。盐基饱和度为盐基总量占 CEC 的比例。

## 2 结果与分析

### 2.1 设施栽培酸性土壤与自然酸性土壤剖面酸度分布的差异

图 1 为 2 个设施栽培土壤(设施土壤 A 和设施土壤 B)和 2 个自然酸性土壤(自然土壤 A 为旱地,自然土壤 B 为林地)的 pH 值和交换性酸垂直分布的比较。从图 1 中可知,自然酸性土壤的 pH 值和交换性酸在剖面中的变化较小,其中林地土壤的剖面上下 pH 值和交换性酸基本接近,旱地土壤因长期耕作呈现表土层 pH 略高和交换性酸略低的特征。而设施栽培土壤的 pH 值由上而下明显增加,交换性酸由上而下明显下降。这些结果表明,设施栽培土壤的酸化主要发生在表层,而自然酸性的土壤酸化发生在全剖面。

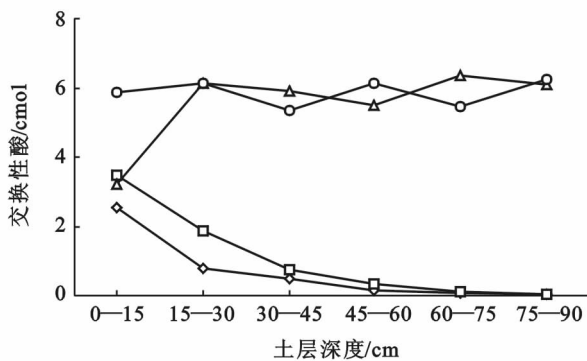
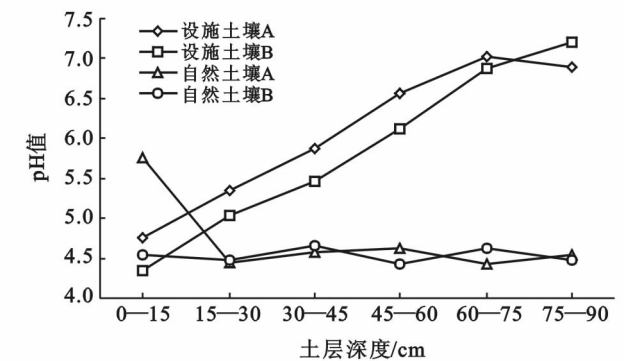


图 1 设施栽培土壤与自然酸化土壤酸度剖面分布的比较

表层 pH 值为 4.64 设施栽培土壤(图中设施土壤 A)与 pH 值为 4.63 的自然酸性土壤(图中自然土壤 B)比较,二者全剖面土壤交换性酸量存在明显的差异,0—15 cm 土壤的交换性酸量设施土壤 A 为 2.54 cmol/kg,而自然土壤 B 为 5.88 cmol/kg;75—90 cm 土壤的交换性酸量设施土壤 A 为 0.05 cmol/kg,而自然土壤 B 为 6.23 cmol/kg;这表明在进行土壤改良时,相似 pH 值的设施栽培土壤的石灰施用量远低于自然酸性土壤。

### 2.2 不同类别酸性土壤中潜性酸与活性酸关系的差异

根据土壤中氢离子的存在方式,土壤酸度可分为活性酸和潜性酸等两类<sup>[30]</sup>。活性酸又称为有效酸度,是土壤溶液中氢离子浓度的直接反映,通常用 pH 值表示。土壤潜性酸度是土壤胶体吸附的可代换性  $H^+$  和  $Al^{3+}$  的反映,常用交换性酸表示。当它们处于吸附状态时,是不显酸性的,但当它们通过离子交换



作用进入土壤溶液之后,即可增加土壤溶液的  $H^+$  浓度,使土壤 pH 值降低。活性酸度与潜性酸度是同一个平衡体系的两种酸度,二者可以互相转化,在一定条件下处于暂时平衡状态。土壤的潜性酸度往往比活性酸度大得多,二者的比例因土壤的不同有所差异。由图 2 可知,3 类土壤的 pH 值均随土壤交换性酸的增加而下降,但它们的交换性酸与 pH 值的关系曲线的斜率并不相同,设施栽培土壤明显高于自然酸性土壤。在相同交换性酸含量的条件下,3 类土壤的 pH 值以设施栽培土壤为最低,其次为露天栽培土壤,而自然酸性土壤的 pH 值相对较高。这种差异随土壤潜性酸的增加而增加。这一结果表明,土壤中活性酸占潜性酸的比例以设施栽培土壤最高,自然酸性土壤最低,即在相同的潜性酸(交换性酸)水平下,设施栽培土壤显示出的活性酸较强(pH 值较低),而自然酸性土壤显示出的活性酸较弱(pH 值较高)。

