

酸沉降对蔬菜吸收养分的影响

宁安荣¹, 张洪生¹, 张跃民¹, 李玉明¹, 魏世强², 王定勇²

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 西南农业大学环境工程系, 重庆 400716)

摘要: 重庆市是我国受酸沉降影响较严重的地区之一, 采用田间试验方法研究了酸沉降对蔬菜(豇豆、甘蓝和西红柿)吸收养分的影响。对酸沉降影响的机理进行了简要的分析和讨论。在污染区和对照区吸收养分的影响的试验田块中种植试验结果表明, 由于试验田块中酸沉降的输入不同和土壤酸化程度的不同, 蔬菜吸收 N、P、K 和 S 营养元素受到的影响也不同。污染区降雨中 S 的输入是对照区的 2 倍。污染区单位面积蔬菜对 N、P、K 和 S 的吸收均低于对照区, 尤以 K 吸收的减少最为明显。3 种蔬菜受酸沉降影响的程度也不同, 西红柿和豇豆对酸沉降和土壤酸化比较敏感, 甘蓝具有一定的抗性。

关键词: 酸沉降; 植物养分; 蔬菜; 农业环境

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2003)06-0651-05

Effects of Acid Deposition on Uptake of Nutrients by Vegetables

NING An-rong¹, ZHANG Hong-sheng¹, ZHANG Yao-min¹, LI Yu-ming¹, WEI Shi-qiang², WANG Ding-yong²

(1. Agro-Environment Protection Institute, Tianjin 300191, China; 2. Environmental Engineering Department, Southwest Agriculture University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Chongqing City is one of the regions seriously affected by acid deposition in China. In order to study effects of acid depositions on nutrients absorption of vegetables, several plots, where cowpea, cabbage and tomato were grown, were carried out with polluted and control areas in Chongqing. The experimental results showed that effects on vegetable absorption of N, P, K and S were different based on various inputs of acid depositions and different soil acidification. We found that the input of S in the heavily polluted area was as high as double in control area. For individual vegetable, the amounts of K, P, N and S adsorbed by the vegetable at the heavily polluted plot were generally lower than that at control area. The reduction of K absorption was the most significant in comparison with other tested elements. There was also obvious difference between three vegetables. Tomato and cowpea both have been found to be sensitive to acidic deposition and acidified soil, but cabbage is rather resistant. Mechanism of acid deposition effects on plant nutrients was briefly analyzed and discussed in the present study.

Keywords: acidic deposition; nutrients cycling; vegetables; agricultural environment

酸沉降污染已成为世界最严重的环境问题之一。近年来随着经济的高速发展, 继欧洲和北美之后, 在东北亚出现了世界第三大酸雨区, 其中酸性最强、面积最大的酸雨区在中国。我国是一个农业大国, 酸雨对农业的影响从开始即引起高度的重视, 并进行了广泛研究。在早期, 大部分研究着重于实地观察和田间调查, 研究酸雨形成的原因, 以及酸沉降的污染症状和对作物生长和产量的影响^[1, 2]。后来随着研究的深入, 利用混合气体和模拟酸雨在实验室内研究酸沉

降对作物生长发育和生理生化影响, 取得很大进展, 内容包括酸沉降对土壤特性的影响^[3-7]、对作物的影响^[8-13], 以及对土壤蔬菜系统的影响^[14]。但是, 由于实验室条件与农田中的条件并不完全相同, 其结果与实际情况会有不小的差距。国内外的一些研究报道了酸沉降对森林生态系统的影响^[15, 16], 但与农业生产相比森林生态系统中的人为影响因素较少, 而农业生产条件下人类活动影响较多, 在某种程度上可能会干扰甚至掩盖酸沉降对农业的影响, 给研究工作带来一定的困难。本项目的目的是在田间条件下研究酸沉降对蔬菜吸收养分的影响, 因此在研究中采取措施尽量减少或排除人为因素的影响, 以突出酸沉降对蔬菜生长和养分循环的影响。

