

范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的积累特征及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2281–2286.

FAN Qing-feng, ZHANG Yu-long, ZHANG Yu-ling, et al. Soil nitrate accumulation and its environmental effects under various irrigation modes in protected field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2281–2286.

不同灌溉方式下设施土壤硝态氮的 积累特征及其环境影响

范庆锋, 张玉龙*, 张玉玲, 虞娜

(沈阳农业大学土地与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866)

摘要:以不同灌溉方式下设施土壤及番茄为研究对象, 采用田间试验与室内分析相结合的方法, 对连年采用沟灌、滴灌和渗灌灌溉方式的设施土壤硝态氮、全盐含量、pH 及番茄果实硝酸盐含量、水分生产效率进行了研究。结果表明: 三种灌溉方式土壤硝态氮、全盐含量均呈现出明显的表聚现象, 0~20 cm 土层范围内, 滴灌处理硝态氮含量和全盐含量明显低于沟灌和渗灌处理; 不同灌溉方式土壤的 pH 值均随着土层加深而升高, 在 0~30 cm 土层范围, 土壤 pH 值滴灌高于沟灌, 沟灌高于渗灌。沟灌和渗灌番茄果实硝酸盐含量显著高于滴灌, 沟灌和渗灌番茄果实硝酸盐含量差异不显著; 渗灌和滴灌水分生产效率明显高于沟灌。土壤硝态氮含量与土壤 pH 值呈极显著负相关, 与全盐含量呈极显著正相关。总之, 设施土壤硝态氮积累与土壤全盐含量、pH 值、番茄果实硝酸盐含量关系密切; 与沟灌和渗灌相比, 滴灌更有利于抑制土壤退化。

关键词:设施土壤; 灌溉方式; 硝态氮积累; 土壤 pH

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)11-2281-06 doi:10.11654/jaes.2017-0717

Soil nitrate accumulation and its environmental effects under various irrigation modes in protected field

FAN Qing-feng, ZHANG Yu-long*, ZHANG Yu-ling, YU Na

(College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

Abstract: Field experiments were conducted to investigate the effects of drip irrigation, subsurface irrigation, and furrow irrigation on the accumulation of nitrate and soluble salts in the soil, on soil pH, and on nitrate content and water production efficiency in fruit in a protected field. Nitrate and total salt mainly accumulated in the surface layer of the soil. There was significantly less nitrate and total salt in the uppermost 0~20 cm of the soil after drip irrigation than after furrow or subsurface irrigation. The soil pH increased with increasing soil depth with all three irrigation methods. The soil pH of the uppermost 0~30 cm of soil followed the order: drip irrigation > furrow irrigation > subsurface irrigation. The nitrate content of the fruit under drip irrigation was significantly lower than that under furrow or subsurface irrigation. There was no significant difference between furrow irrigation and subsurface irrigation in terms of nitrate content. Water production efficiency under drip irrigation and subsurface irrigation was significantly higher than that under furrow irrigation. There was a significantly negative correlation between soil nitrate content and pH, whereas there was a positive correlation between soil nitrate content and soluble salt content. In conclusion, the accumulation of nitrate in protected fields is closely related to the content of soluble salt, soil pH, and the nitrate content of fruit. Compared with furrow and subsurface irrigation, drip irrigation inhibits soil degradation.

Keywords: protected field soil; irrigation mode; nitrate accumulation; soil pH

收稿日期: 2017-05-17 录用日期: 2017-07-13

作者简介: 范庆锋(1980—), 男, 辽宁抚顺人, 讲师, 主要从事土壤改良与环境保护研究。E-mail: fanqingfeng1@163.com

* 通信作者: 张玉龙 E-mail: ylsau@163.com

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

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501306); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD23B01); The Natural Science Foundation of Liaoning Province, China(2014027013); The Foundation of Liaoning Education Department, China(L2015474)

