

灌水下限对设施土壤酸度特征的影响^①

李博雯, 陈飞, 谭婷婷, 陈家宏, 范庆锋, 张玉玲, 邹洪涛, 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研究中心/农业农村部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

摘要: 基于连续 11 年不同灌水下限(W_1 : 25 kPa; W_2 : 35 kPa; W_3 : 45 kPa; W_4 : 55 kPa)的设施土壤田间长期定位试验, 以番茄为供试作物, 测定了 0~50 cm 各土层土壤 pH、交换性酸含量、酸碱缓冲容量(pHBC)等指标, 探究了灌水下限对设施土壤酸度特征的影响。结果表明: W_1 和 W_4 处理土壤 pH 随土层深度的增加呈先降低后升高的趋势, W_2 和 W_3 处理土壤 pH 随土层深度的增加逐渐升高, W_2 和 W_3 处理各土层土壤 pH 均显著高于 W_1 和 W_4 处理。各处理土壤酸碱缓冲曲线均为表层变化小于底层, 且各处理土壤的 pHBC 均随土层深度的增加而降低, W_2 处理的 pHBC 相较其他处理提高 7.76%~92.87%。各处理土壤交换性酸总量整体随土层深度的增加而降低, 且交换性 H^+ 含量远高于交换性 Al^{3+} , 是交换性酸的主要成分。同一土层, W_2 和 W_3 处理的土壤交换性酸总量、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 含量均显著低于 W_1 和 W_4 处理。此外, W_2 处理提高了土壤交换性盐基总量和 HCO_3^- 含量, 增强了土壤酸缓冲性能。相关分析进一步表明, 交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 含量均与交换性酸总量呈极显著正相关关系, 但随交换性酸总量的增加两者的变化趋势不同。交换性 H^+ 含量的增长速率随交换性酸总量增加逐渐变小, 交换性 Al^{3+} 含量的增加趋势则相反。不同灌水下限土壤 pH 均与交换性酸含量呈显著负相关关系, 以 W_2 处理土壤 pH 降低幅度最小。因此, 综合考虑土壤缓冲性能、pH 与交换性酸的变化关系, 灌水下限 35 kPa 处理为设施土壤最适宜的水分管理措施。

关键词: 设施土壤; 土壤酸化; 灌水下限; 活性酸; 交换性酸; 土壤酸碱缓冲容量

中图分类号: S626; S156.99 **文献标志码:** A

Effects of Different Irrigation Lower Limits on Soil Acidity Characteristics in Greenhouse

LI Bowen, CHEN Fei, TAN Tingting, CHEN Jiahong, FAN Qingfeng, ZHANG Yuling, ZOU Hongtao, YU Na*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China)

Abstract: Based on a long-term field experiment of greenhouse soil conducted for 11 consecutive years under different irrigation lower limits (W_1 : 25 kPa, W_2 : 35 kPa, W_3 : 45 kPa, and W_4 : 55 kPa), tomato was used as the test crop, and soil pH, exchangeable acidity, soil pH buffering capacity (pHBC), and other soil indicators of 0–50 cm soil layers were measured to investigate the effects of lower irrigation lower limits on the acidity characteristics of greenhouse soils. The results showed that pH of W_1 and W_4 showed a trend of initially decreasing and then increasing with the increase of soil depth, while pH of W_2 and W_3 gradually increased. Soil pH of each soil layer in W_2 and W_3 was significantly higher than that in W_1 and W_4 . Soil pH buffering curves of each treatment showed that the surface changes were smaller than those of the deeper layers, and soil pHBC of each treatment showed a decreasing trend with the increase of soil depth. pHBC of W_2 increased by 7.76%–92.87% compared with other treatments. Soil exchangeable acidity showed a general decreasing trend with the increase of soil depth for all treatments, and the content of exchangeable H^+ was much higher than that of exchangeable Al^{3+} , being the main the dominant exchangeable acid component. Soil exchangeable acidity, soil exchangeable H^+ and Al^{3+} contents under W_2 and W_3 were significantly lower than those in W_1 and W_4 in the same soil layers. In addition, W_2 increased the total exchangeable base cations and HCO_3^- content, enhancing the acid buffering performance. Correlation analysis further showed that both exchangeable H^+ and Al^{3+} were significantly positively correlated with exchangeable acidity, but their changing trends were different. The growth rate of H^+

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41401322)和辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200018)资助。

* 通信作者(sausoilyn@syau.edu.cn)

作者简介: 李博雯(1999—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事设施土壤改良研究。E-mail: bowenli1999@126.com

content gradually decreased with the increase of exchangeable acidity, while the increase trend of Al^{3+} was the opposite. There was a significant negative correlation between soil pH and exchangeable acid content under different irrigation lower limits, with W_2 showing the smallest decrease in pH. Therefore, comprehensive consideration of soil buffering capacity, the relationship between pH and exchangeable acidity, irrigation lower limit of 35 kPa is the most suitable water management practice for greenhouse soils.

Key words: Greenhouse soil; Soil acidification; Irrigation lower limit; Active acid; Exchangeable acid; Soil pH buffering capacity

随着设施农业的迅速发展,粗放的水肥管理加之设施内特定的温湿条件,日益加剧的土壤退化问题已经严重制约了设施蔬菜的可持续发展^[1]。土壤酸化是设施土壤退化的主要表现形式之一,不仅直接危害作物根系的生长发育,还影响土壤养分平衡和土壤微生物区系,进而间接影响作物生长,导致作物减产^[2-3]。

大量施肥,尤其是施用氮肥导致土壤酸化已成为共识^[4]。目前对设施土壤酸化的研究主要集中在化肥单施及有机无机配施等施肥措施方面,结果表明,有机无机配施有效减缓了设施土壤酸化进程^[1]。除施肥外,灌溉作为设施土壤水分的主要来源,直接影响土壤中养分和致酸离子等的迁移转化过程,是导致设施土壤酸化的重要原因^[5]。过量灌溉不但会导致表层土壤酸化,还会因氮素淋洗引起养分累积进而产生底土酸化^[6]。不同灌溉方式对设施土壤酸化影响的研究表明,沟灌、滴灌和渗灌处理的土壤活性酸、交换性酸含量均为表层土壤大于底层土壤,并表现为沟灌<渗灌<滴灌^[7],且在长期条件下,滴灌比沟灌和渗灌更有利于防止土壤盐分累积与酸化^[8]。

