不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响*

李　爽　张玉龙†　范庆锋　虞　娜　刘　畅
（沈阳农业大学土地与环境学院，农业部东北耕地保育重点实验室，沈阳　110866）

摘　要　自连续 13a 在同一地块以不同灌溉方式进行灌溉试验的保护地，分层采集沟灌、滴灌、渗灌 3 个处理 0～60cm 土层土壤样品，研究灌溉方式对土壤酸化特征的影响。结果表明，3 种灌溉处理土壤活性酸度和交换性酸含量均随着土层加深而降低，各处理间土壤活性酸度在 0～40cm 土层差异明显，总体为沟灌 > 渗灌 > 滴灌；土壤交换性酸差异出现在 0～30cm 土层，为渗灌 > 沟灌 > 滴灌；土壤交换性 Al^{3+} 随土层加深呈先增加后降低的变化趋势，且以滴灌含量最低。各处理土壤盐基饱和度（BS）随土层加深而增加，在 0～30cm 土层为滴灌 > 渗灌 > 沟灌。土壤 pH 与交换性酸、硝态氮含量呈极显著负相关，与盐基饱和度、特别是 Ca^{2+} 饱和度呈极显著正相关；Al^{3+} 占交换性酸比例与有机质含量呈极显著负相关。总之，保护地土壤酸化与硝态氮含量、盐基饱和度、有机质含量关系密切；与沟灌和渗灌相比，滴灌更利于抑制土壤酸化。

关键词　保护地；灌溉方式；活性酸；交换性酸；盐基饱和度
中图分类号　S153.4　　**文献标识码**　A

发展设施农业是缓解我国人多地少矛盾的有效途径，然而近年来保护地长期栽培所引起的酸化、盐渍化等土壤退化问题已经受到人们的广泛关注[1-3]。大量研究表明，除长期过量施肥、室内高温高湿、缺少雨水淋洗外，不合理灌溉也是加速蔬菜保护地土壤酸化的重要原因[4-5]。

灌溉是保护地土壤水分的主要来源。保护地蔬菜栽培合理灌溉既可省水、省肥和提高作物产量、改善农产品品质，也能改善土壤理化性状、有效抑制土壤退化的发生[6-10]。目前，除沟灌、畦灌等传统灌溉方式外，滴灌、渗灌、微喷灌等灌溉方式在保护地栽培中应用日益广泛[11]。灌溉方式不同、灌水技术参数各异，不仅单位面积农田单次灌水量不同，且灌水湿润过程、湿润部位、湿润土壤体积、灌水后土壤水分运动方向、速率等也不尽相同，这必然会影响土壤中致酸离子和盐基离子的累积和迁移，进而对土壤酸化进程产生不同影响。为此，了解保护地土壤酸化机理，有目的地选择灌溉方式、合理确定灌水技术参数，应是抑制保护地土壤酸化的有效措施之一。

目前，保护地土壤酸化与灌溉方式之间关系方面的研究尚不多见，对保护地土壤酸化机理也缺乏深入的研究。本文以连续 13a 进行定位灌溉试验的保护地土壤为材料，测定土壤活性酸度、交换性酸含量、盐基饱和度等酸化特征指标的剖面分布，探讨灌溉措施对土壤酸化机理的影响并对不同灌溉方式致酸效果做出评价，以期为保护地蔬菜栽培进行合理的水分管理提供理论依据与技术指导。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

保护地长期定位灌溉试验于沈阳农业大学校内科研基地塑料大棚内进行，试验始于 1998 年，至 2011 年采样时已连续进行了 13 a。供试土壤为草甸土。1998 年试验开始前 0～20 cm 土层土壤基本性质见表 1。

1.2　田间试验设计

试验共设沟灌、滴灌、渗灌三种处理，每处理 4 次重复。小区随机排列，小区面积为 8.25 m^2，小区间用埋深 60 cm 塑料薄膜隔开以防水分互渗。滴灌管铺放于地表，出水孔与作物根部位置相对；渗灌使用外径 20 mm、内径 16 mm 黑色微孔渗灌管，渗灌管埋深 30 cm，位置与作物行垂直对应，管下铺宽 10 cm 塑料薄膜以抑制水分下渗，管上铺约 2 cm 厚稻壳作为过滤层；沟灌以垄沟为灌水沟，按常规方法灌水。

* 国家重点基础研究发展 973 计划子课题（2011CB100502）、科技部农业科技成果转化资金项目（04EFN212100055）、辽宁省农业科技攻关重大项目（2008212003）资助

† 通讯作者，E-mail：ylzsau@163.com
作者简介：李　爽（1986—），女，辽宁大连人，硕士研究生，主要从事土壤改良与农业节水研究。E-mail：lishuang2522@126.com

收稿日期：2011－11－25；收到修改稿日期：2012－02－16

表 1 0 ~ 20 cm 土层土壤 pH、有机质和养分含量(1998 年)