设施蔬菜栽培,亦称保护地蔬菜栽培,由于土地利用率高、易提高作物的产量,经济效益显著,近年来在我国北方地区发展十分迅速。设施蔬菜栽培的显著特点是高投入、高产,由于生产过程中复种指数高、肥料施用量大、灌水不合理、加之长期处于缺少雨水淋洗、高温、高湿等特殊条件下,致使蔬菜栽培设施土壤大都出现酸化、次生盐渍化、硝酸盐积聚等退化问题^[1-6]。这些问题造成蔬菜产量、品质的严重下降、在地下水水位较高地区还会造成地下水污染,且随着设施利用年限增长、土壤退化问题愈趋严重,最终将导致土地资源的不可利用^[7]。土壤硝酸盐积聚是设施土壤退化的重要表现形式和主要特征之一。近年来大量研究与生产实践都证明,长期蔬菜栽培往往导致设施土壤硝酸盐积聚,而不合理的灌溉措施又会加剧土壤硝酸盐积聚进程^[8-9]。设施土壤硝酸盐积聚,在设施蔬菜栽培大量灌水之下很容易发生淋失,不仅造成地表水、地下水污染及土壤质量下降,同时易导致蔬菜、果实硝酸盐含量升高、品质下降等问题,给人类健康带来直接或潜在的威胁^[10-11]。土壤硝酸盐积聚作为设施生产的主要土壤障碍因素,不仅影响当前,还会随着设施利用的时间延长而加剧、后效长远。

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^[12-14]。目前设施多种灌溉方式得以发展,而不同的灌溉方式下灌水量和水分运动规律均有不同,其对土壤硝酸盐分布与迁移的影响尚缺乏针对性的研究,灌溉方式还处在盲目的应用阶段。因此,本文通过研究不同灌溉方式下设施土壤硝酸盐的分布及积累特征,探讨土壤硝酸盐累积与盐化、酸化、番茄果实硝酸盐含量之间的关系,从抑制土壤、番茄果实中硝酸盐含量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 材料和方法

1.1 供试材料

试验在沈阳农业大学长期定位设施灌溉试验基地进行,年平均降雨量为 650~850 mm,蒸发量为 850 mm 左右。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,留三穗果打顶,每

穗留 4 个果实,栽培行、株距分别为 50 cm 和 30 cm。供试土壤为棕壤,定位试验开始前(距取样 13 年前)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

Table 1 Physical and chemical properties of experimental soil

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
22.70	6.80	1.30	96.91	1.86	103.10	17.60	164.00

1.2 实验设计

试验设沟灌、滴灌、渗灌 3 个处理,3 次重复,共 9 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交互渗入。滴灌方式采用普通的市售滴灌带,直径 20 mm,两出水孔间距 30 cm,将其平铺于地表,出水孔位置与作物根部相对应;渗灌方式采用内径 16 mm、外径 20 mm 的微孔渗灌管,将其埋于土层深度 30 cm 处,位置与作物行垂直对应;沟灌方式以垄沟为灌水沟,按常规方法灌水。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分别设为 6 kPa 和 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,到土壤水吸力 6 kPa 时灌水结束)。由于三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、滴灌和渗灌三种灌水方法的湿润比分别设定为 1.00、0.50 和 0.33。由事先采集土样测得的土壤持水特征曲线方程:

$$\text{土壤体积含水}(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) = 0.521 \cdot 2[1 + (6.382 \cdot 4^* \text{土壤水吸力}(\text{kPa}))^{11.5005}]^{-0.0094}$$

算出灌溉控制上限和下限土壤水吸力对应的土壤含水量。当早 8:00 土层深度 20 cm 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。

三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·hm⁻² 作为底肥,番茄定植时施用磷酸二铵 0.6 t·hm⁻²、硫酸钾 0.4 t·hm⁻²、尿素 0.15 t·hm⁻² 作为基肥,每年在番茄第一穗果、第二穗果膨大期追肥二次,每次追施尿素 0.15 t·hm⁻²。