灌水下限是灌溉的起点,是灌水定额、时间和次数的综合体现^[9-10]。探明不同灌水下限对设施栽培土壤灌溉与酸碱缓冲性能等酸度特征关系的影响,对减缓土壤酸化进程和保障设施土壤可持续发展具有重要的实践意义。然而,目前关于灌水对设施土壤酸化的研究主要集中在灌溉方式上,不同灌水下限与致酸离子关系的研究鲜有报道。因此,本研究基于连续 11 年不同灌水下限的设施土壤长期定位试验,研究灌水下限对设施土壤酸化的影响,旨在寻求设施土壤适宜的灌水下限,为设施土壤灌溉管理、减缓设施土壤酸化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

灌水下限长期定位试验始于 2012 年,试验地位于沈阳农业大学设施生产试验基地(41°49'N, 123°34'E)。该地区属于温带半湿润大陆性气候。试验每年 4—8 月种植番茄,其余时间为休耕期,相同灌

溉、施肥等管理措施至采样时已持续 11 年。试验地土壤为棕壤,试验开始前表层 0~20 cm 土壤基本理化性质为:有机质含量 10.9 g/kg,全氮含量 1.4 g/kg,碱解氮含量 57.8 mg/kg,有效磷含量 25.2 mg/kg,速效钾含量 90.2 mg/kg, pH 7.1。

根据试验区域水分管理实践和设施番茄水分需求,长期定位试验共设 4 个不同灌水下限处理,对应的土壤水吸力值分别为 25 kPa(W_1)、35 kPa(W_2)、45 kPa(W_3)和 55 kPa(W_4),灌溉上限均为 6.3 kPa(对应土壤田间持水量)。每个处理 4 个重复,小区面积 2.5 m²,各试验小区间用埋深 60 cm 的塑料薄膜隔开,防止小区间水分和养分的运移。

供试作物为番茄,按照当地常规株行距种植并进行田间管理,每株留四穗果。在番茄定植前,各小区施用等量有机肥和化肥,其中膨化鸡粪 26.4 t/hm²和磷肥(P_2O_5)220 kg/hm²作为基肥,氮肥(N)300 kg/hm²和钾肥(K_2O)300 kg/hm²分为 3 次分别在定植前、第一和第二穗果膨大期时等量施入。膨化鸡粪有机肥有机碳含量为 100.9 g/kg,全氮含量 15.6 g/kg。

番茄定植并经过缓苗水处理后,采用滴灌方式进行水分管理。为确定灌溉时间和灌溉量,各小区埋设张力计和 TDR 探头指示土壤水吸力值的变化,灌水下限土壤含水量由土壤吸力值算出,即当 30 cm 深度土层张力计读数达到对应的灌水下限土壤水吸力值时(每日清晨 8:00—8:30),依据观测值,根据土壤水分特征曲线计算土壤体积含水量(公式(1)),再根据土壤体积含水量,计算各小区单次灌水所需水量(公式(2))。

$$\theta = 0.5205[1 + (6382.43h)^{11.501}]^{-0.0094} \quad (r=0.995, P<0.01) \quad (1)$$

式中: h 为土壤水吸力(kPa); θ 为土壤体积含水量(cm³/cm³)。

$$Q = (Q_f - Q_l) \times H \times R \times S \quad (2)$$

式中: Q 是一次灌水水量(m³); Q_f 和 Q_l 分别为灌水上限和下限土壤含水量(m³/m³); H 为计划湿润层厚度(m),本研究 $H=0.3$ m; R 为土壤湿润比,本研究 $R=0.5$; S 为小区面积(m²)。

1.2 样品采集与测定

于2022年番茄收获期分层采集0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm土层土壤样品。每小区按“S”形布设5个采样点采集并混匀,一部分新鲜土样储存于4℃冰箱用于土壤矿质氮含量测定;一部分土样经自然风干、研磨后用于土壤理化性质和酸碱缓冲曲线等项目的测定。

其中,采用pH计(Thermo Orion 3-Star pH, US)(土水质量比1:2.5)测定土壤pH;采用酸碱中和滴定法测定土壤交换性酸总量和交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量^[11];采用AA3自动分析仪(Seal Analytical, USA)测定土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量;采用元素分析仪(Elementar Vario EL III, Germany)测定土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量。土壤 HCO_3^- 含量采用双指示剂中和法测定^[11]。土壤交换性盐基总量(EB)为交换性钾、钠、钙、镁离子之和。采用火焰光度法测定交换性钾、钠离子,采用原子吸收分光光度法测定交换性钙、镁离子^[11]。

土壤酸碱缓冲曲线测定:分别称取各处理各土层的10 g土样于21只玻璃烧杯中,并依次编号,其中在1~10号烧杯中依次加入0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 mL的0.2 mol/L H_2SO_4 ;在12~21号烧杯中依次加入0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0、6.0、6.5 mL的0.1 mol/L NaOH;在11号烧杯中不加酸碱。各烧杯均加入无 CO_2 蒸馏水,使各烧杯总体积达25 mL,室温下间歇振荡72 h后,测定土壤pH。以pH为横坐标,酸碱加入量为纵坐标,建立酸碱缓冲曲线。对酸碱缓冲曲线中pH 4~9段进行线性拟合,斜率即为酸碱缓冲容量(pHBC)。

1.3 数据处理与分析

采用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析和Pearson相关分析,LSD法进行差异显著性检验。采用Origin 9.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水下限对设施土壤剖面pH的影响

不同灌水下限土壤剖面pH如图1所示,不同处理土壤pH随土层深度的增加总体表现为增加趋势。与底层土壤(40~50 cm)相比, W_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 处理表层土壤(0~10 cm)的pH分别降低了5.17%、5.52%、2.48%和7.27%,其中 W_4 处理各土层土壤pH变异最大,以30~40 cm土壤pH最高。同一土层不同处理之间土壤pH差异显著($P<0.05$)。总体上, W_4 处理各土层土壤pH均显著低于 W_1 、 W_2 和 W_3 处理。