Table 1 Soil pH, organic matter and nutrient concentrations in the 0 ~ 20 cm surface layer of the experiment field (1998)

土壤 Soil	pH	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	全氮 TN ($g\ kg^{-1}$)	全磷 TP ($g\ kg^{-1}$)	全钾 TK ($g\ kg^{-1}$)	碱解氮 Avai. N ($mg\ kg^{-1}$)	有效磷 Avai. P ($mg\ kg^{-1}$)	速效钾 Avai. K ($mg\ kg^{-1}$)
草甸土 Meadow soil	6.80	22.70	1.30	1.86	17.60	96.91	103.1	164.0

灌水控制上限、下限分别设定为土壤水吸力 6 kPa、40 kPa。计划湿润层厚度滴灌和沟灌取 0.4 m,渗灌取 0.3 m;计划湿润层湿润比沟灌取 1.0,滴灌和渗灌取 0.5。经计算沟灌、滴灌、渗灌处理单次灌水量分别为 364 $m^3\ hm^{-2}$、182 $m^3\ hm^{-2}$ 和 121 $m^3\ hm^{-2}$。在各小区中部埋设张力计,当埋深 20 cm 的张力计土壤水吸力达 40 kPa 时开始灌水。每年 4 月上旬番茄定植,8 月中旬试验结束。13a 间平均每季作物沟灌灌水 6 次、灌水总量 2 295.9 $m^3\ hm^{-2}$;滴灌灌水 11 次、灌水总量 1 912.7 $m^3\ hm^{-2}$;渗灌灌水 12 次、灌水总量 1 691.5 $m^3\ hm^{-2}$。

各处理施肥相同,春季整地时施腐熟有机肥(鸡粪)37 500 kg hm^{-2} 为底肥;番茄移栽时沟施尿素 300 kg hm^{-2}、磷酸二铵 225 kg hm^{-2}、硫酸钾 300 kg hm^{-2} 为基肥;番茄第一、第二穗果膨大期各追施尿素 150 kg hm^{-2}。

1.3 土壤样品采集

每年栽培一茬番茄,收获后大棚一直保持覆盖状态。土壤样品于 2011 年 4 月移栽整地前采集,每小区按“S”型布设 7 个采样点,每点采样深度分别为 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm、50 ~ 60 cm;将各点同一层次土样混合,风干、过筛备用。

1.4 测定项目及方法

土壤 pH 用玻璃电极法(土水比 1∶2.5)测定;土壤交换性酸和交换性 H^+、Al^{3+} 用 1.0 mol L^{-1} KCl 提取—酸碱中和滴定法测定;阳离子交换量用 1.0 mol L^{-1} 中性乙酸铵交换法测定;交换性 Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 K^+、Na^+ 土样用乙醇洗涤除去水溶性盐、再用 1.0 mol L^{-1} 中性乙酸铵浸提,分别以原子吸收法和火焰光度法测定;土壤交换性盐基总量用加和法算出;土壤有机质用 C、N、S 元素分析仪(Elementar III)测定;NO_3^- 用 0.01 mol L^{-1} $CaCl_2$ 浸提-AA3 连续流动分析仪测定。

1.5 结果统计

数据采用 DPS7.05、SPSS19.0 和 Excel 2003 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤活性酸

土壤活性酸决定于与土壤固相表面吸附的 H^+ 处于平衡状态的土壤溶液中 H^+ 数量;活性酸度越高,pH 越低。图 1 为不同灌溉处理土壤 pH 剖面分布测定结果。由图 1 可见,三种灌溉处理土壤 pH 剖面变化特点相似;即表层土壤 pH 最低,0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 随深度增加而迅速升高,30 ~ 50 cm 土层变化相对平缓,而到 50 ~ 60 cm 土层基本等同于试验开始前的 pH。

由图 1 还可以看出,不同灌溉处理间土壤 pH 的差异主要存在于 0 ~ 40 cm 土层,且滴灌明显高于沟灌和渗灌,差异达到 1% 显著水平,渗灌总体上又高于沟灌,但两者差异不显著;在 40 ~ 60 cm 土层沟灌土壤 pH 小于滴灌,滴灌又小于渗灌,但处理间差异不显著。