1.3 测定项目及方法

开始水分处理后,每天上午 8:00 观测并记录土壤水分张力计读数,记录不同灌溉方式的灌水日期、灌水量。果实成熟后,适时采摘不同处理红熟度相同

的番茄果实用水杨酸比色法测定其硝酸盐含量,并分别记录果实产量。供试土样于灌水处理结束后在 8 月初采集,至采样时试验已经连续进行 13 年。每小区按“S”型布设 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。土壤硝态氮用 AA3 连续流动分析仪测定,土壤酸碱度(pH)采用电位法(水土比为 2.5:1)测定,土壤全盐用去离子水(水土比为 5:1)浸提、烘干法测定。

所有数据采用 Excel2007 和 SPSS17.0 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硝态氮含量的影响

土壤中的硝态氮是一种速效性氮素,可以被作物根系直接吸收,由于其带负电,不易被土壤胶体吸附,可以随水移动^[5]。灌溉方式不同,灌水频率、灌水量及水的运移方式均有所不同,因此灌溉方式的不同,必然会对硝态氮的运移及分布产生影响。沟灌、滴灌、渗灌三种灌溉方式土壤硝态氮含量剖面变化测定结果列于表 2。由表 2 可以看出,土壤硝态氮含量的变化范围为 0.021~2.091 g·kg⁻¹,其中:沟灌处理硝态氮含量 0.041~2.091 g·kg⁻¹,滴灌处理硝态氮含量 0.021~0.973 g·kg⁻¹,渗灌处理硝态氮含量 0.035~2.080 g·kg⁻¹。各灌溉处理硝态氮含量均呈现出明显的表聚趋势,表层土壤硝态氮积累明显,其含量随土层深度增加而逐渐降低,0~40 cm 土层范围内,土壤硝态氮含量随土层深度增加而降低迅速,40 cm 以下土壤硝态氮含量随土层深度增加降低缓慢。不同灌溉方式间比较,不同土层土壤硝态氮含量排列顺序均为沟灌>渗灌>滴灌。0~10 cm 土层沟灌和渗灌两处理硝态氮含量与滴灌处理差异达 5%显著水平;10~20 cm 土层不同处理

之间硝态氮含量差异均达 5%显著水平;20~30 cm 土层沟灌和滴灌处理硝态氮含量差异达 5%显著水平;30 cm 以下土层各处理间硝态氮含量差异不明显。

2.2 灌溉方式对设施土壤酸度的影响

酸碱性是土壤的基本特性,也是影响土壤肥力的重要因素之一,它对土壤中养分的存在形态及有效性,对土壤中微生物的活动以及对作物生长发育都有巨大的影响^[6]。土壤过酸性或过碱性,都会不同程度地降低土壤养分的有效性。表 3 是不同灌溉方式下的各土层的土壤 pH 值。从表 3 可知,0~60 cm 土层土壤 pH 值的变化范围:沟灌为 5.80~6.80;滴灌为 6.10~6.83;渗灌为 5.76~6.84。三种灌溉方式处理土壤 pH 的剖面变化特征相似,均是表层土壤的 pH 值最低,随着土层的加深土壤 pH 值逐渐升高,到 50~60 cm 土层,土壤 pH 值与试验开始前的土壤 pH 值十分接近。不同灌溉方式间土壤 pH 值亦表现出一定的差异,在 0~30 cm 土层范围内,pH 值均表现出滴灌处理土壤高于沟灌处理,沟灌处理高于渗灌处理的趋势。0~20 cm 土层,滴灌处理土壤 pH 明显高于沟灌和渗灌处理,滴灌与沟灌、渗灌处理间差异均达到 1%显著性水平,而渗灌与沟灌处理相比,差异不显著;20~30 cm 土层,滴灌与渗灌处理间 pH 差异达到 1%显著性水平,而滴灌与沟灌处理相比,pH 差异不显著,渗灌与沟灌处理相比,pH 差异亦不显著;30~60 cm 土层,不同处理之间 pH 差异均不显著。