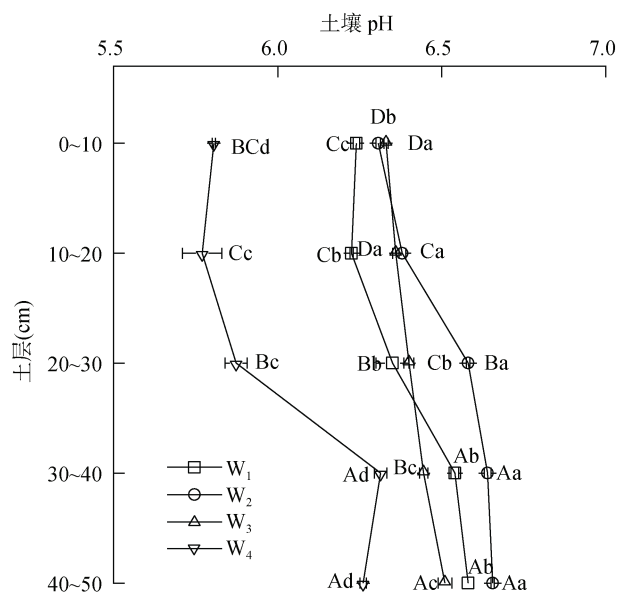


图1 不同灌水下限设施土壤pH
Fig. 1 pH values of greenhouse soils under different irrigation lower limits

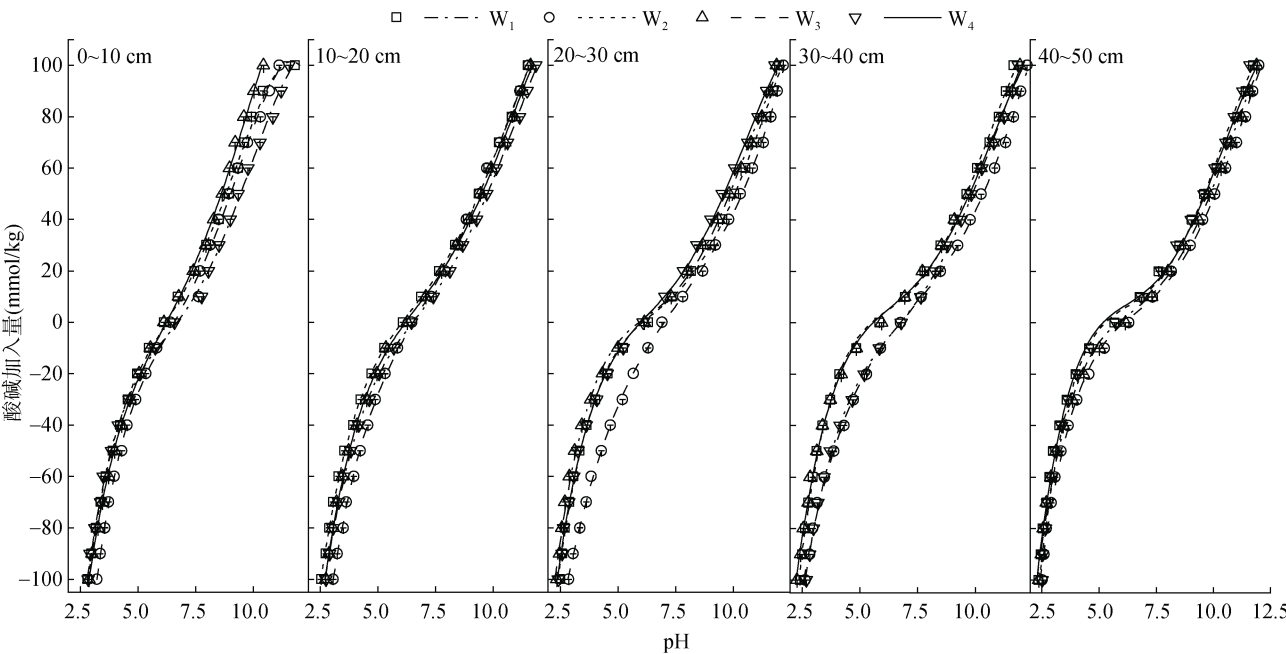
2.2 不同灌水下限对设施土壤酸碱缓冲性能的影响

2.2.1 对设施土壤酸碱缓冲曲线的影响 不同灌水下限设施土壤的酸碱缓冲曲线如图2所示。随着酸碱的加入,各处理各土层土壤pH均呈现先快速变化后逐渐趋于平缓。随土层增加,各处理的pH变化极差表现为在0~10、10~20 cm两个土层 W_2 和 W_3 处理均小于其他处理,而在20~30 cm土层各处理差异较小,在30~40、40~50 cm土层 W_2 和 W_3 处理高于其他处理。整体上, W_2 和 W_3 处理土壤酸碱缓冲曲线最陡。此外,各处理土壤酸碱缓冲曲线的变化总体均为表层小于底层。

2.2.2 对设施土壤pHBC的影响 不同灌水下限设施土壤的pHBC如图3A所示,可见,各处理土壤pHBC总体上表现为随土层深度增加而降低的趋势。同一土层不同灌水下限处理对土壤pHBC影响显著,0~10 cm表现为: $W_3 \approx W_2 > W_1 > W_4$, 10~20、20~30、40~50 cm均表现为 W_2 处理pHBC最大。随土层深度增加,各处理间差异减小。

2.3 不同灌水下限设施土壤交换性酸含量及组成

2.3.1 对设施土壤交换性酸含量及组成的影响 不同灌水下限土壤交换性酸总量及其组分交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 含量如图3B所示。各处理土壤交换性酸总量总体上随土层深度增加而逐渐降低,以 W_1 和 W_4 处理在10~20 cm土层最大。各土层中 W_4 处理的交换性酸总量均显著高于其他3个处理,土壤交换性



(图中纵坐标轴中的正值表示碱加入量，负值表示酸加入量)

图 2 不同灌水下限设施土壤酸碱缓冲曲线

Fig. 2 pH buffer curves of greenhouse soils under different irrigation lower limits