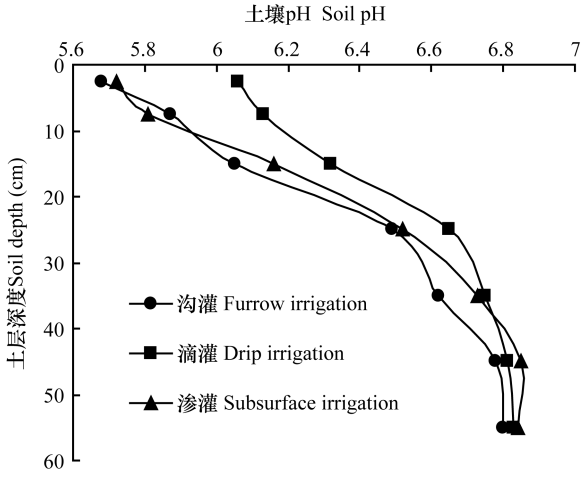


图 1 土壤 pH 剖面变化

Fig. 1 Variation of pH in the soil profile

2.2 土壤交换性酸

土壤交换性酸含量剖面分布如图 2 所示。由图 2 可见,沟灌、渗灌和滴灌处理土壤交换性酸含量总体上随着土层的加深而降低,且 0 ~ 40 cm 土层的下降速率明显大于 40 ~ 60 cm 土层。

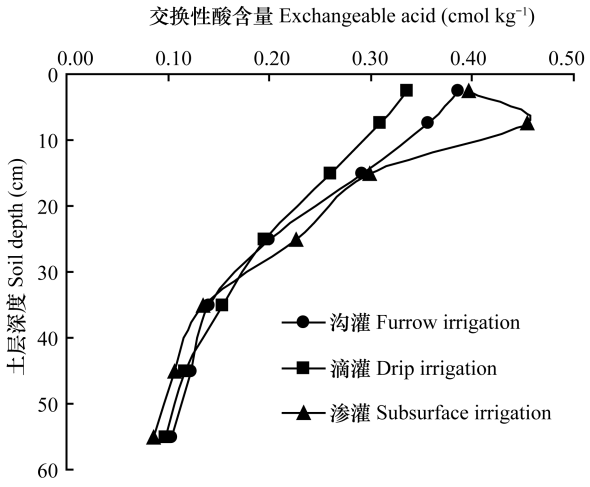
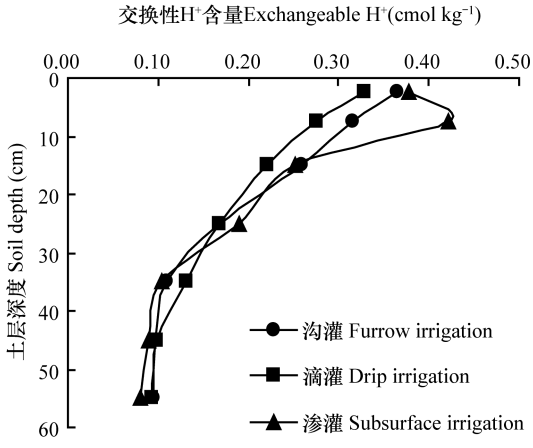


图 2　土壤交换性酸含量剖面分布

Fig. 2　Distribution of exchangeable acid in the soil profile

同一深度土层不同灌水处理间相比较，0 ~ 30 cm 土层土壤交换性酸含量排列顺序为渗灌 > 沟灌 > 滴灌，且渗灌、沟灌两处理与滴灌处理间差异达 5% 显著水平，而渗灌和沟灌处理间在 5 ~ 10 cm 土层差异达 5% 显著水平；在 30 ~ 60 cm 土层土壤交换性酸含量总体为沟灌 > 滴灌 > 渗灌，但差异很小、均未达到 5% 显著水平。

交换性 H^+ 和 Al^{3+} 之和为土壤交换性酸。由图 3 可见，土壤交换性 H^+、Al^{3+} 含量变化范围分别为 0.08 ~ 0.42 cmol kg^{-1} 和 0.01 ~ 0.05 cmol kg^{-1}，即交换性 H^+ 含量远远高于 Al^{3+} 含量，说明各灌溉处理、不同深度土层土壤交换性酸以交换性 H^+ 占绝对优势，这是因为供试土壤 pH 均大于 5.5，根据酸度理论，土壤一般在 pH < 5.5 时交换性 Al^{3+} 才会脱离晶格束缚而被大量释放出来。



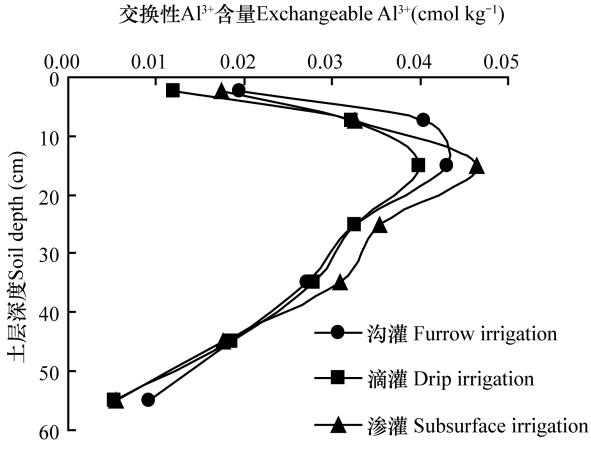


图 3　土壤交换性 H^+、Al^{3+} 含量剖面分布

Fig. 3　Distribution of exchangeable H^+ and Al^{3+} in the soil profile

土壤交换性 H^+ 在交换性酸中占优势地位，故两者剖面分布特点基本相同；而土壤交换性 Al^{3+} 含量则呈随土层深度增加先上升后降低的趋势变化，且在 10 ~ 20 cm 深处有最大值出现。不同灌溉处理间比较，滴灌各土层土壤交换性 Al^{3+} 含量均低于沟灌和渗灌。