### 2.3 不同类别酸性土壤中活性酸与盐基饱和度关系的比较

3类土壤的pH值与盐基饱和度均呈现正相关,即土壤盐基饱和度随pH值的增加而增加,但3类土壤的盐基饱和度随pH值的增加速率有所差别(图3),以自然酸化土壤变化最为明显,而设施栽培土壤中的变化较为平缓。在相同土壤pH值的情况下,自然酸化土壤的盐基饱和度明显低于设施栽培土壤和露天栽培土壤,而设施栽培土壤的盐基饱和度高于露天栽培土壤。但这种差异随土壤pH值的增加有所减小。

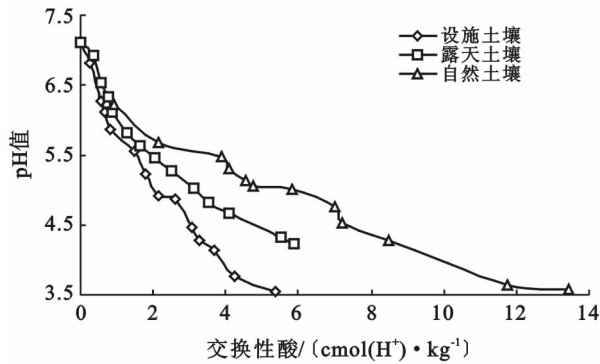


图2 3类酸性土壤中交换性酸与pH值的关系

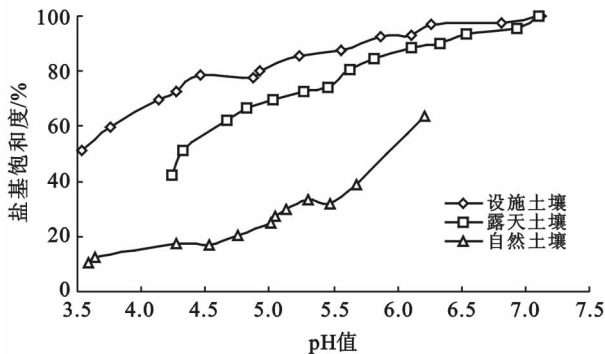


图3 3类土壤中pH值与盐基饱和度的关系

### 2.4 盐分积累对土壤活性酸(pH)的影响

图4为2种酸性土壤中添加不同浓度中性盐后的pH值变化。结果表明,随着加入中性盐浓度的增

加,土壤pH值呈现下降趋势,当中性盐加入量为3.5g/kg时,土壤A和土壤B的pH值分别比初始值下降了0.57和0.42个单位。

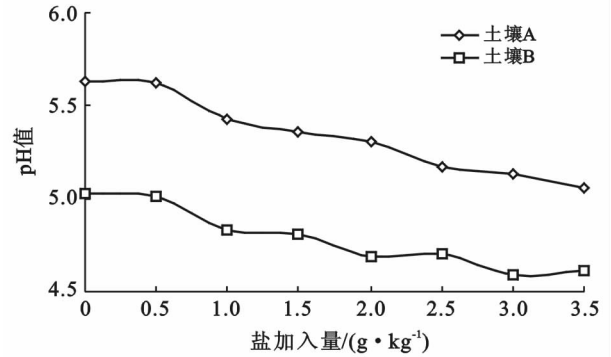


图4 中性盐加入对土壤pH值的影响

### 2.5 洗盐对土壤酸度的影响

表1为3个盐分积累较高的设施栽培土壤和3个盐分较低的自然酸性土壤经过泡水洗盐后活性酸与潜性酸变化的结果。从中可知,洗盐后3个盐分积累较高的设施栽培土壤pH值呈现明显的上升,其中第1次洗盐的pH值上升量高于第2次洗盐,第1次洗盐后设施栽培土壤pH值比初始值提高了0.46~0.63,平均提高了0.52;第2次洗盐后设施栽培土壤pH值比一次洗盐后提高了0.07~0.11,平均提高了0.09。洗盐后3个盐分积累较低的自然酸性土壤pH值变化较小,第1次洗盐后设施栽培土壤pH值比初始值提高了0.05~0.08,平均提高了0.06;第2次洗盐后设施栽培土壤pH值比1次洗盐后提高了-0.01~0.04,平均提高了0.02。洗盐对土壤潜性酸的影响较小,设施栽培土壤第1次洗盐后土壤潜性酸损失(以 $H^+$ 计)0.15~0.21cmol/kg,平均下降了0.21cmol/kg,第2次洗盐后土壤潜性酸损失0.05~0.06cmol/kg,平均下降了0.06cmol/kg;自然酸性土壤第1次洗盐后土壤潜性酸损失0.05~0.10cmol/kg,平均下降了0.08cmol/kg,第2次洗盐后土壤潜性酸损失-0.02~0.05cmol/kg,平均下降了0.02cmol/kg。