收稿日期: 2003-03-07

基金项目: 中国农科院国际合作局和日本株式会社三菱综合技术研究
所执行的中日合作项目

作者简介: 宁安荣(1945—), 男, 高工。

E-mail: aning@tianjin.cnbg.com

1 试验地点

项目的试验地点选在重庆市,因为从我国出现酸雨至今,重庆一直是我国酸沉降污染严重的地区之一;同时有关重庆地区酸沉降的研究已经有大量的报道,有许多研究成果可以借鉴。

重庆市位于北纬 28°06′~32°10′,东经 104°36′~110°12′,属于亚热带季风气候。热资源丰富,雨量充沛,冬暖春早,夏热,秋多雨,湿度高,多云雾,风少。年平均气温 17.1℃~18.8℃,年积温 5 414.2℃~6 153.3℃,年日照 1140.5~1 381.2 h,年平均降雨约 1 000~1 100 mm,相对湿度 77%~83%,年平均风速 0.9~2.1 m·s⁻¹,无风概率 41%。主导风向北—东北,占 11%。

重庆地区出露地层主要为侏罗纪和白垩纪的紫红色砂页岩,成土后为紫色土,土壤肥沃,适宜多种植物生长,土壤为中性或略带酸性。

重庆市的主要能源为燃煤,大多数煤的 S 含量较高。大量使用燃煤造成大气 SO₂ 和 TSP 污染。此外,因为逆温层较厚,空气稳定,湿度高,云多,以及高山和丘陵的影响,空气中的污染物不易扩散,导致重庆市的酸雨问题。

根据污染源分布情况,以及过去对污染状况的研究结果,再加本项目初期对污染状况的实地调查,确定了污染区和对照区的范围,并分别在各区域内选定 120 m² 的试验田块。两试验田块的地形和土壤均相同,都位于小丘之上,土壤均属于微酸性紫色土。

污染区田块选在九龙坡第 5 生产队:位于市区附近,距离位于市区的主要污染源重庆市热电厂 2 km。

对照区田块选在转龙村:位于重庆北部,离重庆市热电厂 60 km,且与热电厂之间有中梁山相隔。

2 供试蔬菜和试验方法

为了研究酸沉降对蔬菜的影响,在污染区和对照区的试验田块同期种植以下 3 种蔬菜:

豇豆——对酸沉降敏感的蔬菜,种植时间为 2000 年 5 月至 8 月。

甘蓝——对酸沉降不敏感的蔬菜,种植时间为 2000 年 8 月至 2001 年 1 月。

西红柿——对酸沉降敏感的蔬菜,种植时间为 2001 年 3 月至 7 月。

在每一块试验田块上安装以下设备:

大气采样器——用于测定大气中的 SO₂、NO_x、TSP 和降尘,每月一次,每次 3 d。

雨水收集器——用于采集雨水,以测定雨水中各种离子的浓度,封雨采集并测定 pH,每半月测定混合样品的 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺。

采集施用于试验田块的有机肥样品,分析 K、S、P 和 N 的含量,化肥成分由其组成计算。在每茬蔬菜的种植前和收获后,采集土壤样品(0~20 cm、20~40 cm 和 C 层),测定 pH、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Hg、Pb、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻、PO₄³⁻。

栽种前采集幼苗样品,收获后采集根、茎、叶和果实样品,测定鲜重、干重,以及 S、N、K、P 浓度。

3 试验结果

3.1 大气污染物

大气污染物浓度的测定结果列于表 1。大气中的主要污染物为 SO₂,污染区 SO₂ 的浓度范围为 0.125~0.160 mg·m⁻³,对照区的 SO₂ 浓度范围为 0.008~0.031 mg·m⁻³。豇豆生长季节污染区的 SO₂ 浓度是对照区的 20 倍,甘蓝生长季节污染区的 SO₂ 浓度是对照区的 7.8 倍,西红柿生长季节污染区的 SO₂ 浓度是对照区的 4.6 倍。

3.2 雨水中的阳离子和阴离子

表 2 和表 3 分别为雨水中阴离子和阳离子浓度。表 2 中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和氯化物所占的百分比是每种离子的克当量浓度与阴离子克当量浓度之和的百分比。从表中可以看出,无论 SO₄²⁻ 浓度或 SO₄²⁻ 所占的百分比,污染区的值高于对照区,说明 SO₂ 是主要的污染源。表 3 中阳离子浓度百分比为各离子当量浓度与阳离子当量浓度之和的百分比。

3.3 土壤及有机肥测定结果

表 4 为土壤样品的分析结果,用于比较酸沉降对

表 1 大气污染物浓度平均值(生长季)

Table 1 Average concentrations of air pollutants (during the growing season)