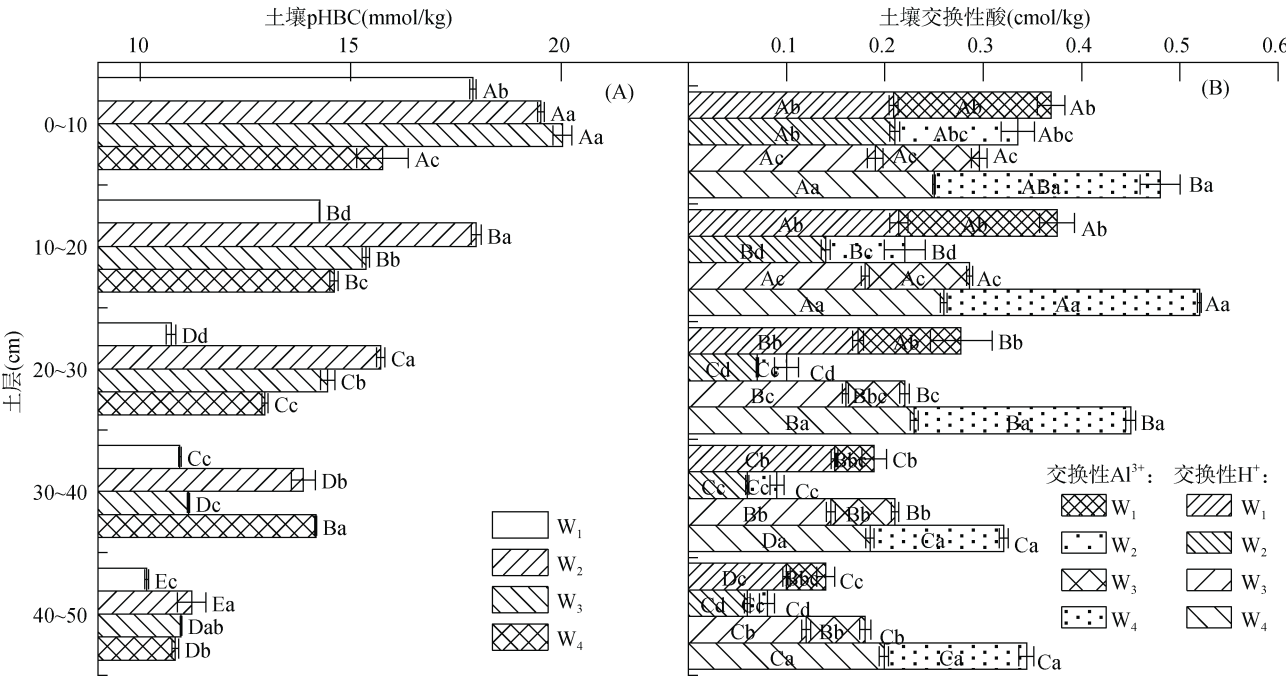


图 3 不同灌水下限设施土壤酸碱缓冲容量(A)和交换性酸含量(B)

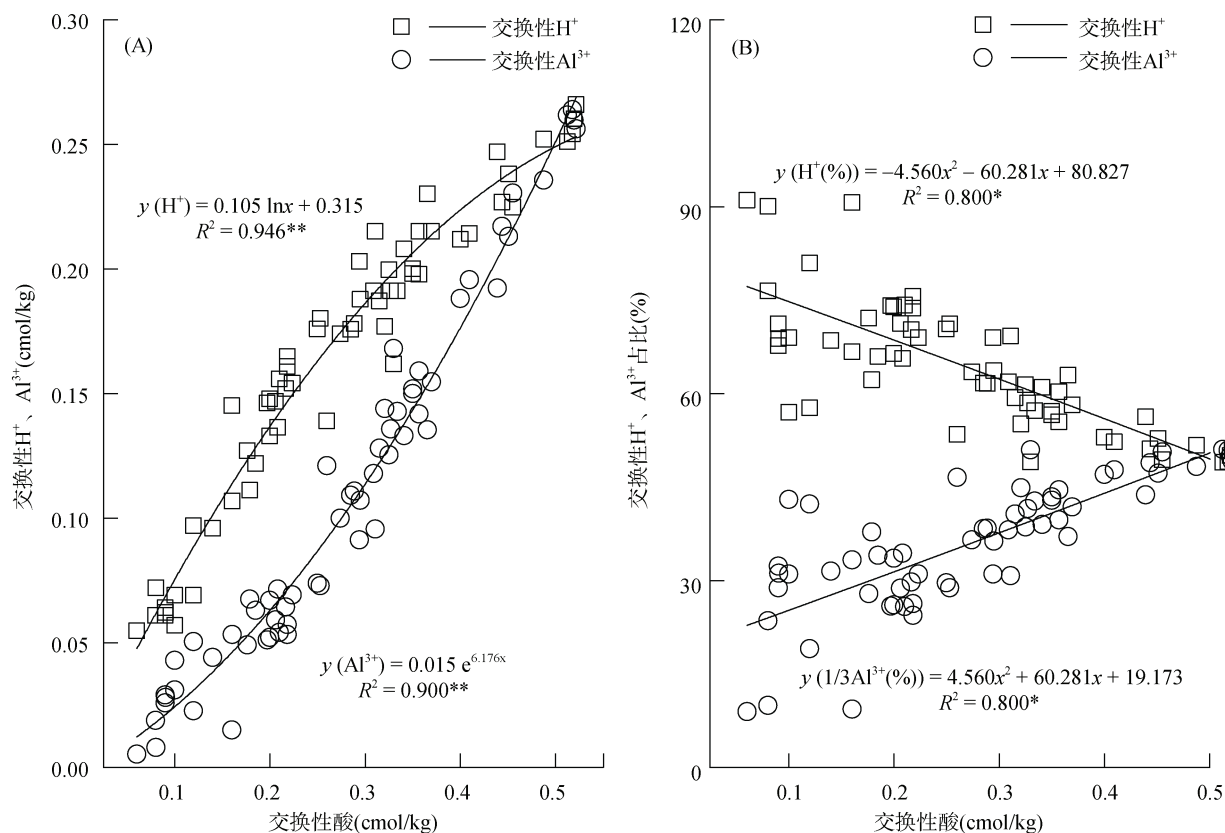
Fig. 3 pHBC (A) and exchangeable acidity (B) of greenhouse soil under different irrigation lower limits

H^+ 和交换性 Al^{3+} 占交换性酸总量比例范围分别为 50.02%~78.80% 和 21.20%~49.98%，即交换性 H^+ 在交换性酸中占主导地位，表现为各处理各土层的交换性 H^+ 与交换性酸总量的分布特征基本一致。各土层中 W_2 处理的交换性 H^+ 含量均显著低于其他处理；各土层交换性 Al^{3+} 含量表现为 W_4 处理显著高于其他处理。

交换性酸总量与交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 含量的关系如图 4A 所示。交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 均与交换性酸总量呈极显著正相关关系($P<0.01$)，但随交换性酸总量的增加两者的变化趋势不同。交换性 H^+ 含量的增长速率随交换性酸总量增加表现为对数增长的变化趋势，而交换性 Al^{3+} 含量随交换性酸总量增

加呈现幂函数增长的变化趋势, 即交换性 H^+ 含量表现为增加趋于平缓, 而交换性 Al^{3+} 含量表现为持续增加趋势。进一步分析交换性 H^+ 、交换性 Al^{3+} 占交换性酸总量的比例与交换性酸总量的关系, 如图 4B