2.3 灌溉方式对设施土壤全盐的影响

大量研究指出,设施土壤种植蔬菜多年后都会出现不同程度的积盐现象,而不合理的施肥、灌溉、耕作等措施则会加快土壤盐渍化进程^[7]。这是由于不同灌溉方式的单次灌水量、水分运移方向、速率不同,水分湿润土壤的部位及体积也不同,必然会对可溶性盐分产生不同程度的影响^[8]。图 1 为不同灌溉方式处理土壤全盐含量剖面分布测定结果。由图 1 可见,沟灌、滴灌和渗灌 3 种灌溉方式下土壤全盐含量剖面分布均

表 2 不同灌溉方式下各土层的硝态氮含量(g·kg⁻¹)

Table 2 Distribution of nitrate nitrogen in the soil profile under different irrigation modes(g·kg⁻¹)

土层/cm	沟灌	滴灌	渗灌
0~10	2.091Aa	0.973Ba	2.080Aa
10~20	0.580Ab	0.190Cb	0.405Bb
20~30	0.134Ac	0.085Bc	0.102ABc
30~40	0.084Ad	0.054Acd	0.043Ad
40~50	0.042Ae	0.024Ad	0.035Ad
50~60	0.041Ae	0.021Ad	0.035Ad

注:同列不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示不同处理同一土层间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 3 不同灌溉方式下各土层的土壤 pH 值

Table 3 Soil pH in the soil profile under different irrigation modes

土层/cm	沟灌	滴灌	渗灌
0~10	5.80Bd	6.10Ac	5.76Bd
10~20	6.16c	6.32Ab	6.05Bc
20~30	6.52ABb	6.65Aab	6.49BCb
30~40	6.62Aab	6.75Aa	6.73Aa
40~50	6.78Aa	6.81Aa	6.85Aa
50~60	6.80Aa	6.83Aa	6.84Aa

呈现明显的表聚现象,随着连年施肥,设施土壤 0~10 cm 土层随着土层加深而急剧降低,到 40~60 cm 又表现出轻微增加趋势。比较不同灌溉方式间土壤全盐含量剖面分布情况可以看出,滴灌处理的各个土层全盐含量均低于沟灌和渗灌处理,且在 0~20 cm 土层与沟灌和渗灌处理差异达 1% 极显著水平。而沟灌和渗灌处理比较,在各个土层沟灌全盐含量均高于渗灌,但差异不显著。

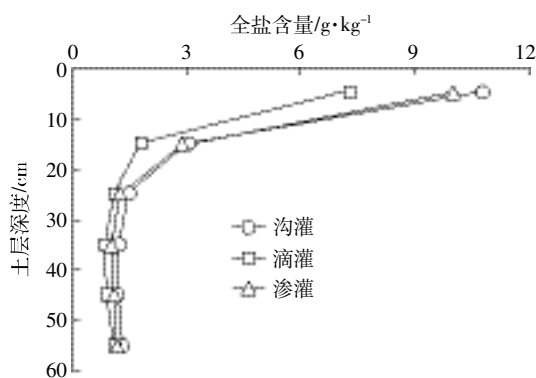


图1 土壤全盐含量剖面分布

Figure 1 Distribution of total salt content in the soil profile

2.4 灌溉方式对设施番茄果实硝酸盐含量的影响

硝酸盐含量的高低是影响蔬菜品质的一个重要指标。前人研究表明,蔬菜硝酸盐含量与土壤中氮素含量、形态,灌水量密切相关^[2,10]。图2为不同灌溉方式处理番茄果实硝酸盐含量的测定结果。不同灌溉方式处理中,沟灌处理番茄果实中的硝酸盐含量最高,为 145.60 mg·kg⁻¹,其次为渗灌的 136.40 mg·kg⁻¹,滴灌处理最低,为 115.29 mg·kg⁻¹。沟灌和渗灌处理番茄果实硝酸盐含量显著高于滴灌处理,沟灌和渗灌处理番茄果实硝酸盐含量差异不显著。

