

不同灌溉方式对设施土壤交换性盐基组成及比例的影响

范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 虞娜

(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, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要: 为全面评价不同灌溉方式下设施土壤养分供应状况, 以设施土壤为研究对象, 采用田间试验与室内分析相结合的方法, 对连年采用沟灌、滴灌和渗灌灌溉下的设施土壤有机质含量、阳离子交换量、盐基离子组成及其比例进行了研究。结果表明: 3种灌溉方式土壤有机质、阳离子交换量及盐基离子含量表层较高, 不同灌溉方式间表层土壤有机质含量及阳离子交换量表现为渗灌高于沟灌, 沟灌高于滴灌, 土壤交换性盐基离子含量总体以渗灌处理最高。各灌溉方式 0—60 cm 土层土壤盐基离子饱和度大小顺序均为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 饱和度随土层深度的增加而增大, K^+ 、 Na^+ 饱和度总体呈随土层加深先降低后上升的变化趋势。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 饱和度在 0—30 cm 土层滴灌最高, 30—60 cm 土层渗灌最高。 K^+ 饱和度总体以渗灌为高, 沟灌居中, 滴灌最低。土壤 Ca/K 、 Mg/K 值总体以滴灌最高, 沟灌次之、渗灌较小。从不同灌溉方式对设施土壤交换性盐基组成及比例的影响来看, 采用滴灌方法不仅能省水, 有效供应养分, 更有利于保持养分之间的平衡, 是一种较为合适的灌溉方法。

关键词: 设施土壤; 灌溉方式; 交换性盐基; 盐基离子比例

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0264-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.041

Effects of Irrigation Mode on Composition and Ratios of Soil Exchangeable Base in Greenhouse

FAN Qingfeng, ZHANG Yulong, ZHANG Yuling, YU Na

(College of Land and Environment Science, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in Northeast China, Ministry of Agriculture, National

Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866)

Abstract: In order to fully evaluate nutrient availability of greenhouse soils under different irrigation treatments, field experiments were conducted to investigate the effects of drip irrigation, subsurface irrigation and furrow irrigation on the contents of organic matter, CEC, the composition and ratios of soil exchangeable bases in greenhouse. The results showed that the soil organic matter, CEC and exchangeable base ions were all higher in the surface soil layer under three irrigation treatments. The contents of soil organic matter and CEC of soils followed the order of subsurface irrigation > furrow irrigation > drip irrigation, the contents of exchangeable base ions were the highest under subsurface irrigation. Base ions saturations in 0—60 cm soil layer under three irrigation treatments all followed the order of $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, saturations of Ca^{2+} and Mg^{2+} both increased with the increasing of soil depth. While the saturations of K^+ and Na^+ decreased first and then increased with the increasing of soil depth. Saturations of Ca^{2+} and Mg^{2+} in the 0—30 cm soil layer were higher under drip irrigation, while they in the 30—60 cm soil layer were higher under subsurface irrigation. Saturation of K^+ was the highest under subsurface irrigation and the lowest under drip irrigation. The ratios of Ca/K and Mg/K were the highest under drip irrigation and the lowest under subsurface irrigation. According to the influence of different irrigation treatments on the composition and proportion of exchangeable bases in greenhouse soil, drip irrigation could not only save water and effectively provide nutrients, but also benefited to maintain a balance between nutrients, which was a more appropriate irrigation method in this study.

Keywords: greenhouse soil; irrigation mode; exchangeable base; ratio of base cations

收稿日期: 2017-07-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501306); 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B01); 辽宁省自然科学基金项目(2014027013); 辽宁省教育厅项目(L2015474)

第一作者: 范庆锋(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤改良与农业节水研究。E-mail: fanqingfeng1@163.com

通信作者: 张玉龙(1954—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤改良与农业节水研究。E-mail: ylzau@163.com