所示, 二者均可以采用一元二次函数模型拟合其与交换性酸总量之间的关系。在研究范围内, 随交换性酸总量增加, 交换性 H^+ 占比表现为降低的趋势, 而交换性 Al^{3+} 占比则表现为增加的趋势。



($n=60$, *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$); 下同)

图4 土壤交换性酸总量与交换性 H^+ 和 Al^{3+} 的关系

Fig. 4 Relationship of total soil exchangeable acid with exchangeable H^+ and Al^{3+}

2.3.2 pH 与交换性酸的关系 图5显示了不同灌水下限处理土壤 pH 与交换性酸总量、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 的线性关系。一元一次模型($y=ax+b$, 其中 x 为交换性酸含量(交换性酸总量、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+}), y 为土壤 pH)可以很好地拟合 pH 和交换性酸总量及其组分的相关关系, 模型拟合优度均达到极显著水平($P<0.01$)。随交换性酸总量、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 含量的增加, 不同灌水下限土壤 pH 均呈下降趋势。不同处理模型斜率 k 绝对值的变化表现为: 对于交换性酸总量和交换性 H^+ , $W_4>W_1>W_3>W_2$; 对于交换性 Al^{3+} , $W_4>W_2>W_1>W_3$ 。

2.4 不同灌水下限对设施土壤 HCO_3^- 和交换性盐基总量的影响

不同灌水下限处理设施土壤 HCO_3^- 含量和交换性盐基总量如图6所示。各处理土壤 HCO_3^- 含量和交换性盐基总量总体上均表现为随土层深度增加而降

低的趋势, 同一土层不同灌水下限对土壤 HCO_3^- 含量和交换性盐基总量的影响均显著。各土层 HCO_3^- 含量均表现为 W_4 处理含量最低。除 0~10 cm 土层 W_3 处理 HCO_3^- 含量最高外, W_2 处理 HCO_3^- 含量在其他土层均最高。除 30~40 cm 土层外, 均表现为 W_2 处理交换性盐基总量最大。

2.5 灌水下限对设施土壤碳、氮含量的影响

不同灌水下限处理设施土壤的全氮和有机碳含量如图7所示。各处理土壤全氮和有机碳含量总体表现出随土层深度增加而降低的趋势, 10~30 cm 土层表现为大幅下降, 表层(0~10 cm)分别是底层(40~50 cm)的 2.57 倍~3.14 倍和 1.98 倍~3.13 倍。灌水下限对土壤全氮含量的影响主要体现在 10~20 cm 土层, 各处理间的差异随土层深度增加逐渐减小, 且 W_2 处理的全氮含量在 10~50 cm 土层均较高。

表1 为不同灌水下限处理各土层土壤 NO_3^- -N 和

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。除 W_1 处理的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量随土层深度增加先升高后降低外, 其余均随土层深度增加而降低。同一土层不同处理间的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量差异显著,

且 W_2 处理的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量在各土层中均为最低。各处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均随土层深度增加逐渐降低, 但除 10~20 cm 土层外, 其余土层不同处理间差异不显著。

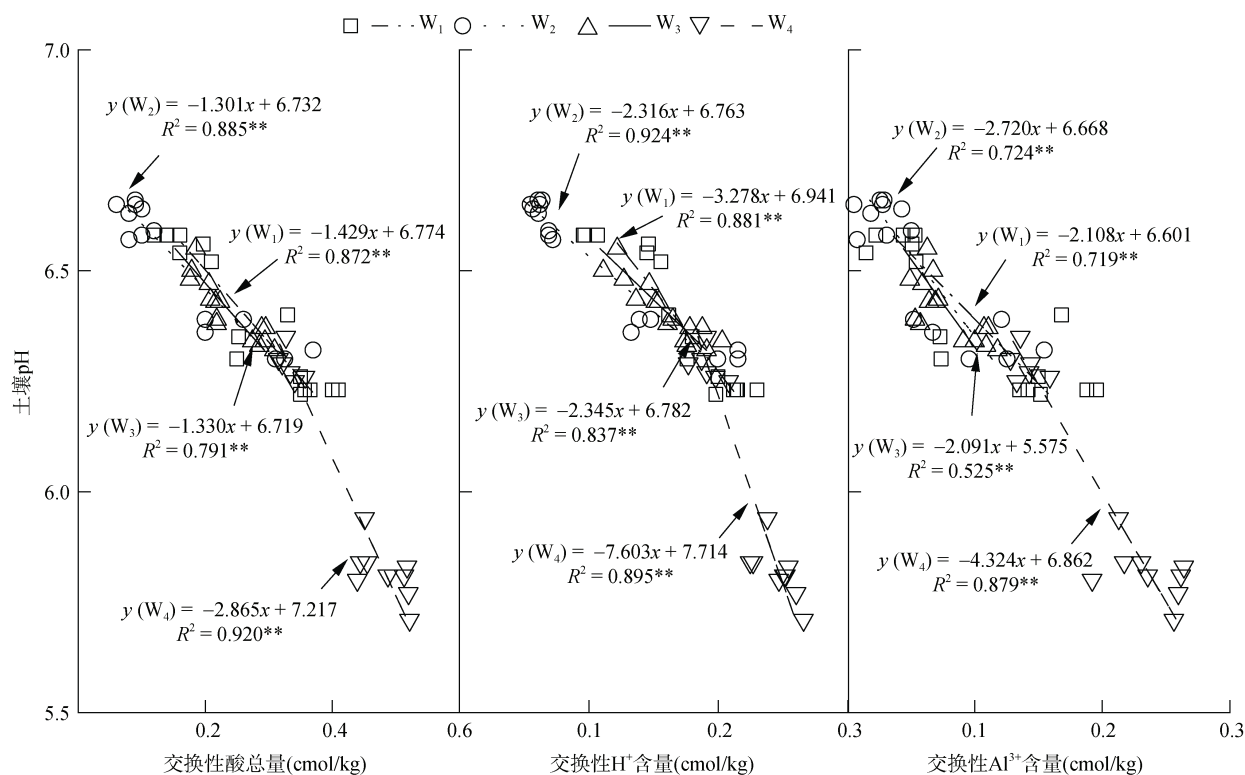


图 5 土壤 pH 与交换性酸总量、交换性 H^+ 、 Al^{3+} 的关系 ($n=15$)