项目	豇豆				甘蓝				西红柿			
	SO ₂	NO _x	TSP	降尘	SO ₂	NO _x	TSP	降尘	SO ₂	NO _x	TSP	降尘
	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/t·km ⁻² ·月 ⁻¹	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/t·km ⁻² ·月 ⁻¹	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/mg·m ⁻³	/t·km ⁻² ·月 ⁻¹
九龙坡	0.160	0.050	0.39	9.6	0.125	0.041	0.235	8.5	0.141	0.050	0.181	7.3
转龙	0.008	0.005	0.01	2.8	0.016	0.006	0.242	5.0	0.031	0.018	0.099	4.1

表 2 雨水中阴离子浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)及其所占百分比

Table 2 Anion concentrations ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) and their contributions (%) in rain water

蔬菜	地点	降雨量/mm	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ /%	NO ₃ ⁻ /%	SO ₄ ²⁻ /%
豇豆	九龙坡	349.8	5.28	16.46	30.78	250.65	3.0	5.6	91.4
	转龙	363.71	6.48	48.4	86.14	144.74	11.4	20.3	68.3
甘蓝	九龙坡	397.41	4.63	21.97	32.9	312.09	3.2	4.8	91.9
	转龙	415.4	6.18	54.63	25.05	138.12	15.3	7.0	77.6
西红柿	九龙坡	398.1	5.99	20.61	46.66	184.69	4.7	10.7	84.6
	转龙	291.92	6.50	28.79	21.55	106.87	10.9	8.2	80.9

表 3 雨水中阳离子浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)及其所占百分比

Table 3 Cation concentrations ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) and their contributions (%) in rain water

蔬菜	地点	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ /%	K ⁺ /%	Mg ²⁺ /%	Ca ²⁺ /%
豇豆	九龙坡	15.08	12.53	15.86	146.48	4.3	3.6	9.0	83.2
	转龙	102.04	17.15	39.50	279.63	13.5	2.3	10.4	73.8
甘蓝	九龙坡	29.09	16.89	20.99	161.88	7.1	4.1	10.2	78.6
	转龙	30.7	21.08	26.34	134.32	8.2	5.7	14.1	72.0
西红柿	九龙坡	16.67	17.43	15.80	106.17	6.0	6.3	11.4	76.4
	转龙	23.33	20.63	9.07	111.28	8.2	7.2	6.4	78.2

土壤的影响。酸沉降可引起土壤 pH 值降低、碱性离子的减少和铝离子溶出。九龙坡土壤 0~20 cm、20~40 cm 和 C 层的 pH 值分别为 4.58、5.36 和 5.43,转龙分别为 4.64、6.00 和 6.74,九龙坡各层值均比转龙大。九龙坡土壤 0~20 cm、20~40 cm 和 C 层的 K⁺

出,由于多年酸沉降的影响,与对照区相比九龙坡的土壤有所酸化。

表 5 为有机肥中 N、K 和 S 的测定结果,因为有机肥的浓度很不均匀,表中的值为 3 次分析结果的平均值。

表 4 土壤中各种离子浓度的平均值($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Averages of ion concentrations in the studied soil ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)

地点	土层	pH	有效 P /mg · kg ⁻¹	Hg /mg · kg ⁻¹	Pb /mg · kg ⁻¹	可交换阳离子					可交换阴离子			水溶性阴离子			
						Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
九龙坡	0~20 cm	4.58	79.64	0.431	44.56	0.277	0.300	1.081	7.211	0.258	1.373	0.401	0.221	0.027	0.113	0.309	0.203
	20~40 cm	5.36	51.80	0.296	41.69	0.294	0.282	1.131	24.826	0.052	1.379	0.124	0.132	0.048	0.078	0.104	0.112
	C 层	5.43	36.49	0.188	38.26	0.220	0.285	1.186	9.226	0.058	1.173	0.100	0.153	0.043	0.096	0.078	0.119
转龙	0~20 cm	4.64	54.82	0.102	36.07	0.277	0.525	1.121	10.459	0.080	1.814	1.766	0.041	0.028	0.272	0.652	0.238
	20~40 cm	6.00	8.82	0.064	34.80	0.239	0.326	1.266	13.285	0.000	1.236	0.217	0.115	0.035	0.105	0.158	0.110
	C 层	6.74	5.90	0.042	34.28	0.206	0.279	1.073	12.096	0.000	1.391	0.085	0.059	0.034	0.088	0.111	0.090

3.4 生物量和经济产量的比较

表 6 为生物量和经济产量的比较。从表中可以看出生物总量和经济产量的差异比较明显。污染区单位面积西红柿的产量仅为对照区的 33.8%,豇豆为对照区的 37.5%,甘蓝为对照区的 62.2%。单位面积生物量也受到影响,尽管生物量的减少没有经济产量那样明显,污染区豇豆、甘蓝和西红柿单位面积生物量分别为对照区的 54.3、70.9 和 44.8%。无论从生物量或果实的比较,3 种蔬菜的减少顺序均为:西红柿>豇豆>甘蓝。