2.3　土壤交换性盐基组成及盐基饱和度

由图 4 可见，各处理 EB（交换性盐基总量）均呈现表层高、随着土层加深先降低后增加的变化趋势，在 0 ~ 60 cm 土层土壤 EB 总体上以渗灌为最高、沟灌居中、滴灌最低。处理间土壤 CEC（阳离子交换量）亦有较大差异，有研究指出酸化可导致土

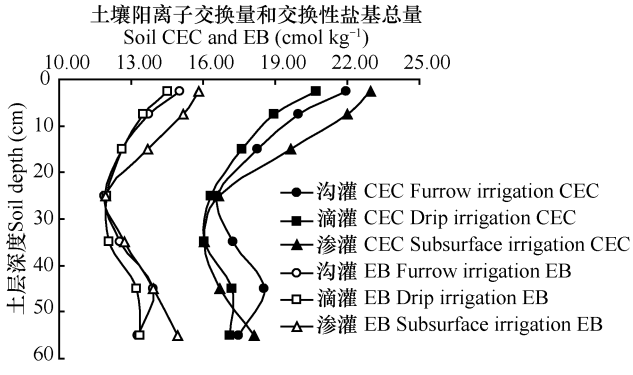


图 4　土壤 CEC 和 EB 剖面变化

Fig. 4　Distribution of CEC and EB in the soil profile

壤无机矿物部分 CEC 降低[12],但本文土壤 CEC 并未随 pH 的降低而下降,说明供试土壤 CEC 的大小可能主要决定于有机质或黏粒物质含量。也正是由于 CEC 不同,致使各处理土壤 BS(盐基饱和度)与 EB 剖面分布不同(图 5)。各灌溉处理土壤 BS 均以表层最低,随着土层加深逐渐增加。各处理间相比较,0 ~ 60 cm 土层 BS 均以沟灌为最低;在 0 ~ 30 cm 土层以滴灌 BS 最高、且与沟灌和渗灌处理间差异达 5% 显著水平。

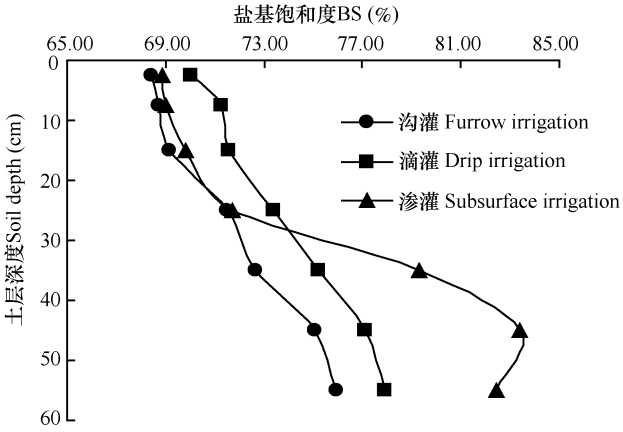


图 5 土壤 BS 剖面变化

Fig. 5 Distribution of BS in the soil profile

表 2 为各灌溉处理几种交换性盐基离子饱和度(盐基离子占 CEC 的百分比)计算结果。由表 2 可见,三种灌溉处理各土层土壤交换性盐基离子饱和度大小顺序均为 Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+,且 Ca^{2+}、Mg^{2+} 饱和度之和决定了盐基饱和度随土层深度增加而增大的剖面分布特点;而 K^+、Na^+ 饱和度总体上则呈随土层加深先降低后上升的趋势变化。灌溉处理间比较,K^+ 和 Na^+ 饱和度之和在 0 ~ 10 cm 土层以沟灌最高、滴灌最低;在 10 ~ 20 cm 土层以渗灌最高、滴灌最低;在 20 ~ 60 cm 则以渗灌最高、沟灌最低。由于 K^+ 和 Na^+ 易于随水分移动,两离子饱和度之和的剖面分布反映了不同灌溉方式盐分移动的特点[13-14]。

2.4 土壤硝态氮及有机质含量

土壤硝态氮和有机质含量测定结果如表 3 所示。由表 3 可见,各灌溉处理表层土壤硝态氮累积明显,其含量随土层深度增加而迅速降低。0 ~ 10 cm 土层土壤硝态氮含量排列顺序为渗灌 > 沟灌 > 滴灌;10 ~ 30 cm 土层为沟灌 > 渗灌 > 滴灌,且沟灌和渗灌两处理与滴灌差异达 5% 显著水平;30 cm 以下土层均以沟灌处理最高,滴灌和渗灌差异不大。