Fig. 5 Relationship of soil pH with exchangeable acid, exchangeable H^+ , and Al^{3+}

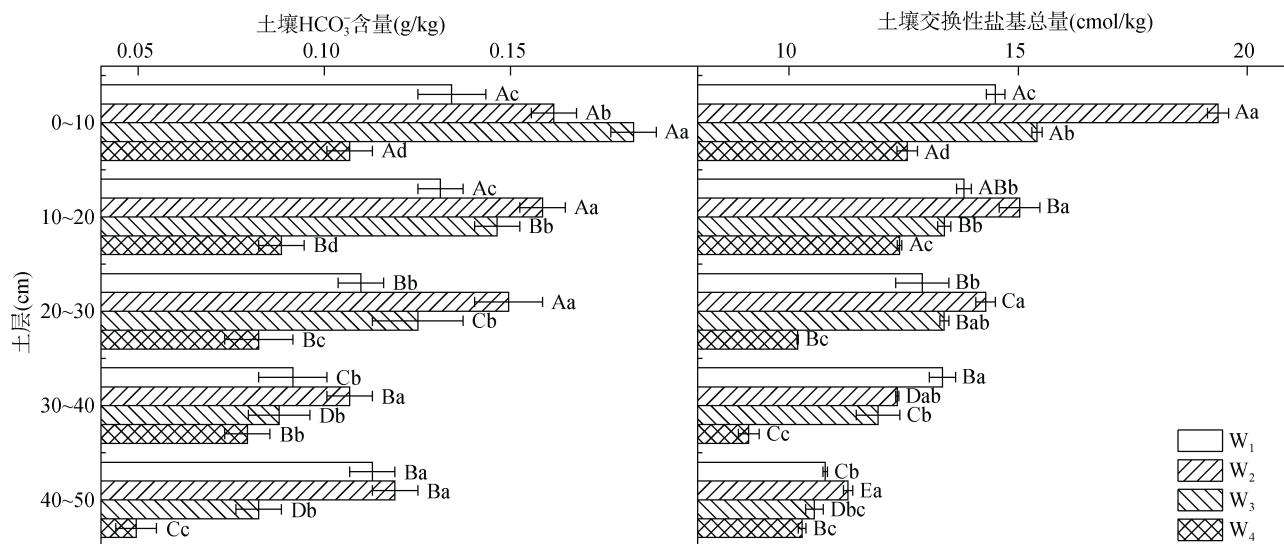


图 6 不同灌水下限设施土壤 HCO_3^- 和交换性盐基总量

Fig. 6 HCO_3^- and total exchangeable base contents of greenhouse soils under different irrigation lower limits

3 讨论

3.1 土壤酸度与土壤酸碱缓冲性能的关系

本研究表明, 不同灌水下限处理的土壤酸碱缓冲

曲线存在差异(图 2), 说明不同处理不同土层的酸碱缓冲能力有所不同。表层土壤的酸碱缓冲性能优于底层土壤, 其原因可能是施用化肥、有机肥提高了土壤有机质含量和阳离子交换量, 增强了土壤对酸碱的缓

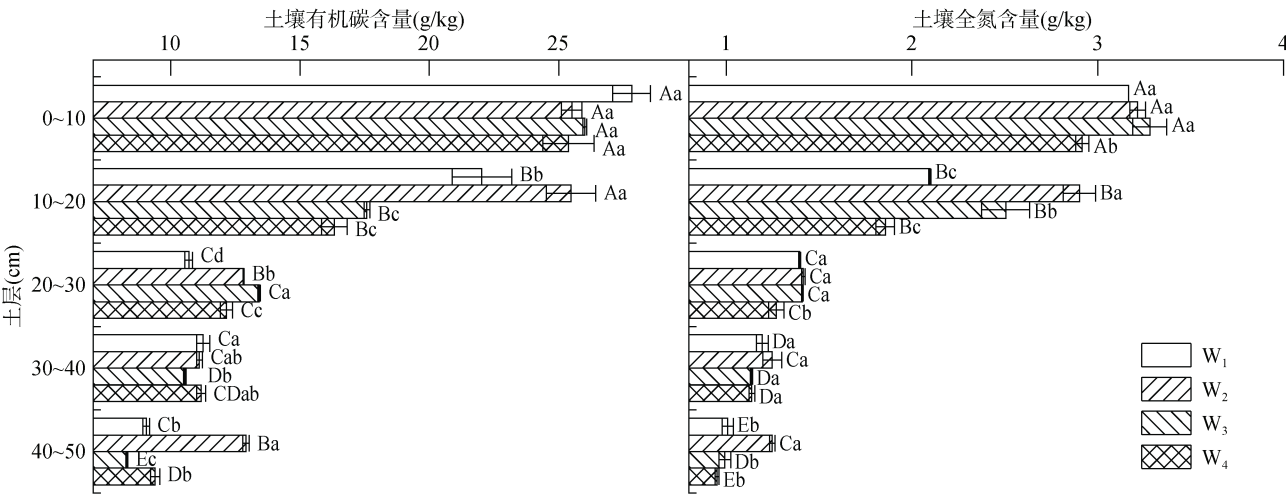


图 7 不同灌水下限设施土壤全氮和有机碳含量
Fig. 7 TN and SOC contents of greenhouse soils under different irrigation lower limits

表 1 不同灌水下限设施土壤矿质氮含量(mg/kg)
Table 1 Mineral nitrogen contents of greenhouse soils under different irrigation lower limits

土层深度(cm)	W ₁		W ₂		W ₃		W ₄	
	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
0~10	209.39Bc	4.11Aa	174.48Ad	3.90Aa	290.77Ab	3.42Aa	323.76Aa	3.02Aa
10~20	271.81Aa	3.08ABa	116.86Bc	2.92ABa	179.24Bb	2.10Bb	168.14Bb	2.89Aa
20~30	134.50Cb	3.05ABa	99.29Cc	2.34Ba	163.96Ba	2.14Ba	97.00Cc	2.64Aa
30~40	92.37Db	2.33ABa	57.00Dd	2.39Ba	138.02Ca	2.13Ba	65.23Dc	1.86Ba
40~50	70.80Db	1.81Ba	52.46Dd	2.26Ba	108.73Da	2.23Ba	63.40Dc	1.65Ba

注：表中同行不同小写字母表示同一土层同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)，同列不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著($P<0.05$)。