表1 洗盐对土壤酸度的影响

土壤类别	土样编号	盐分含量/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	pH值			潜性酸/( $cmol \cdot kg^{-1}$ )		
			初始值	一次泡水处理	二次泡水处理	初始值	一次泡水处理	二次泡水处理
设施栽培土壤	1	1.34	4.28	4.74	4.81	3.27	3.07	3.01
	2	1.87	3.76	4.24	4.33	4.23	4.08	4.03
	3	2.43	3.54	4.17	4.28	5.34	5.13	5.08
自然酸性土壤	4	0.24	4.76	4.81	4.80	6.98	6.93	6.95
	5	0.13	4.28	4.33	4.35	8.49	8.42	8.39
	6	0.16	3.64	3.72	3.76	11.76	11.66	11.61

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

土壤酸化指土壤吸收性复合体接受了一定数量交换性氢离子或铝离子,使土壤中碱性(盐基)离子淋失的过程,是土壤酸度由低变高的过程,它是一个持续不断的自然过程。土壤酸化与酸性物质进入土壤有关,一般有3个方面:①工业污染。酸性气体的大量排放,导致酸沉降的增加,排放到空气中 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 的增加引起酸沉降,直接渗入地表,另一部分经过一系列的化学反应最后形成 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{HNO}_3$ ,使雨水pH值随之下降形成酸雨。②不当的农业措施。如大量使用化学肥料,特别是氨态氮肥的使用;作物收获时移走土壤中的碱性物质等。③土壤中动植物呼吸作用产生形成的碳酸,但这一过程的速度非常缓慢。在自然条件下,土壤酸化是一个非常缓慢的过程,主要是由土壤中活性质子( $\text{H}^+$ )的多少来决定的。随着进入土壤的 $\text{H}^+$ 增加,土壤酸碱平衡被破坏, $\text{H}^+$ 和土壤胶体上被吸附的盐基离子进行交换, $\text{H}^+$ 被土壤胶体吸附,使土壤胶体上交换性 $\text{H}^+$ 不断增加,从而土壤酸度就越来越重。因此,自然条件下在酸化过程中伴随着盐基(钾、钠、钙、镁)从胶体中脱离而被淋失,从而导致土壤pH值降低和盐基饱和度减少。在农田中,特别是设施栽培条件下,由于高量化肥(特别是酸性和生理酸性肥料,如氯化钾、过磷酸钙、硫酸钾等)的施用,大大增加了酸性物质的输入,因此,土壤酸化速率远高于自然土壤,这已被许多调查研究证实<sup>[24-28]</sup>。农作物收获带走的盐基阳离子也在一定程度上加剧了农田土壤的酸化,加快了土壤酸化的进程。从以上分析结果可知,除因肥料施用直接引入或产生酸性物质可加速土壤酸化外,设施栽培的土壤中水溶性盐分的积累对土壤酸化也有一定的影响。在水溶性盐分积累的条件下,同等酸容量(即交换性酸)相同时,它们转化为活性酸的潜能有明显的差别(图1),即水溶性盐的积累可促进潜性酸(交换性酸)向活性酸转化(表现为pH值的下降)。这可能与盐分的积累,增加了土壤溶液中钾、钠、钙、镁的浓度(活度),后者可与胶体上的 $\text{H}^+$ , $\text{Al}^{3+}$ 发生交换,促进了土壤溶液中的 $\text{H}^+$ , $\text{Al}^{3+}$ 提高,形成了比低盐积累条件下更低的土壤pH值。这一结果表明,可溶性盐分的积累可加剧土壤pH值的下降。设施栽培条件下,因通过施肥方式引入土壤中的盐分得不到充分的淋失,导致盐分积累。这可能是为什么大棚栽培条件下土壤特别容易发生酸化的另一个原因。

另外,从图2还可以看出,相同pH值的大棚或

露天土壤的盐基饱和度也明显高于自然土壤,这一方面与设施或露天土壤的CEC较高(在20~23 cmol/kg之间,高于自然酸性红壤),对土壤酸化有较高的缓冲作用,另一方面也与前二者土壤中具有较高的水溶性盐(含有高量的钾、钠、钙、镁)有关。由于可溶性盐没有能及时从土壤中排出,在土壤酸化时,虽然土壤胶体上存在 $\text{H}^+$ , $\text{Al}^{3+}$ 与钾、钠、钙、镁离子发生竞争交换,但这些因土壤酸化被 $\text{H}^+$ , $\text{Al}^{3+}$ 替代下来的钾、钠、钙、镁离子仍然可停留在土壤溶液中(在自然土壤中被淋失),与胶体上的 $\text{H}^+$ , $\text{Al}^{3+}$ 发生不同程度的交换吸附平衡,最终导致了与自然土壤不同的离子交换特征,具体表现在土壤具有较高的盐基饱和度。大棚土壤(含较高的水溶性盐)比露天土壤具较高的盐基饱和度也证明了这一点。因此,一般农业土壤(非可变电荷土壤)酸化后仍保留较高的盐基饱和度是土壤本身具较高的CEC与高盐积累共同作用的结果。