近年来,设施蔬菜栽培在我国北方地区发展十分迅速,由于设施土壤长期处于高温、高湿、缺乏雨水淋洗、水分蒸发量大的特殊环境条件下,加上设施蔬菜栽培灌水不合理、肥料施用量大、土壤复种指数高,使设施土壤与旱田土壤质量存在着较大的差异^[1-4]。土壤质量在很大程度上是由土壤的吸附及解吸性能决定的^[5],阳离子交换量是土壤所能吸附和交换的阳离子的容量,它直接反映土壤的保肥、供肥性能和缓冲能力。因此,阳离子交换量常被作为土壤资源质量的评价指标和土壤施肥、改良等的重要依据^[4]。土壤交换性盐基离子则通常是植物营养所需要的养分,盐基离子含量、盐基饱和度及不同盐基离子比例的高低可以反映土壤理化性质、土壤保蓄植物所需阳离子的能力及缓冲阳离子养分的能力,是土壤肥力水平的重要指标之一^[6]。土壤中交换性离子的有效性,不仅决定于交换性离子的绝对数量,与交换性离子饱和度关系更大。因为离子的饱和度越高,其在土壤胶体表面被交换解吸的机会越多,有效度就越大^[4]。因此,对设施土壤交换性盐基组成的研究有助于更加准确地了解设施环境条件下土壤的肥力的演变特征。

灌溉作为设施蔬菜生产的主要技术措施直接影响土壤物质与能量运移过程,对土壤环境因子有着综合的影响效应。在设施内采用合理的灌溉措施不仅可以提高水肥利用率,提高作物产量品质,还可以改善土壤理

化性状,进而创造良好的土壤环境^[7-9]。目前设施多种灌溉方式得以发展,而不同灌溉方式的灌水频率、灌水量和土壤水分运动规律均有不同,其对设施土壤中交换性盐基离子累积、迁移及其组成必然会产生较大的影响。近年来,相关学者对设施土壤盐分的积累程度,水溶性盐分离子的组成等方面进行了较多研究^[10-13],但关于长期不同灌溉方式对设施土壤阳离子交换量、盐基饱和度及交换性盐基离子组成的影响等方面的研究还少见报道,尚缺乏针对性的研究。因此,本文通过对长期不同灌溉方式下不同深度设施土壤的阳离子交换量、盐基饱和度及盐基离子组成及比例的研究,探讨长期不同灌溉方式对土壤交换性盐基离子组成的影响,从提高土壤肥力的角度对不同的灌溉方式进行评价并选择合理的灌溉方式,对于设施蔬菜生产和土壤资源的可持续利用具有十分重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验在沈阳农业大学长期定位设施灌溉试验基地进行。灌溉试验自 1998 年开始实施,至采样时已按同一方案连续进行了 13 年。试验于每年春季 4 月末开始,8 月中旬结束。供试作物为番茄,品种为 L402,留 3 穗果打顶,每穗留 4 个果实,栽培行、株距分别为 50,30 cm。供试土壤为棕壤,1998 年定位试验开始前土壤条件均匀,土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试耕层土壤的基本理化性质

有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)
22.70	6.80	1.30	96.91	1.86	103.10	17.60	164.00	16.32

1.2 试验设计

试验设沟灌(G)、滴灌(D)、渗灌(S) 3 个处理,4 次重复,共 12 个小区,田间小区随机排列,小区间用 60 cm 深塑料膜隔开以防止水分互相渗入。沟灌方式以垄沟为灌水沟,按常规方法灌水;滴灌管采用普通的市售滴灌带,直径 20 mm,两出水孔间距 30 cm,滴灌管平铺于地表,出水孔位置与作物根部相对应;渗灌管采用内径 16 mm、外径 20 mm 的微孔渗灌管,渗灌管埋于土层深度 30 cm 处,位置与作物行垂直对应;每个处理按 10,20,30,40,50 cm 深度埋设张力计。各灌溉方式土壤计划湿润层为 30 cm,灌水上下限土壤水吸力均设为 6,30 kPa。即理论上计划湿润层土壤水吸力达到 30 kPa 时开始灌水、灌到土壤水吸力 6 kPa 时灌水结束。由于 3 种灌溉方式湿润方式不同,沟灌灌水后计划湿润层得到全面湿润,渗灌和滴灌均为局部湿润,且渗灌出水孔在地下作物根系周围、节水效果更强,故将沟灌、滴灌和渗灌 3 种灌水方法的湿润比分别设定为 1.00,0.50,0.33。由事先