2.5 灌溉方式对设施番茄产量及水分生产效率的影响

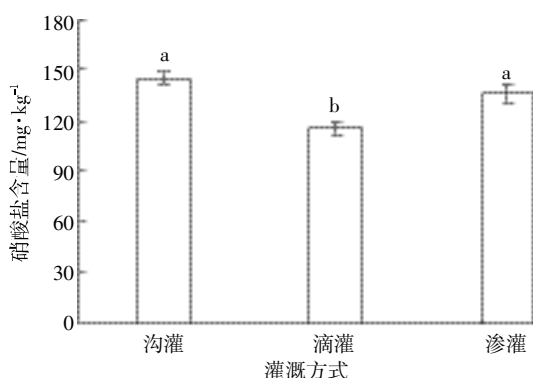


图2 不同灌溉方式番茄果实硝酸盐含量

Figure 2 Effect of irrigation mode on nitrate content in tomato

为了对设施栽培番茄不同灌溉方式的节水效果进行评价,对沟灌、滴灌及渗灌处理的灌水次数、单次灌水量、番茄产量、全生育期灌水量进行统计分析,结果如表4所示。从表4可以看出,在设施番茄的整个生长时期,单次灌水量和总灌水量均是沟灌>滴灌>渗灌,且沟灌的单次灌水量和总灌水量明显高于渗灌和滴灌处理。不同处理番茄产量大小顺序为滴灌>渗灌>沟灌,而水分生产效率是渗灌和滴灌处理明显高于沟灌,渗灌和滴灌相差不大。由此可见,滴灌和渗灌在节约灌溉用水的前提下,也能获得较高的产量。

表4 不同灌溉方式处理设施番茄产量及水分生产效率

Table 4 Tomato yield and water production efficiency of different irrigation modes

处理	灌水次数/ 次	单次灌水量/ m ³ ·hm ⁻²	灌水总量/ m ³ ·hm ⁻²	产量/ kg·hm ⁻²	水分生产效率/ kg·m ⁻³
沟灌	11	168.37	1 515.33	75 264.2	49.668 52
滴灌	14	84.19	1 178.66	77 368.5	65.641 07
渗灌	21	55.56	1 166.76	76 325.7	65.319 59

3 讨论

硝态氮在土壤中不易被土壤胶体所吸附,容易随水迁移^[15]。三种灌溉方式处理土壤剖面硝态氮含量的差异无疑与单次灌水数量及灌水时及灌水后土体内水分运动方向及土壤水分的消耗数量与方式有关。沟灌处理单次灌水量最大,灌水后水分可向下运动至较深土层;由于沟灌土壤水分含量较高,地表水分蒸发也最为强烈,底层大量的硝态氮可随水运移聚集在表层,而下一次灌水时又有可能被水分携带向下运动。因此,沟灌处理土壤的硝态氮含量剖面分布,不仅表层明显累积且通体含量也较高。渗灌属于地下灌溉,在渗灌管以上土壤水分以向上运动为主,致使硝态氮随水分不断向表层移动、累积,从而表现为表层硝态氮累积趋势严重。滴灌时局部土壤湿润,灌水量适中,地表水分蒸发强度和水分运移速率都低于沟灌,且积累于表层土壤的硝态氮在下一次灌水时还会受到水分的淋洗而向下移动,因而硝态氮表聚程度低、累积较少。

一般来说,在土壤硝态氮含量较高的情况下,叶菜类蔬菜容易出现硝酸盐积累超过卫生安全标准的问题,而茄果类蔬菜不易累积硝态氮^[9]。从本试验可以看出,土壤硝态氮含量较高时亦可引起茄果类蔬菜果实中硝酸盐的大量累积,且果实中硝酸盐含量随土壤