冲能力。土壤酸碱缓冲能力的差异与加入体系的酸碱数量有关，较少的酸碱加入量，土壤 pH 变化较快，表明土壤对酸碱的缓冲能力较小；随加入体系的酸碱数量增加，土壤酸碱缓冲曲线变化速率较慢，表明土壤酸碱缓冲能力较强，这与土壤处于不同 pH 缓冲体系及主导的土壤矿物种类有关^[12]。如当酸加入量增加使得体系 pH<4 时，土壤处于铝硅酸盐主导体系，酸缓冲曲线变化平缓，而随 pH 增加，土壤处于可交换性阳离子及羟基铝主导的体系，其碱缓冲能力较强^[13]。本研究中，W₂ 处理土壤酸碱缓冲曲线的 pH 变化相对于其他处理较为缓慢，曲线较为平缓，进一步表明 W₂ 处理的土壤酸碱缓冲能力要优于其他处理。

3.2 影响土壤酸化的因素分析

研究表明，土壤 pH 越低时土壤交换性酸总量越大，交换性 H⁺、交换性 Al³⁺ 含量也随之上升^[14]。本研究表明，当交换性酸总量升高到一定数值，即土壤 pH 下降到一定程度时，交换性 Al³⁺ 占比将大于交换性 H⁺，在土壤酸度变化中居于主导地位。这表明土壤酸度较低时土壤酸化主要由交换性 H⁺ 引起；但随

着土壤酸度增大，逐渐转变为交换性 Al³⁺ 主导土壤酸化^[5]。土壤有机碳对于提高土壤质量和作物产量有着重要的意义。本研究表明，土壤 pH 和各土层有机碳含量均呈正相关关系(图 8)。其原因可能是有机质含有一些碱性物质，这些物质在分解过程中能够中和部分酸性物质，进而使土壤的 pH 趋于中性^[15]；其次，腐殖质是有机质在土壤中分解的产物，具有很强的酸碱缓冲能力，能吸附 H⁺，从而在一定范围内提高土壤 pH^[16]；此外，有机质是土壤中微生物的食物来源，微生物的代谢活动能释放出不同类型的碱性物质，使得土壤 pH 上升，尤其是在土壤中有较高含量的有机质时^[17]。土壤酸化的本质之一是土壤盐基离子的淋失^[18]。土壤交换性盐基离子通过离子交换来维持土壤 pH 稳定，高盐基饱和度能够增强土壤对 pH 变化的缓冲性能^[19]。本研究中，W₂ 处理土壤交换性盐基总量在 0~30 cm 显著大于其他处理，该结果与刘莉等^[20]关于重庆酸性紫色土阳离子交换特征对酸缓冲容量的影响研究结果相一致。其原因可能是，W₁ 处理灌溉量较少，土壤溶液中的 H⁺ 占据主导地位，盐基离

子被置换进入土壤溶液,导致胶体表面盐基离子减少,盐基饱和度下降^[21];而灌溉量过高(W_3 和 W_4 处理)会增加土壤水分含量,水分易向下渗漏,形成强烈的淋溶作用,盐基离子随水分下移至深层土壤或地下水,导致表层土壤盐基饱和度下降^[22],这也进一步证实了为什么土壤底层 pH 高于表层。

由图 8 可知, pH 与 HCO_3^- 为正相关关系。 HCO_3^- 作

为弱酸的共轭碱,其含量的升高有助于抑制土壤酸化^[23]。本研究表明,相较于其他灌水下限处理, W_2 处理提高了土壤 HCO_3^- 含量,其原因可能是土壤含水量较低时,土壤孔隙度减少,阻碍 HCO_3^- 迁移与再分布^[24];而含水量过高时(W_3 和 W_4 处理),植物会优先吸收 K^+ 等易移动的阳离子,导致土壤胶体表面的 Ca^{2+} 被置换,释放的 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 结合而沉淀,降低了土壤 HCO_3^- 含量^[21]。

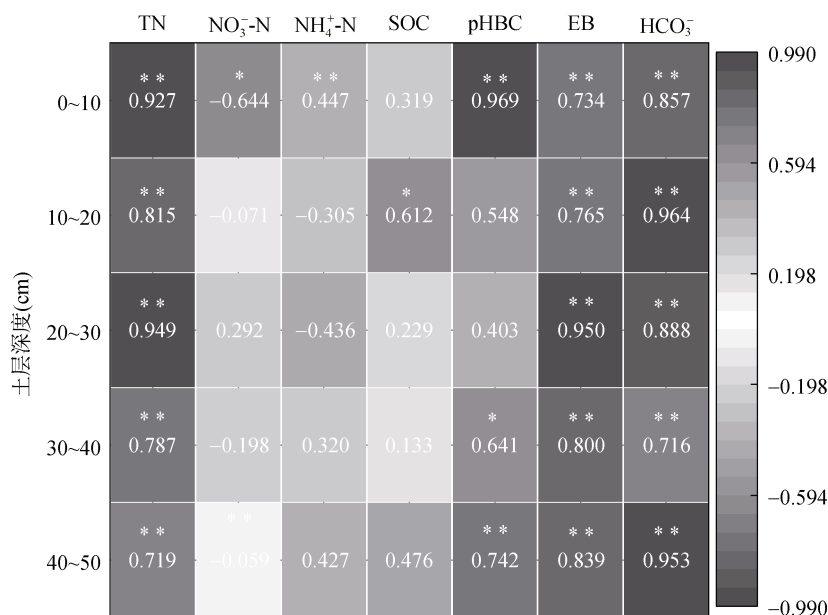


图 8 土壤 pH 与其他土壤性质的相关性($n=12$)

Fig. 8 Correlations of pH with other soil properties

3.3 灌水下限影响土壤酸化的机理探讨

本研究团队前期在同一试验地开展的研究结果表明,不同灌水下限处理在单位面积灌水量和灌水频率方面存在差异^[25],这可能进一步影响灌水过程及灌水后土壤水分运移特征以及离子累积与分布,从而对土壤酸化差异产生重要影响^[26]。 W_4 处理单次灌水量最大,灌水后 0~30 cm 土层全面湿润且水分含量最高,水分可向下运移至深层土壤^[27], H^+ 、 Al^{3+} 和 NO_3^- 等致酸离子可随水分迁移至深层土壤^[24],且不同的致酸离子的形态、电荷数量及其离子半径各不相同,导致离子的移动性能存在差异^[7],吸附能力强的 H^+ 和 Al^{3+} 交换到土壤胶体表面点位,导致该处理底层土壤的致酸离子含量高于其他灌水下限处理。此外,设施环境土表蒸发量大,水分向上运移使得灌水量大的 W_4 处理有更多的 NO_3^- 迁移至表层土壤,其表聚更为明显。因此, W_4 处理土壤 pH 在整个土体中均低于其他 3 个处理。由图 8 可知,各土层土壤 pH 与 NO_3^- -N 含量均呈负相关,也进一步表明二者的关系。