采集土样测得的土壤持水特征曲线,按公式 $Q=(W_u-W_d)\times H\times a\times S$ 计算单次灌水量,式中:Q 为小区单次灌水量(m³);W_u 和 W_d 分别为灌水控制上、下限土壤水吸力值所对应的土壤体积含水量(m³/m³);H 为计划湿润层厚度(m);a 为计划湿润比,无量纲;S 为小区面积(m²)。以埋深 20 cm 的张力计读数指示灌水,即当张力计读数达到灌水控制下限土壤水吸力值时,计算单次灌水量。

3 种不同灌溉方式处理施肥均相同。每年春季 4 月中旬整地时撒施膨化鸡粪 37.5 t/hm² 作为底肥。番茄定植时施用磷酸二铵 0.6 t/hm²,硫酸钾 0.4 t/hm²,尿素 0.15 t/hm² 作为基肥,每年在番茄第 1 穗果、第 2 穗果膨大期追肥 2 次,每次追施尿素 0.15 t/hm²。试验结束后,塑料大棚保持覆盖状态至翌年下茬番茄栽培开始前。

1.3 测定项目与方法

试验土样于番茄收获后采集,每小区按“S”形布设 5 个采样点,分层采集土壤样品。每点采样深度分别为

0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 cm。土壤酸碱度(pH)采用电位法(水土比为 2.5 : 1)测定,土壤阳离子交换量(CEC)采用 1 mol/L 中性乙酸铵交换法测定^[14];土壤有机质(OM)采用元素分析仪(ElementarIII 型,德国)测定;土壤交换性盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)测定,先用 70% 乙醇溶液洗涤除去设施土壤中的可溶盐,再用 1 mol/L 中性乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法测定。土壤交换性盐基总量(EB)采用加和法计算得出^[15]。

1.4 数据处理

所有数据采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式对设施土壤阳离子交换量及有机质含量的影响

由表 2 可知,各灌溉处理土壤有机质含量及 CEC 均以表层含量最高,随着土层加深呈逐渐降低的变化趋势;40 cm 以下有机质含量和 CEC 随土层加深变化幅度较小,趋于稳定。不同灌溉处理间土壤有机质含量在 0—30 cm 土层表现为渗灌高于沟灌,而沟灌又高于滴灌,在 40—60 cm 土层则表现为沟灌最高,滴灌居中,渗灌处理最低。比较同一层次不同灌溉处理土壤 CEC 可以看出,在 0—20 cm 各层土壤

CEC 均以渗灌最大,沟灌其次,滴灌最小,且各灌溉处理之间土壤 CEC 的差异均达到了 5% 显著性水平。在 20—60 cm 土层,不同灌溉方式土壤 CEC 差异并不十分显著。

不同灌溉方式对设施土壤有机质含量有显著的影响,其中渗灌更有利于设施表层土壤有机质的累积,主要是因为渗灌单次灌水量较小,灌水之后水分的湿润范围很难达到地表,表层土壤相对干燥,使得表层土壤有机质分解受到抑制的缘故。但渗灌处理在 30—40 cm 灌水管附近土壤水热状况良好,更有利于有机质分解,使得该层次有机质含量急剧降低。与此不同,滴灌为土体局部湿润,地表湿润面积少,土壤温度较高,土壤的水分、温度较为适宜,更有利于有机质的矿化分解,因此有机质含量总体较低^[15]。相关研究^[16-18]表明,阳离子交换量与有机质有着极显著的正相关关系,这是因为有机质的 CEC 远大于矿质胶体,有机质含量越高,土壤中有机胶体以及有机无机复合胶体数量越多,其表面阳离子吸附位点也随之增多,因此有机质含量高的土壤阳离子交换量也相对较高^[19]。对各灌溉处理不同土层土壤有机质含量与 CEC 之间关系进行相关分析。由图 1 可知,供试土壤有机质含量与 CEC 之间呈极显著正相关关系($r=0.670^{**}$, $n=18$, $r_{0.01}=0.590$),即土壤 CEC 随着有机质含量的增加而升高。