3.5 蔬菜对 N、K、P 和 S 的吸收

3.5.1 N 元素的吸收

N 元素的循环在农业生态系统中是非常重要的。

表 5 有机肥中 N、K、S 的平均浓度

Table 5 Average concentrations of N, K, S in organic fertilizer

地点	N/g · L ⁻¹	K/g · L ⁻¹	S/g · L ⁻¹
九龙坡	1.161 9	0.197 4	0.156 3
转龙	1.123 9	0.772 5	0.150 5

的。它不仅影响农业生态系统的发展状况,而且在一定程度上对环境产生影响。表 7 为 N 元素的输入和吸收情况。有机肥和化肥是 N 输入的主要来源。来自雨水的 N 只占很小部分(0.28%~2.06%)。两个试验田块中生物量中 N 的吸收有很大不同。以对照区 N 的吸收量为 100,污染区豇豆、甘蓝和西红柿的吸收分别占 60、73 和 66。

3.5.2 K 元素的吸收

表 6 生物量和经济产量的比较

Table 6 Comparison of biomass and economic production

蔬菜	蔬菜	单位面积产量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$		相对产量/%	
		九龙坡	转龙	九龙坡	转龙
豇豆	生物量	2 090.6	3 847.9	54.3	100.0
	豇豆	711.8	1 897.7	37.5	100.0
甘蓝	生物量	7 334.0	10 349.0	70.9	100.0
	甘蓝	4 058.0	6 526.0	62.2	100.0
西红柿	生物量	3 166.1	7 072.0	44.8	100.0
	西红柿	1 959.4	5 789.6	33.8	100.0

表 7 N 的输入和吸收($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 7 Input and uptake of N ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

项目	豇豆		甘蓝		西红柿	
	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙
有机肥输入	114.78	95.00	239.28	205.48	45.15	42.81
化肥输入	246.28	199.14	145.43	211.90	275.44	270.00
雨水输入	5.89	5.43	10.23	10.02	2.60	0.88
蔬菜吸收	83.57	141.26	263.39	359.58	78.89	120.19

表 8 为 K 的输入和吸收。有机肥和化肥是 K 的主要输入来源。雨水中 K 的输入只占很小部分, 约占总输入的 0.99% ~ 5.13%。在豇豆和甘蓝生长期未施用 K 肥, 所以 K 的总输入量较小。在西红柿生长期施用了 KCl 化肥, 所以西红柿生长季节的 K 输入较大。生物量中 K 的吸收差别较大, 以对照区生物量中 K 的吸收为 100, 则污染区豇豆、甘蓝和西红柿钾的吸收分别为 44、53 和 38。

表 8 K 的输入和吸收($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 8 Input and uptake of K ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

项目	豇豆		甘蓝		西红柿	
	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙
有机肥输入	20.69	65.30	40.65	141.24	7.67	29.42
化肥输入	0	0	0	0	204.78	200.74
雨水输入	1.71	2.44	2.62	3.42	2.71	2.35
蔬菜吸收	42.15	96.39	26.37	49.84	56.30	154.67

3.5.3 P 元素的吸收

表 9 为 P 的输入和吸收。P 的输入主要来自化肥和有机肥, 来自降雨的 P 的输入很小, 雨水中 PO_4^{3-} 的浓度未检出。在豇豆和甘蓝生长期未施用化肥, 在西红柿生长期施用了过磷酸钙。生物量中 P 的吸收差别较大, 以对照区生物量中 P 的吸收为 100, 则污染区豇豆、甘蓝和西红柿 P 的吸收分别为 68、80 和 61。

3.5.4 S 元素的吸收

表 10 为 S 的输入和吸收。由表中可以看出污染区九龙坡 S 的输入大于转龙, 而且来自降雨的 S 的输入占很大比例。实际 S 的输入比表中数值还大些, 因为除了来自降雨的 S 之外, 尚有干沉降 S 的输入, 且

表 9 P 的输入和吸收($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 9 Input and uptake of P ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

项目	豇豆		甘蓝		西红柿	
	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙
有机肥输入	6.24	5.46	11.10	14.52	2.32	2.46
化肥输入	0	0	0	0	477.93	465.50
蔬菜吸收	12.78	18.72	43.28	53.90	6.41	10.45