硝态氮含量的增加而增加。土壤中硝态氮的过量积累不仅会增加蔬菜体内的硝酸盐含量、加深对地下水污染的风险,且会大为加速设施菜地的次生盐渍化与酸化进程。对各灌溉处理不同土层土壤硝态氮含量与pH之间关系的相关分析结果表明,各灌溉处理不同土层土壤硝态氮含量与pH、盐含量之间呈极显著对数负相关关系:

$$\text{pH} = -0.243 \ln[\text{硝酸盐含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})] + 5.9839 (r = -0.983^{**}, n = 18, r_{0.01} = 0.590)$$

土壤pH随着硝态氮含量的增加而降低。对各灌溉处理不同土层土壤硝态氮含量与全盐含量之间关系的相关分析结果表明,各灌溉处理不同土层土壤硝态氮含量与全盐含量之间呈极显著线性正相关关系:

$$\text{全盐含量} = 4.7163(\text{硝酸盐含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})) + 0.8736 (r = -0.986^{**}, n = 18, r_{0.01} = 0.590)$$

土壤全盐含量随着硝态氮含量的增加而增加。

pH值降低是设施菜地土壤次生盐渍化的一般特征,土壤硝态氮积累则是导致土壤酸化和次生盐渍化的根本原因,因为设施菜地施肥量大且往往偏重施用氮肥,加上设施内土壤硝化作用强烈,所以极易产生大量的 H^+ 和 NO_3^- 。灌水方式会对 NO_3^- 等离子的运移和积累产生直接影响、进而影响土壤盐渍化、酸化进程。从防治设施菜地土壤硝态氮积累、蔬菜硝酸盐含量过高,土壤盐渍化、酸化、节约用水等方面对三种不同灌溉方式进行评价,以滴灌效果最好,显然这与灌溉方式的单次灌水量及灌水后土壤水分剖面分布有关。

4 结论

(1)沟灌、滴灌和渗灌处理土壤硝态氮、全盐含量均呈现出明显的表聚现象,随着土层加深而降低;0~20 cm土层范围内,滴灌处理硝态氮含量和全盐含量明显低于沟灌和渗灌处理。不同灌溉方式表层土壤的pH值最低,随着土壤层次的不断加深土壤的pH值逐渐升高。在0~30 cm土层,pH值均表现出滴灌土壤高于沟灌,沟灌高于渗灌土壤的趋势。

(2)沟灌和渗灌处理番茄果实硝酸盐含量显著高于滴灌处理,沟灌和渗灌处理番茄果实硝酸盐含量差异不显著。不同灌溉方式番茄产量大小顺序为滴灌>渗灌>沟灌,而水分生产效率是渗灌和滴灌处理明显高于沟灌,渗灌和滴灌相差不大。

(3)相关分析结果表明,土壤硝酸盐含量与pH值呈极显著负相关关系,与全盐含量呈极显著正相关

关系,说明设施菜地土壤的酸化和次生盐渍化是硝态氮不断积累的结果。

灌溉方式不同,灌水数量及土壤水分运动规律均有不同,致使土壤硝态氮剖面分布各异,对土壤pH、全盐含量、番茄果实硝酸盐含量也产生较大影响。从节约用水,防治土壤盐渍化、土壤酸化及蔬菜硝酸盐积累的角度综合评价,有条件的地方应优先选择滴灌灌水方式灌溉设施菜地,既节约用水,又可以防止设施菜地土壤退化,从而实现土地的可持续利用。