表 2 不同灌溉方式设施土壤有机质含量及阳离子交换量

土层 深度/cm	沟灌		滴灌		渗灌	
	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)	OM/ (mg · kg ⁻¹)	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)	OM/ (mg · kg ⁻¹)	CEC/ (cmol · kg ⁻¹)	OM/ (mg · kg ⁻¹)
0—10	20.98±0.45b	40.01±3.41b	19.82±0.49c	38.94±2.56c	22.50±0.51a	41.23±1.66a
10—20	18.25±0.38b	33.85±1.02a	17.63±0.43c	32.71±4.88a	19.64±0.46a	33.95±2.00a
20—30	16.92±0.47a	24.89±1.46ab	16.30±0.36a	23.99±1.91b	16.66±0.59a	27.74±2.07a
30—40	17.25±0.60a	19.41±1.60a	16.04±0.56a	18.80±2.96a	16.06±0.46a	18.27±2.29a
40—50	18.53±0.68a	13.01±1.48a	17.18±0.59ab	11.34±3.86ab	16.68±0.42b	10.81±1.83b
50—60	17.47±0.52a	12.87±12.69a	17.13±0.36a	10.41±3.99b	18.13±1.12a	9.67±0.63b

注:表中数据为平均值±标准误差;相同土层同一测定指标不同小写字母表示达 5% 显著差异。下同。

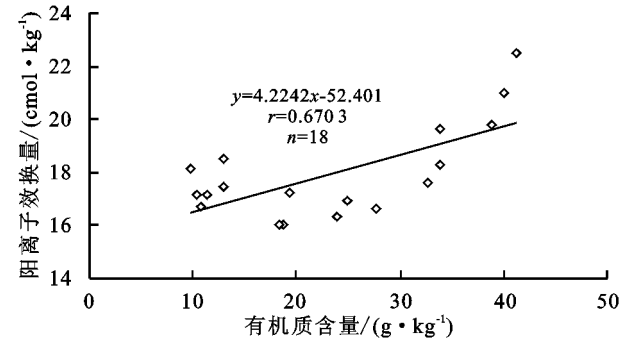


图 1 土壤阳离子交换量与有机质含量的关系

2.2 不同灌溉方式对设施土壤盐基离子组成的影响

交换性盐基离子是土壤质量的重要方面,在很大程度上反映了土壤的保肥、供肥、缓冲能力,土壤交换性盐基离子中的 Ca、Mg、K 是植物所必须的养分,

其在土壤中的数量及其饱和度与作物的吸收利用有着直接的关系^[5]。由表 3 可知,在 0—60 cm 土层沟灌、滴灌和渗灌处理 EB 的范围分别为 11.89~14.38, 11.97~14.00, 11.94~15.49 cmol/kg。相同土层不同灌溉处理间比较,土壤 EB 在各土层均以渗灌处理最高,这可能与渗灌处理阳离子交换量较大有一定关系,特别是在上层土壤;也可能与盐基离子随水分单向向上运动而缺少淋洗有关。而在 0—30 cm 土层,沟灌和滴灌处理之间 EB 差异很小,在 30—60 cm 土层 EB 则表现为沟灌大于滴灌。

不同灌溉方式下土壤交换性盐基离子的剖面分布均呈现表聚的特点,且均以 Ca²⁺ 占绝对优势,其次是 Mg²⁺, 之后是 K⁺、Na⁺。比较不同灌溉方式间土

壤交换性盐基离子含量变化情况可以看出,在 0—60 cm 土层土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 含量总体上渗灌处理最高;沟灌与滴灌处理相比,土壤交换性 Ca^{2+} 含量在 0—60 cm 深度各层均为沟灌大于滴灌处理,交换性 Mg^{2+} 在 0—30 cm 各土层为滴灌处理