表 10 S 的输入和吸收($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 10 Input and uptake of S ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

项目	豇豆		甘蓝		西红柿	
	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙	九龙坡	转龙
有机肥输入	16.38	12.72	32.19	27.52	6.07	5.73
雨水输入	28.06	16.85	39.69	18.36	23.53	9.98
蔬菜吸收	13.72	17.13	61.44	70.65	12.69	16.01

干沉降的数值与湿沉降应在同一个数量级上。生物量中 S 的吸收差别较大, 以对照区生物量中 S 的吸收为 100, 则污染区豇豆、甘蓝和西红柿 S 的吸收分别为 80、86 和 79。

3.5.5 对 N、P、K 和 S 吸收影响的比较

由于酸沉降的影响, 与对照区相比, 污染区 N、P、K 和 S 元素的吸收均受到影响。为了比较各个元素受影响的程度, 将污染区和对照区 3 种蔬菜生物量中各元素的单位面积含量进行比较。以对照区单位面积生物量中各元素含量为 100, 污染区生物量中各元素的相对含量见图 1。由图可以看出, 由于受酸沉降的影响, 蔬菜生物量中影响最大的元素是 K。

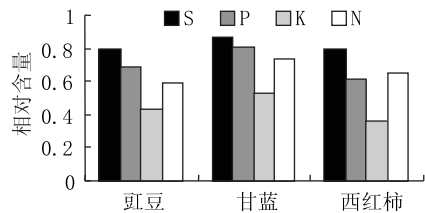


图 1 酸沉降对养分吸收影响的比较

Figure 1 Effects of acid depositions on nutrients uptake

4 讨论

重庆地区的酸沉降主要来自燃煤中的 S, 并以 SO_2 和 SO_4^{2-} 形式输入土壤蔬菜生态系统, 对其产生影响。酸沉降对蔬菜吸收养分的影响主要表现在两个方面。一个是 SO_2 的影响, 另一个是土壤酸化的影响。

4.1 SO_2 对蔬菜吸收 K 的影响

植物主要通过气孔吸收 SO_2 。 SO_2 进入叶片后溶解到细胞表面的液体中形成 SO_3^{2-} 等化合物, 在此转化过程中产生 H^+ 使细胞的 pH 值发生变化, H^+ 的增

加会引起叶片伤害。在污染区的蔬菜叶片发生白色或黄色斑点,在转龙叶片的没有受害症状,原因就是九龙坡的 SO₂ 浓度远比对照区高。一些研究^[17]表明作物细胞中 H⁺ 的增加可造成叶片中 K⁺ 的流失。试验结果显示蔬菜叶片中 K⁺ 的浓度有很大差别,如九龙坡和转龙西红柿叶片中 K⁺ 的含量分别为 18.8 g · kg⁻¹ 和 38.1 g · kg⁻¹。因此,高浓度的 SO₂ 会引起叶片中 K 的流失,并造成叶片的受害症状。K 吸收量的减少进而会影响蔬菜的生长和产量。

4.2 土壤酸化对蔬菜吸收养分的影响

土壤的测定结果表明,污染区的土壤有所酸化。土壤酸化引起碱性离子流失,含量降低。九龙坡土壤中 K 含量小于转龙,因此蔬菜吸收的 K 也少于转龙。

由表 11 ~ 13 可以看出,除甘蓝的根部以外,九龙坡 3 种蔬菜的根、茎、叶、果中 K 的含量均小于转龙相应的含量。这是 SO₂ 和土壤酸化共同作用的结果。

表 11 豇豆各部分中 K 含量的比较

Table 11 Concentrations of K in various parts of cowpea

地点	根	茎	叶	豆荚
九龙坡	9.55	13.70	11.63	9.55
转龙	15.39	21.51	18.45	16.07

表 12 甘蓝各部分中 K 含量的比较

Table 12 Concentrations of K in various parts of cabbage

地点	鲜叶	甘蓝	老叶	落叶	根
九龙坡	5.51	3.90	3.36	4.46	4.06
转龙	5.62	5.28	4.52	5.37	3.60

表 13 西红柿各部分中 K 含量的比较

Table 13 Concentrations of K in various parts of tomato

地点	鲜叶	叶	混合叶	茎	根	西红柿
九龙坡	18.82	19.24	11.34	17.53	9.31	28.81
转龙	38.13	31.86	18.95	32.12	18.77	37.64