在自然条件下,表层土壤产生的酸可部分随淋溶作用向下迁移,这一方面减弱了表层土壤的酸化速度,同时也促进了深层土壤的酸化。但在设施栽培条件下,由于缺乏足够的水分向下移动,表层产生的酸性物质主要集中在原地,这极大加速了表层土壤的酸化,但下层土壤依然可保持较高的土壤pH值。

### 3.2 结论

试验结果表明,土壤盐分的积累增强了潜酸向活性酸的转化,影响程度随盐分的积累而增加。在相同交换性酸含量的条件下,设施栽培土壤的pH值明显低于露天栽培土壤和自然酸性土壤;在相同土壤pH值的情况下,自然酸化土壤的盐基饱和度明显低于设施栽培土壤和露天栽培土壤,而设施土壤的盐基饱和度高于露天栽培土壤。高量施用化肥不仅可直接通过酸性物质的输入促进土壤pH值的下降,同时由此引起的盐积累也可在一定程度上进一步降低土壤的pH值。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王清奎,汪思龙,高洪,等. 土地利用方式对土壤有机质的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(4):360-363.
- [2] 俞海,黄季焜,Scott R,等. 中国东部地区耕地土壤肥力变化趋势研究[J]. 地理研究,2003,22(3):380-388.
- [3] 任意,张淑香,穆兰,等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势[J]. 中国土壤与肥料,2009(6):13-17.
- [4] 李廷轩,周健民,段增强,等. 中国设施栽培系统中的养分管理[J]. 水土保持学报,2005,19(4):70-75.
- [5] 宋尚成,李敏,刘润进. 种植模式与土壤管理制度对作物连作障碍的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(21):231-235.

- [6] 张耀良, 宋科, 金海洋, 等. 浦东新区设施土壤次生盐渍化机理探讨[J]. 上海农业学报, 2009, 25(3): 123-126.
- [7] 雷平, 石伟勇. 我国南方葡萄设施栽培土壤和营养障碍及其防治对策[J]. 科技通报, 2009, 25(5): 612-615.
- [8] 吴凤芝, 刘德, 王东凯. 大棚蔬菜连作年限对土壤主要理化性状的影响[J]. 中国蔬菜, 1998(4): 5-8.
- [9] 姚春霞, 陈振楼, 许世远. 上海市郊保护地土壤盐分研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1372-1376.
- [10] 张瑞明, 朱建华, 高善民, 等. 沪郊设施菜地连作土壤盐分积累及离子组成变化的研究[J]. 上海农业学报, 2011, 27(4): 76-79.
- [11] 于群英, 李孝良. 皖北地区设施栽培土壤酸化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(12): 2279-2280.
- [12] 李粉茹, 于群英, 邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 217-222.
- [13] 朱森林, 方勇. 土壤肥力变化与棚龄的相关性研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(5): 113-115.
- [14] 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642-650.
- [15] 冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 设施园艺土壤的盐化与治理对策[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 111-114.
- [16] 郭文忠, 刘声锋, 李丁仁, 等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤, 2004, 36(1): 25-29.
- [17] 余海英, 李廷轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571-576.
- [18] 张晓虎, 李新平. 设施农业土壤次生盐渍化研究进展[J]. 商洛学院学报, 2008, 22(5): 50-54.
- [19] 张雪艳, 田永强, 高丽红. 设施蔬菜土壤质量衰退和修复技术研究进展[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2006, 26(5): 369-372.
- [20] 方勇. 不同棚龄土壤重金属含量变化及污染评价[J]. 湖南农业科学, 2012(1): 58-61.
- [21] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109-1116.
- [22] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465-472.
- [23] Poss R, Smith C J, Dunin F X, et al. Rate of soil acidification under wheat in a semi-arid environment[J]. Plant and Soil, 1995, 177(1): 85-100.
- [24] Barak P, Jobe B O, Krueger A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin[J]. Plant and Soil, 1997, 197(1): 61-69.
- [25] Malhi S S, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 48(1/2): 91-101.
- [26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(19): 1008-1010.
- [27] Schrnder J L, Zhang H, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3): 957-964.
- [28] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388.
- [29] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [30] 于天仁, 陈志诚. 土壤发生中的化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 96-132.