大于沟灌处理、30—60 cm 土层则为沟灌大于滴灌处理。土壤交换性 K^{+} 除 20—30 cm 沟灌小于滴灌处理外,其他土层均为沟灌高于滴灌;而交换性 Na^{+} 含量总体上为滴灌大于沟灌处理,但在不同土层、不同灌溉处理间分布规律不强。

表 3 土壤交换性盐基离子含量 单位:cmol/kg

土层 深度/cm	沟灌					滴灌					渗灌				
	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	EB	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	EB	1/2Ca ²⁺	1/2Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	EB
0—10	10.30b	3.19a	0.66a	0.22a	14.38b	10.03b	3.20a	0.56a	0.22a	14.00b	11.10a	3.47a	0.67a	0.26a	15.49a
10—20	9.26b	2.77a	0.41ab	0.19a	12.63b	9.21b	2.86a	0.36b	0.19a	12.62b	9.98a	3.02a	0.50a	0.22a	13.71a
20—30	8.83a	2.57a	0.32b	0.17a	11.89a	8.71a	2.68a	0.39ab	0.19a	11.97a	8.67a	2.66a	0.43a	0.18a	11.94a
30—40	9.24a	2.72a	0.44a	0.17a	12.57a	8.77a	2.69a	0.40a	0.20a	12.06a	9.40a	2.70a	0.44a	0.20a	12.74a
40—50	9.96a	3.28a	0.48a	0.20a	13.92a	9.54a	3.04a	0.44a	0.22a	13.24a	9.82a	3.34a	0.54a	0.22a	13.92a
50—60	9.40b	3.22a	0.46ab	0.19a	13.27b	9.49b	3.21a	0.43b	0.22a	13.35b	10.61a	3.56a	0.59a	0.20a	14.95a

2.3 不同灌溉方式下设施土壤盐基离子饱和度

不同灌溉方式下不同土层交换性阳离子饱和度如图 2 所示。由图 2 可以看出,各处理不同深度土层土壤盐基离子饱和度均以 Ca^{2+} 饱和度最高,其次是 Mg^{2+} ,之后是 K^{+} 、 Na^{+} ,各处理土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 饱和度随土层深度的增加而逐渐增大,而 K^{+} 、 Na^{+} 饱和度总体呈随土层加深先降低后上升的趋势变化。这是因为设施蔬菜栽培土地利用频率高,蔬菜生产量大,蔬菜吸收带走的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 较多。而设施蔬菜栽培主要施用有机肥,化肥主要以尿素、NPK 复合肥料为主,长期施用氮、钾肥,会降低土壤中 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 特别是交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量水平,进而降低其饱和度。不同灌溉处理间比较, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 饱和度在 0—30 cm 土层均以滴灌最高,渗灌、沟灌相差不大;在 30—60 cm 土层 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 饱和度以渗灌最高、滴灌居中、沟灌处理最低。 K^{+} 饱和度在 0—10 cm 土层以沟灌为最高、渗灌居中、滴灌处理最低,在 10—60 cm 土层以渗灌处理最高、沟灌居中、滴灌最低。各灌溉处理 Na^{+} 饱和度在 0—60 cm 土层均以沟灌处理最低,渗灌和滴灌相比除 0—20 cm 土层渗灌略高于沟灌外,其余土层差异不大。这主要是与不同灌溉方式土壤的 CEC 不同有关,特别是在上层土壤。