受土壤酸化的影响,P 元素容易被土壤固定,不易被植物吸收。在酸化土壤中,P 元素以 AlPO₄ · 2H₂O 和 FePO₄ · 2H₂O 的形态固定在土壤中。因此,在污染区蔬菜对 P 的吸收减少。

酸沉降并不会直接影响蔬菜对 N 和 S 的吸收,土壤中也不缺乏 N 和 S。重庆的酸沉降是由 SO₂ 造成的,因此在污染区空气和土壤中 S 的含量都比对照区高,植物吸收的 S 应该也会多一些。事实也是如此,生物量中九龙坡豇豆、甘蓝和西红柿中 S 的浓度分别为 3.95 g · kg⁻¹、8.91 g · kg⁻¹ 和 2.15 g · kg⁻¹,转龙分别为 3.34 g · kg⁻¹、7.26 g · kg⁻¹ 和 2.07 g · kg⁻¹。但是由于对 K 和 P 吸收的影响,导致九龙坡生物量的减少,使单位面积对 N 和 S 的吸收也减少。

5 结论

(1) 与对照区比较,污染区(九龙坡)受到酸沉降污染,主要是 SO₂ 和硫酸型酸雨。

(2) 在污染区,S 的输入量远远高于对照区。

(3) 由于污染区酸沉降的输入较高,已造成土壤轻微酸化,土壤酸化又进而引起土壤中 K 含量的减少,土壤 K 含量的减少导致蔬菜 K 吸收的减少。

(4) 酸沉降对蔬菜吸收 N、P、K 和 S 造成影响,其中对 K 的影响最为严重。

(5) 西红柿、豇豆和甘蓝 3 种蔬菜受酸沉降的影响程度不同,西红柿和豇豆对酸沉降比较敏感,甘蓝具有一定的抗性。在污染区(九龙坡),西红柿已经不能种植。

参考文献:

[1] 赵殿五,等. 我国西南地区酸雨形成探索[J]. 大气环境和酸雨, 1986,1: 41 - 48.

[2] 张承胜. 重庆地理环境与酸雨污染[A]. 酸雨与农业[C]. 北京: 中国林业出版社,1989. 14 - 20.

[3] 杨 昂,等. 中国酸雨的分布、成因及其对土壤环境的影响[J]. 土壤,1999,1: 13 - 18.

[4] 俞元春,等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响[J]. 南京林业大学学报,2001,25(2): 39 - 42.

[5] 俞元春,等. 模拟酸雨对酸性土壤铝溶出及其形态转化的影响[J]. 土壤与环境,2001,10(2): 87 - 90.

[6] 陈建芳,等. 模拟酸雨对不同层次的红壤元素迁移作用的影响[J]. 农业环境保护,1996,15(4): 150 - 154.

[7] 戎秋涛,等. 模拟酸雨对浙东北红壤中盐基离子和铝的淋失影响研究[J]. 环境科学学报,1997,17(1): 33 - 38.

[8] 郑淑颖. 二氧化硫污染对植物影响的研究进展[J]. 生态科学, 2000,19(1): 59 - 64.

[9] 杨志敏,等. 模拟酸雨对若干种蔬菜生长和生理特性影响的研究[J]. 农业环境保护,1994,13(5): 213 - 216.

[10] 高吉喜,等. SO₂ 和酸雨对大豆的单一及复合效应[J]. 应用与环境生物学报,1998,4(2): 132 - 135.

[11] 许泽宏,等. 模拟酸雨对蚕豆根生长发育的影响[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2000,23(6): 637 - 639.

[12] 严重玲,等. 模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特性的影响[J]. 应用生态学报,1995,6(supp): 124 - 131.

[13] 刘连贵,等. 酸雨和 SO₂ 复合污染对几种农作物的影响[J]. 环境科学,1996,17(2): 16 - 19.

[14] 杨学春,等. 降尘和酸雨对土壤蔬菜系统影响的研究[J]. 重庆环境科学,1995,17(5): 6 - 9.

[15] Robert Mayer, et al. Atmospheric pollution in a tropical rain forest: Effects of deposition upon biosphere and hydrosphere I. Concentrations of chemicals[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2000, 121: 59 - 78.

[16] Robert Mayer, et al. Atmospheric pollution in a tropical rain forest: Effects of deposition upon biosphere and hydrosphere II. Fluxes of chemicals and element budgets[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2000, 121: 79 - 92.

[17] Smith F A, Raven J A. Intracellular pH and its regulation[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1979, 30: 289 - 311.