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.
ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, SU Shi-ming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1853-1859.
- [2] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2338-2345.
JIANG Hui-min, ZHANG Jian-feng, YANG Jun-cheng, et al. Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO_3^- -N accumulation in vegetable-greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2338-2345.
- [3] 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[J]. 土壤学报, 2009, 49(5): 466-471.
FAN Qing-feng, ZHANG Yu-long, CHEN Zhong, et al. Acidity characteristics and acidification mechanism of soils in protected fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 49(5): 466-471.
- [4] 郭颖, 赵牧秋, 吴蕊, 等. 有机肥对设施菜地土壤-植物系统硝酸盐迁移累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1831-1835.
GUO Ying, ZHAO Mu-qiu, WU Rui, et al. Effects of organic manure on nitrate accumulation in soil-cucumber system under protected cultivation condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1831-1835.
- [5] 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.
TANG Hai-bin, LIAO Chao-ying, SUN Chang-zhong. Spatio-temporal characteristics of soil nutrients in the vegetable greenhouse in Shouguang of Shandong Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(4): 134-137.
- [6] 李文庆, 张民, 李海峰, 等. 大棚土壤硝酸盐状况研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 283-287.
LI Wen-qing, ZHANG Min, LI Hai-feng, et al. The study of soil nitrate status in fields under plastic house gardening[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 283-287.
- [7] Bouwman A F. Soil and greenhouse effect[M]. Chichester: John Wiley, Sons Brady N C. The Nature and Properties of Soils, 11st Ed. New York: Macmillan Publishing Co, 1990: 343-355.

- [8] 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[J]. 土壤, 2008, 40(5): 828-832.
YU Na, ZHANG Yu-long, HUANG Yi, et al. Micro-scale spatial variability of surface soil pH under different irrigation methods in greenhouse[J]. *Soils*, 2008, 40(5): 828-832.
- [9] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 日光温室蔬菜地土壤主要养分含量及其累积特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 129-134.
GU Qiao-zhen, YANG Xue-yun, SUN Ben-hua, et al. Analyses of main nutrients' concentration and its accumulation characteristics in vegetable greenhouse soils[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2008, 36(3): 129-134.
- [10] 汤丽玲, 陈清, 张宏彦, 等. 不同水氮处理对菠菜硝酸盐累积和主体硝态氮淋洗的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 326-328.
TANG Li-ling, CHEN Qing, ZHANG Hong-yan, et al. Effect of different water and nitrogen supply on accumulation nitrate in spinach and NO_3^- -N leaching in soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5): 326-328.
- [11] 于红梅, 李子忠, 龚元石. 不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1849-1855.
YU Hong-mei, LI Zi-zhong, GONG Yuan-shi. Leached nitrate in vegetable field under different water and nitrogen fertilizer management practices[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1849-1855.
- [12] 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): 96-100.
ZHANG Xue-ke, LI Hui-xia. Water use efficiency and economic benefits of tomato under different irrigation method in greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(7): 96-100.
- [13] 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.
JI Jing-hong, ZHANG Yu-long. Effect of different irrigation methods on nitrogen supplying capacity in protected field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 867-871.
- [14] 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.
ZHANG Xi-chao, ZOU Hong-tao, ZHANG Yu-long, et al. Effects of irrigation methods on physical and chemical properties and tomato growth of fields soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 1-6.
- [15] 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 67-72.
WEI Yan, SUN Li-ping, WANG Shu-zhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 67-72.
- [16] 曾路生, 高岩, 李俊良, 等. 寿光大棚菜地酸化与土壤养分变化关系研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 157-161.
ZENG Lu-Sheng, GAO Yan, LI Jun-Liang, et al. Changes of acidification and nutrient accumulation in greenhouse vegetable soils in Shouguang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 157-161.
- [17] 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.
FENG Yong-jun, CHEN Wei-feng, ZHANG Lei-na, et al. Soil salinization and countermeasures in protected horticulture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(2): 111-114.
- [18] 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.
LI Shuang, ZHANG Yu-long, FAN Qing-feng, et al. Effect of irrigation mode on soil acidification in protected field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 909-915.
- [19] 毕晓庆, 山楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2246-2250.
BI Xiao-qing, SHAN Nan, DU Lian-feng, et al. Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2246-2250.