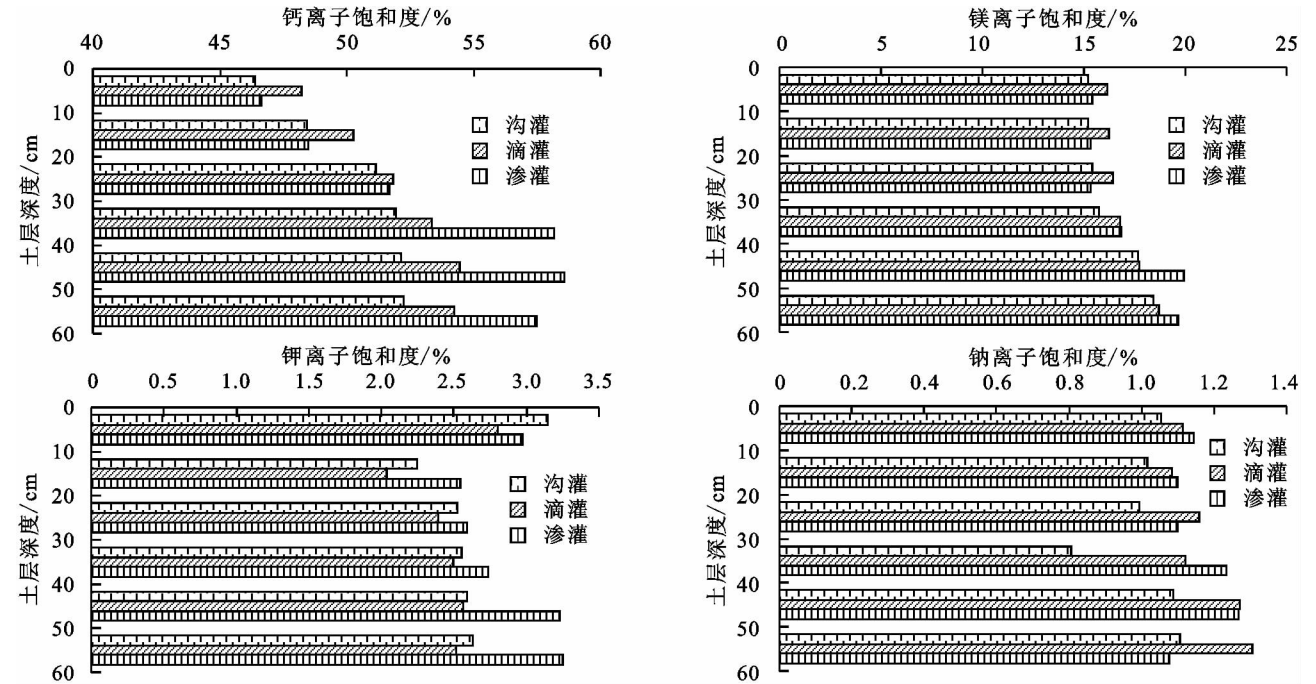


图 2 不同灌溉方式下不同土层交换性阳离子饱和度

2.4 不同灌溉方式对设施土壤盐基离子比例的影响

作物对养分的吸收,与土壤养分的比例有着密切的关系^[20],由于设施蔬菜栽培下大量施肥,加上灌水的不合理易导致土壤养分的比例失调。因此,不同灌溉方式下设施土壤养分比例特别是土壤交换性养分

的比例是值得关注的。由表 4 可知,各处理土壤 Ca/K 、 Mg/K 值均呈现表层较低,随土层加深逐渐升高,到 30—40 cm 深度又逐渐下降的趋势; Ca/Mg 值的剖面分布比较平稳,变化不大。不同灌溉处理间比较,土壤 Ca/K 、 Mg/K 值除了在 20—30 cm 土层沟

灌最高外,其余土层均是滴灌最高,沟灌次之,渗灌较小;土壤 Ca/Mg 值各处理间相差不大。各处理土壤 Ca/K、Mg/K 值表层较低,显然与设施栽培下大量施

用钾肥,导致土壤交换性钾的含量显著增加有关,而滴灌灌溉方式有利于土壤 Ca/K、Mg/K 值保持在较高水平。

表 4 不同灌溉方式下不同土层土壤交换性盐基离子比例关系

土层 深度/cm	沟灌			滴灌			渗灌		
	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg
0—10	15.61	4.83	3.23	18.04	5.76	3.13	16.53	5.16	3.20
10—20	22.59	6.76	3.34	25.58	7.96	3.22	19.96	6.03	3.31
20—30	27.59	8.02	3.44	22.33	6.87	3.25	20.09	6.16	3.26
30—40	21.00	6.18	3.40	21.93	6.73	3.26	21.36	6.14	3.48
40—50	20.75	6.83	3.04	21.68	6.92	3.14	18.19	6.18	2.94
50—60	20.43	7.00	2.92	22.07	7.46	2.96	17.98	6.03	2.98