表 2 土壤交换性盐基离子饱和度统计结果

Table 2 Statistics of exchangeable base ion saturations in the soil samples(%)

土层 Soil depth(cm)	沟灌 Furrow irrigation				滴灌 Drip irrigation				渗灌 Subsurface irrigation			
	$1/2Ca^{2+}$	$1/2\ Mg^{2+}$	K^+	Na^+	$1/2Ca^{2+}$	$1/2\ Mg^{2+}$	K^+	Na^+	$1/2Ca^{2+}$	$1/2\ Mg^{2+}$	K^+	Na^+
0 ~ 5	48.79	15.29	3.19	1.08	49.92	16.08	2.90	1.13	49.08	15.54	3.09	1.15
5 ~ 10	49.46	15.12	3.10	1.03	51.27	16.22	2.69	1.10	49.59	15.32	2.86	1.14
10 ~ 20	50.74	15.18	2.25	1.01	52.2	16.24	2.04	1.08	50.80	15.35	2.55	1.10
20 ~ 30	52.94	15.44	2.53	1.00	53.45	16.44	2.39	1.16	53.36	15.37	2.59	1.10
30 ~ 40	53.54	15.75	2.55	0.81	54.66	16.76	2.49	1.12	58.52	16.83	2.74	1.23
40 ~ 50	53.72	17.69	2.59	1.09	55.55	17.71	2.56	1.27	58.86	19.96	3.24	1.27
50 ~ 60	53.82	18.43	2.63	1.11	55.39	18.72	2.51	1.31	58.00	19.64	3.25	1.08

表 3 土壤硝态氮和有机质含量统计结果

Table 3 Statistics of NO_3^- and organic matter contents in the soil samples

土层 Soil depth (cm)	沟灌 Furrow irrigation		滴灌 Drip irrigation		渗灌 Subsurface irrigation	
	硝态氮 NO_3^--N ($mg\ kg^{-1}$)	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	硝态氮 NO_3^--N ($mg\ kg^{-1}$)	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)	硝态氮 NO_3^--N ($mg\ kg^{-1}$)	有机质 OM ($g\ kg^{-1}$)
0 ~ 5	1 021 b	42.40 ab	502 a	40.82 a	1 308 b	42.61 b
5 ~ 10	680 b	37.62 a	204 a	37.05 a	1 276 c	39.86 b
10 ~ 20	540 b	33.85 a	66.2 a	32.71 a	465 b	33.95 a
20 ~ 30	107 b	24.89 ab	65.6 a	23.99 a	82.8 b	27.74 b
30 ~ 40	74.3 b	19.41 a	54.1 ab	18.80 a	43.3 a	18.27 a
40 ~ 50	37.1 a	13.01 b	23.4 a	11.34 ab	30.4 a	10.81 a
50 ~ 60	45.8 b	12.87 b	21.1 a	10.41 a	19.2 a	9.67 a

注:相同土层同一测定指标,不同小写字母表示达 5% 显著差异 Note: Within the same soil depth, different lowercase letters represent significant difference at 0.05 level

各灌溉处理土壤有机质含量随着土层加深而降低，但灌溉处理间亦表现出差异。三处理土壤有机质含量在 0～30 cm 土层表现为渗灌 > 沟灌 > 滴灌；在 40～60 cm 土层则为沟灌 > 滴灌 > 渗灌。

3　讨　论

3.1　影响土壤酸化因素分析

3.1.1　土壤 pH 与交换性酸　　图 6 是各处理不同土层土壤 pH 与交换性酸含量间的相关分析结果。由图可知，各灌溉处理土壤 pH 与交换性酸含量之间均呈极显著负相关关系（$p < 0.01$），但相关方程参数及相关系数因灌溉处理而不同，沟灌处理交换性酸每上升一个单位 pH 降低的幅度高于滴灌和渗灌处理。说明沟灌土壤的酸缓冲能力较低，与滴灌和渗灌相比更易酸化。