W_2 和 W_3 处理局部湿润土体,与 W_1 处理相比灌溉次数少,与 W_4 处理相比单次灌溉量少。 W_2 和 W_3

处理的各土层交换性酸含量均显著低于 W_1 和 W_4 处理,尤其是在 0~30 cm 土层差异更明显。相较于 W_1 和 W_4 处理, W_2 和 W_3 处理抑制土壤酸化,其原因可能与施用的尿素水解转化为 NH_4^+ -N,进一步发生硝化作用有关。灌溉加速了土壤盐基离子和 NO_3^- -N 向下淋溶迁移,进而增加土壤交换性酸含量,降低土壤交换性盐基离子含量。与 W_4 处理相比, W_2 和 W_3 处理的灌溉水用量较低,引起阳离子和 NO_3^- -N 的淋失量减少,土壤酸化程度相对较低,这可能是不同灌水下限处理土壤酸化差异的机理。

与其他处理相比, W_1 处理单次灌水量少,但灌溉次数最多,总灌水量最大,土壤处于频繁的干湿交替状态^[25],更有利于有机质矿化分解,因此在 10~30 cm 土层有机碳含量显著降低,而有机质对致酸离子(H^+ 和 Al^{3+})的络合能力同时降低^[28],这可能导致表层和底层土壤交换性酸含量高于 W_2 和 W_3 处理,进而降低土壤 pH。总的来说,灌水下限因其灌溉频率和灌溉量的不同,影响土壤交换性盐基离子、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 、盐分离子的迁移和积累,进而影响土壤 pH 的变化;同时,通过影响土壤酸碱缓冲能

力, 进而影响土壤 pH 变化速率。

4 结论

1) 设施土壤 pH 表现为随土层深度增加而增加, 且不同灌水下限显著影响土壤 pH, 适当降低灌水下限有利于提高土壤 pH、降低交换性酸总量及其组成。不同灌水下限处理土壤的酸碱缓冲曲线均为表层变化小于底层, 灌水下限 35 kPa 处理有利于提高土壤酸碱缓冲容量。

2) 相关分析表明, 土壤 pH 与交换性酸总量及其主要占比交换性 H^+ 含量均呈负相关关系, 且以灌水下限 35 kPa 处理土壤 pH 变化率最小。不同灌水下限处理土壤 pH 与交换性酸总量(交换性 H^+ 、 Al^{3+})均呈显著负相关关系, 与土壤酸碱缓冲容量、交换性盐基总量和 HCO_3^- 含量呈正相关关系。

3) 灌水下限 35 kPa 处理因土壤盐基离子总量、有机碳和 HCO_3^- 含量高, H^+ 、 Al^{3+} 和 NO_3^- 等致酸离子含量低, 进而提高了土壤酸碱缓冲容量, 相较于其他处理抑制土壤酸化。综合考虑土壤 pH 与酸碱缓冲性能、交换性酸、盐基离子之间的关系, 灌水下限 35 kPa 为供试设施土壤最适宜的水分管理措施。

参考文献:

- [1] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 756–763.
- [2] Huang K, Li M Q, Li R P, et al. Soil acidification and salinity: The importance of biochar application to agricultural soils[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1206820.
- [3] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1248–1263.
- [4] 徐影, 李彦生, 刘晓冰, 等. 长期施肥改变玉米大豆轮作/连作黑土农田酸化速率和酸中和容量[J]. 土壤, 2024, 56(4): 750–759.
- [5] 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, 46(3): 466–471.
- [6] Lv H F, Zhao Y M, Wang Y F, et al. Conventional flooding irrigation and over fertilization drives soil pH decrease not only in the top- but also in subsoil layers in solar greenhouse vegetable production systems[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114156.
- [7] 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.
- [8] 范庆锋, 张玉龙, 杨春璐, 等. 灌溉方法对蔬菜大棚土壤盐渍化及酸化的影响[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(12): 115–118.
- [9] Martin-Gorrioz B, Gallego-Elvira B, Martínez-Alvarez V, et al. Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (south-east Spain) and evaluation of impact mitigation practices[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121656.
- [10] 范庆锋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对设施土壤交换性盐基组成及比例的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 264–268.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 562–572.
- [13] 李科伟, 徐仁扣. 铝氧化物对层状硅酸盐矿物和红壤酸化过程中铝活化的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1557–1567.
- [14] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 325–363.
- [15] 刘冬, 黄传琴, 肖可青, 等. 土壤黏土矿物层间对有机碳的“超稳”固定机制及其增汇效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(11): 3664–3667.
- [16] 李源环, 邓小华, 张仲文, 等. 湘西典型植烟土壤酸碱缓冲特性及影响因素[J]. 中国生态农业学(英文), 2019, 27(1): 109–118.
- [17] Wang C Q, Kuzyakov Y. Soil organic matter priming: The pH effects[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17349.
- [18] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 202–212.
- [19] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 95–104.
- [20] 刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 887–897.
- [21] 武菲, 赵彦峰, 张水清, 等. 农田土壤酸化成因及防治措施分析与展望[J]. 环境科学, 2026, 47(1): 531–542.
- [22] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 干旱区不同灌溉量下后备耕地土壤水盐动态变化规律研究[J]. 地理科学, 2013, 33(6): 763–768.
- [23] Zhu X J, Ros G H, Xu M G, et al. The contribution of natural and anthropogenic causes to soil acidification rates under different fertilization practices and site conditions in Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 934: 172986.
- [24] 王代长, 蒋新, 卞永荣, 等. 酸沉降下加速土壤酸化的影响因素[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 152–157.
- [25] 张丽媛, 吕金东, 石欣悦, 等. 灌溉下限对设施土壤 N_2O 和 NO 排放特征的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 992–1002.
- [26] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 利用 HYDRUS-2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 23–32.
- [27] 万文亮, 郭鹏飞, 胡语妍, 等. 调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 166–174.
- [28] Jiang J, Xu R K, Zhao A Z. Surface chemical properties and pedogenesis of tropical soils derived from basalt with different ages in Hainan, China[J]. *Catena*, 2011, 87(3): 334–340.

(责任编辑: 于 飞)