3 结 论

(1)不同灌溉方式下土壤有机质含量及 CEC 均以表层最高,渗灌高于沟灌,沟灌高于滴灌,在 30—60 cm 土层,不同灌溉处理土壤有机质含量及 CEC 差异并不显著。CEC 与有机质含量呈极显著正相关关系。

(2)不同灌溉方式下土壤交换性盐基均呈现表聚的特点,且均以 Ca²⁺ 占绝对优势。土壤交换性盐基以渗灌处理最高。各灌溉处理不同深度土层土壤盐基离子饱和度大小顺序均为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺。Ca²⁺、Mg²⁺ 饱和度在 0—30 cm 土层滴灌最高,30—60 cm 土层渗灌最高。K⁺ 饱和度总体以渗灌为高,沟灌居中,滴灌最低。

(3)不同灌溉方式下土壤 Ca/K、Mg/K 值总体呈现表层较低,随土层加深逐渐升高的趋势;Ca/Mg 值的剖面分布变化不大。土壤 Ca/K、Mg/K 值总体以滴灌最高,沟灌次之、渗灌较小;土壤 Ca/Mg 值各灌溉处理间相差不大。

灌溉方式不同,灌水数量及土壤水分运动规律均有不同,致使土壤有机质含量、交换性盐基离子剖面分布各异,对土壤 CEC、盐基离子饱和度及其比例也产生较大影响。渗灌有利于设施土壤有机质的积累,具有较高的交换性盐基离子含量及其离子饱和度;滴灌更有利于保持养分之间的平衡。

参考文献:

[1] 曾希柏,白玲玉,苏世鸣,等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1853-1859.

[2] 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[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 78-81.

[3] 唐海滨,廖超英,孙长忠. 山东寿光蔬菜大棚土壤养分的时空变化特征[J]. 西北农业学报, 2011, 20(4): 134-137.

[4] 范庆锋,虞娜,张玉玲,等. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1132-1137.

[5] 刘秀梅,王录,王华田,等. 磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 266-271.

[6] 胡宁,娄翼来,张晓珂,等. 保护性耕作对土壤交换性盐基组成的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1492-1496.

[7] 张学科,李惠霞. 不同灌溉方式下温室番茄水分利用率及经济效益研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 97-100.

[8] 姬景红,张玉龙. 长期不同灌溉对保护地土壤供氮能力的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 867-871.

[9] 张西超,邹洪涛,张玉龙,等. 灌溉方法对设施土壤理化性质及番茄生长状况影响的研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 1-6.

[10] 黄绍文,高伟,唐继伟,等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965-977.

[11] 吕福堂,司东霞. 日光温室土壤盐分积累及离子组成变化的研究[J]. 土壤, 2004, 36(2): 208-210.

[12] Chen Q, Zhang X S, Zhang H Y, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69(1): 51-58.

[13] 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.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 4.

[15] 李爽,张玉龙,范庆锋,等. 不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 909-915.

[16] 廖凯华,徐绍辉,程桂福,等. 土壤 CEC 的影响因子及 Cokriging 空间插值分析: 以青岛市大沽河流域为例[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 26-32.

[17] 陈红霞,杜章留,郭伟,等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.

[18] 李子川,庄舜尧,桂仁意,等. 不同集约栽培年限下雷竹林土壤化学性质与生理毒性铝的分布[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 837-844.

[19] 刘世全,蒲玉琳,张世熔,等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 1-5.

[20] 陈竹君,王益权,周建斌,等. 日光温室栽培对土壤养分累积及交换性养分含量和比例的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 5-8.