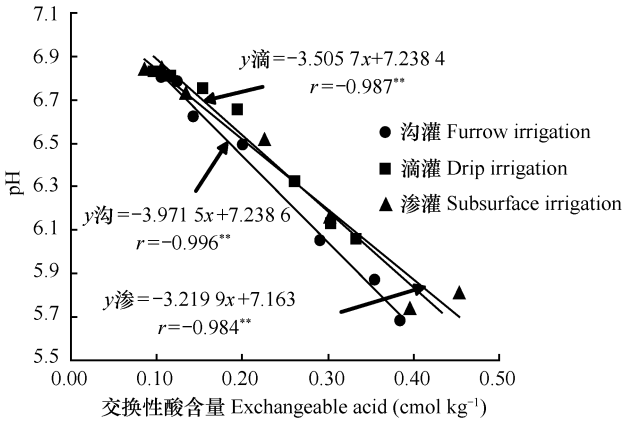


图 6　土壤 pH 与交换性酸含量的关系

Fig. 6　Relationship between pH and exchangeable acid

3.1.2　土壤 pH 与盐基饱和度　　有研究指出，盐基饱和度降低是土壤酸化进程的重要标志[15]。对各灌溉处理不同土层土壤的 pH 与盐基饱和度做相关分析，结果表明两者呈极显著正相关关系（$r = 0.873^{**}$，$n = 21$，$r_{0.01} = 0.537$）。在此基础上，进一步对土壤 pH 与 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+ 饱和度之间关系做逐步回归分析，当引入和剔除变量标准取 5% 显著水平时，得回归方程：

$$pH = 1.367 + 0.091x_1 + 0.079x_2 - 0.406x_3 \quad (1)$$

式中，x_1、x_2、x_3 分别为 $1/2Ca^{2+}$、$1/2\ Mg^{2+}$、K^+ 饱和度（%）。F 检验结果表明，方程（1）达到 1% 显著水平（$F = 53.30^{**}$，$F_{0.01(3,17)} = 5.19$）。对方程（1）中各偏回归系数进行显著性检验，x_1、x_2 偏回归系数达到 1% 显著水平，x_3 偏回归系数达 5% 显著水平；相应的标准化回归系数 b_{x1}、b_{x2}、b_{x3} 分别为 0.674、0.323 和 −0.287，可见供试土壤 pH 与盐基饱和度关系密切，且主要受 Ca^{2+} 饱和度影响，其次是 Mg^{2+}、K^+ 饱和度。

3.1.3　土壤 pH 与硝态氮含量　　由于大量施用氮肥以及硝化作用强烈，NO_3^- 等酸根离子大量积累于保护地上层土壤中，这些酸根离子水解后产生 H^+，是导致土壤酸化的重要原因[16-17]。统计分析结果表明，各灌溉处理不同土层土壤 pH 与硝态氮含量之间呈极显著负相关关系（$r = -0.896^{**}$，$n = 21$，$r_{0.01} = 0.537$），即土壤 pH 随着硝态氮含量的增加而降低。

3.1.4　土壤交换性 H^+、Al^{3+} 与有机质含量　　上层土壤有机质大量积累是保护地土壤的又一重要特征。土壤有机质、黏粒矿物及有机矿质胶体，是吸附阳离子的载体，也是解离释放 H^+、Al^{3+} 的“酸胶基”[18]，因此，有机质与交换性 H^+、Al^{3+} 离子含量及其活性有着密切的联系[19-20]。相关分析结果表明，在 0～40 cm 各层不同灌溉处理土壤的有机质含量与 $1/3Al^{3+}$/EA 呈极显著负相关关系（$r = -0.941^{**}$，$n = 15$，$r_{0.01} = 0.623$）；即随土壤有机质含量增加，$1/3Al^{3+}$ 占 EA 的比例降低、H^+ 占 EA 的比例增加，说明有机质不仅是 H^+ 的重要来源，又能与 Al^{3+} 发生络合反应而降低其活性。而在 40～60 cm 土层土壤交换性 H^+、Al^{3+} 占 EA 的比例与有机质之间相关系数未达到 5% 显著水平，说明有机质含量较低时，其对交换性 H^+、Al^{3+} 的影响较小。

3.2　灌溉方式影响土壤酸化的机理探讨

受作物养分吸收、肥料带入、氮素等元素形态转化、根系分泌以及微生物作用等因素的影响，保护地土壤中 H^+ 大量增加[21]，H^+ 浓度升高能够破坏土壤矿质胶粒晶格结构，又进一步促进了 Al^{3+} 的释放，这可能是保护地土壤酸化的重要原因之一。

以不同方式灌溉，一次灌水单位面积灌水量、湿润土体体积及位置、作物全生育期灌水总量不同，灌水过程及灌水后土壤水分运动方向、速率各异，导致致酸离子和盐基离子累积分布不同，可能是保护地土壤酸化产生差异的重要原因。沟灌处理单次灌水量最大，理论上灌水后 0～40 cm 土层全面湿润且水分含量较高，水分既可向下运动至较深土层，在地表强烈蒸发条件下也会向上运动以补充表层土壤水分损失。在此过程中，较多的 H^+、Al^{3+}、NO_3^- 等致酸离子及其他盐基离子能够随水移动至较深层次；但各种离子的存赋形态、电荷数量

及离子半径不同,其移动性差异明显。交换能力较强的 H^+、Al^{3+} 结合到土壤胶体表面交换位点上,导致土壤致酸离子饱和度上升、BS 降低明显,且较深土层范围土壤的活性酸度均高于滴灌和渗灌处理。

渗灌处理由于灌水管在地下 30 cm 深处,灌水后水分总是向上运动以补充地表蒸发和植物根系吸收造成的水分亏缺;这一水分运动过程,使致酸离子在 0 ~ 30 cm 土层逐渐积累。由于渗灌单次灌水量最小,灌水后地表保持相对干燥状态,地表水分蒸发强度、水分运动速率均低于沟灌,由此携带的盐分离子数量少于沟灌,土壤活性酸度也低于沟灌。渗灌处理 0 ~ 30 cm 土层土壤交换性酸总量高于其他处理,但由于其有机质含量较高、CEC 值较大,土壤胶体表面吸附的交换性 H^+、Al^{3+} 比例并不高,使之表现出较强的酸缓冲能力。

滴灌灌水是局部湿润土体,一次灌水量少且自地表进入土体,水分这一收支过程主要发生在上层土体,且水分运动总体上呈上下双向。这一水分运动特点,致使滴灌处理 0 ~ 40 cm 土层土壤活性酸度和交换性酸含量均低于沟灌和渗灌处理,尤其在 0 ~ 30 cm 土层差异更为明显。

4 结 论

本文对连续 13 a 以不同灌溉方式进行番茄栽培的保护地土壤酸化特征进行研究,得出结论如下:

1) 沟灌、滴灌和渗灌处理土壤活性酸、交换性酸含量均随土层加深而增加。灌溉处理间 0 ~ 40 cm 土层土壤 pH 差异明显,为沟灌 < 渗灌 < 滴灌;0 ~ 30 cm 土层土壤交换酸含量差异显著,为渗灌 > 沟灌 > 滴灌。

2) 三种灌溉处理土壤 pH 与交换性酸及 NO_3^- 含量呈极显著负相关;与盐基饱和度、特别与 Ca^{2+} 饱和度呈极显著正相关;交换性 H^+、Al^{3+} 的相对比例与土壤有机质含量关系密切。土壤盐基饱和度、有机质和 NO_3^- 含量在土壤剖面分布上表现出明显的规律性,在灌溉处理间表现出了差异性。

3) 灌溉方式不同致使土壤致酸离子及盐基离子含量剖面分布各异,甚至对土壤有机质积累产生影响,导致灌溉方式间土壤酸度剖面分布各异。从防治土壤酸化角度综合评价,滴灌效果最好,渗灌次之,而以沟灌最易引起土壤酸化。

参 考 文 献

[1] 范庆锋, 张玉龙, 陈重, 等. 保护地土壤酸度特征及酸化机制研究. 土壤学报, 2009, 46(3): 466—471. Fan Q F, Zhang Y L, Chen Z, et al. Acidity characteristics and acidification mechanism of soils in protected fields (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 466—471

[2] 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. 土壤学报, 2006, 43(4): 571—576. Yu H Y, Li T X, Zhou J M. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 571—576

[3] 王辉, 董元华, 李德成, 等. 不同种植年限大棚蔬菜土壤养分状况研究. 土壤, 2005, 37(4): 460—464. Wang H, Dong Y H, Li D C, et al. Nutrient variation in plastic greenhouse soils with the years of cultivation (In Chinese). Soils, 2005, 37(4): 460—464

[4] 邓玉龙, 张乃明. 设施土壤 pH 与有机质演变特征研究. 生态环境, 2006, 15(2): 367—370. Deng Y L, Zhang N M. The evolution characteristics of soil pH and organic matter in greenhouse (In Chinese). Ecology and Environment, 2006, 15(2): 367—370

[5] 虞娜, 张玉龙, 黄毅, 等. 保护地不同灌溉方法表层土壤 pH 小尺度的空间变异. 土壤, 2008, 40(5): 828—832. Yu N, Zhang Y L, Huang Y, et al. Micro-scale spatial variability of surface soil pH under different irrigation methods in greenhouse (In Chinese). Soils, 2008, 40(5): 828—832

[6] Erdem T, Arin L, Erdem Y, et al. Yield and quality response of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) under different irrigation regimes, nitrogen applications and cultivation periods. Agricultural Water Management, 2010, 97: 681—688

[7] 王伟承, 张玉龙, 姬景红, 等. 灌溉方法对保护地番茄需水特点的影响. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 93—96. Wang W C, Zhang Y L, Ji J H, et al. Effect of different irrigation methods on water requirement pattern of tomato in solar greenhouse (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 93—96

[8] Fidler J. Temperature characteristics and Bowen ratio in potato stands under various irrigation regimes. Rostlinna-Vyroba, 1995, 41(10): 451—457

[9] Yang L J, Zhang Y L, Li F S, et al. Soil phosphorus distribution as affected by irrigation methods in plastic film house. Pedosphere, 2011, 21(6): 712—718

[10] Bogle C R. Comparison of subsurface trickle and furrow irrigation on plastic-mulched and bare soil for tomato production. J Amer Soc Hort Sci, 1989, 114(1): 40—43

[11] 吴普特, 牛文全, 赫宏科. 现代高效节水灌溉设施. 北京:化学工业出版社, 2002: 7—12. Wu P T, Niu W Q, He H K. Modern high-efficiency irrigation water saving facilities (In Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 7—12

[12] 朱祖祥. 土壤学(上册). 北京: 农业出版社, 1983: 54—57. Zhu Z X. Pedology (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1983: 54—57

[13] Hartikainen H, Yli-Halla M. Oxidation-induced leaching of sulphate and cations from acid sulphate soils. Water, Air and Soil Pollution, 1986, 27: 1—13

[14] 姜勇，张玉革，梁文举，等. 温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响. 水土保持学报，2005，19(6)：78—81. Jiang Y，Zhang Y G，Liang W J，et al. Influence of greenhouse vegetable cultivation on composition of soil exchangeable base cations (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation，2005，19(6)：78—81

[15] 范宇，刘世全，张宗锦. 西藏酸性土壤交换性盐基状况及其变化特点. 四川农业大学学报，2004，22(4)：356—360. Fan Y，Liu S Q，Zhang Z J. The status of exchangeable base and its characteristic change of acid soils in Tibet (In Chinese). Journal of Sichuan Agricultural University，2004，22(4)：356—360

[16] 范庆锋，张玉龙，陈重. 保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及 pH 的影响. 水土保持学报，2009，23(1)：103—106. Fan Q F，Zhang Y L，Chen Z. Effects of protected field vegetable cultivation on soil salinity accumulating and pH (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation，2009，23(1)：103—106

[17] 张永春，汪吉东，陈明星，等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响. 土壤学报，2010，47(3)：465—472. Zhang Y C，Wang J D，Chen M X，et al. Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu lake region，China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica，2010，47(3)：465—472

[18] 于天仁. 土壤化学原理. 北京：科学出版社，1987：325—363. Yu T R. Principle of soil chemistry (In Chinese). Beijing：Science Press，1987：325—363

[19] 刘世全，张宗锦，王昌全，等. 西藏酸性土壤的酸度特征. 土壤学报，2005，42(2)：211—218. Liu S Q，Zhang Z J，Wang C Q，et al. Acidity of acid soils in Tibet (In Chinese). Acta Pedologica Sinica，2005，42(2)：211—218

[20] Mokolobate M S，Haynes R J. Comparative liming effect of four organic residues applied to an acid soil. Biol Fertil Soils，2002，35：79—85

[21] 徐仁扣，Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响. 农业环境保护，2002，21(5)：385—388. Xu R K，Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices (In Chinese). Agro-Environmental Protection，2002，21(5)：385—388

EFFECT OF IRRIGATION MODE ON SOIL ACIDIFICATION IN PROTECTED FIELD

Li Shuang　Zhang Yulong†　Fan Qingfeng　Yu Na　Liu Chang

(*College of Land and Environment*，*Shenyang Agricultural University*，*Key Laboratory of Northeastern cultivated land conservation of Ministry of Agriculture*，*Shenyang*　110866，*China*)

Abstract　Soil samples for analysis were collected at different depths within 0 ~ 60cm from three plots different in irrigation mode in the same protected field where an irrigation experiment had been going on for 13 years to explore the effect of irrigation mode on characteristics of soil acidification. Analysis of the samples show that the soil active acidity and the content of exchangeable acid decreased with soil depth in all the treatments. Soil active acidity in the 0 ~ 40 cm soil depth varied sharply between the treatments，displaying a general order of furrow irrigation > subsurface irrigation > drip irrigation，while the differences in content of exchangeable acid between the treatments were significant mainly at the depth of 0 ~ 30cm，showing an order of subsurface irrigation > furrow irrigation > drip irrigation. Content of exchangeable Al^{3+} increased first and then decreased with increasing depth in all the three treatments，but the lowest in the treatment of drip irrigation. Soil BS increased with soil depth and showed an order of drip irrigation > subsurface irrigation > furrow irrigation in the 0 ~ 30cm soil depth. Soil pH was negatively related to exchangeable acid and nitrate nitrogen，but positively to base saturation，especially exchangeable Ca^{2+} saturation，both to an extremely significant extent. The proportion of Al^{3+} against exchangeable acid was negatively related to organic matter content，also to an extremely significant extent. In conclusion，soil acidification in protected fields is closely related to content of nitrate nitrogen，base saturation and content of organic matter. Compared with furrow irrigation and subsurface irrigation，drip irrigation is conducive to inhibition of soil acidification.

Key words　Protected field；Irrigation mode；Active acidity；Exchangeable acid；Base saturation