

文章编号: 1672-3317(2024)05-0016-07

养殖废水灌溉对大蒜生长、产量及水氮利用效率的影响

向梦^{1,2}, 李莹^{1,2}, 韩焕豪³, 陈曼雨¹, 廖斌¹, 崔远来^{1*}

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2.中建三局绿色产业投资有限公司, 武汉 430058; 3.昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

摘要:【目的】利用田间小区试验, 研究养殖废水灌溉对大蒜生长、产量、水氮利用效率及土壤总氮的影响, 以期促进养殖废水的回收利用, 减少大蒜水资源和氮肥用量, 为养殖废水灌溉节水减排提供科学依据。【方法】在国家农业环境大理观测实验站开展了大蒜养殖废水灌溉试验研究。试验根据不同灌溉水源和施氮水平设5个处理(CK: 清水灌溉+不施氮肥, C1: 清水灌溉+全量氮肥 390 kg/hm², C2: 清水灌溉+减量氮肥 312 kg/hm², R1: 养殖废水灌溉+不施氮肥, R2: 养殖废水灌溉+施用氮肥 150 kg/hm²), 分析比较不同处理下大蒜各生育期生长指标、产量、水氮利用效率和土壤总氮的变化规律。【结果】R2处理下大蒜生长发育状况最佳, R1处理在较低施氮水平下达到C1处理水平的生长指标; R2的大蒜产量最佳, C1、C2、R1、R2处理鳞茎产量分别比CK提高111.30%、81.23%、98.19%、142.01%; 相比C1处理, 养殖废水灌溉(R1和R2处理)下氮肥吸收利用率分别提高154.71%和92.25%, 氮肥偏生产力分别提高110.75%和47.63%, 灌溉水分生产率的相对变化分别为-29.19%和2.34%, 0~40 cm土层的土壤总氮增量分别降低9.25%和3.89%, 但0~20 cm土层的土壤总氮增量提高170.90%和255.93%。【结论】养殖废水灌溉和施用适量氮肥有助于大蒜生长发育和产量形成, 在不灌清水和减量氮肥的同时保证大蒜生长和产量, 提高了表层土壤含氮量。

关键词: 养殖废水; 灌溉; 大蒜; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: TV93; S273.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022688

向梦, 李莹, 韩焕豪, 等. 养殖废水灌溉对大蒜生长、产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 16-21, 54.
XIANG Meng, LI Ying, HAN Huanhao, et al. Effects of livestock wastewater irrigation on growth, yield, and water and nitrogen use efficiency of garlic[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 16-21, 54.

0 引言

【研究意义】2021年大理州畜禽(猪、牛、养家禽等)存栏2 415.52万头(只)^[1], 养殖废水的排放对河流湖泊水质造成威胁。养殖废水作为替代性水源, 具有较高浓度氮、磷等营养物质^[2-7], 能为植物生长提供重要的养分, 增加土壤有机质, 提高土壤肥力。养殖废水灌溉有利于减少养殖废水直接排放量, 替代部分清水和化肥, 缓解农业用水紧张, 减少农田面源污染源头化肥输入。【研究进展】研究表明, 养殖废水灌溉并追施化肥可以保障水稻^[7-8]、冬小麦^[9-11]、夏玉米^[12]的产量, 与原有施肥方式相比产量无显著差异, 有助于作物生长。大蒜是洱海流域典型作物和重要经济作物, 为大水大肥作物, 对灌水和施肥需求较大, 氮、磷流失系数较大^[13-14],

对洱海水质污染较严重。【切入点】当前养殖废水灌溉对大蒜生长、产量、水氮利用效率、土壤总氮影响的研究较少。【拟解决的关键问题】本研究以大蒜为研究对象, 开展大蒜不同灌溉和施肥的田间试验。通过与当地农户水肥管理模式相比较, 探求养殖废水灌溉对大蒜生长、产量、水氮利用效率及土壤总氮的影响, 以期为大理州养殖废水灌溉节水、保产、减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于2016年10月12日—2017年4月13日在洱海流域的国家农业环境大理观测实验站(100°07'43"E, 25°49'59"N, 海拔1 975 m)进行, 供试大蒜品种为“四川温江红七星”, 播种日期为2016年10月12日, 种植密度为120万株/hm²。试验田块土壤质地为粉砂质壤土, 土壤体积质量为1.14 g/cm³, 体积饱和含水率为55.0%, 体积田间持水率为47.2%。平均土壤总氮量为2.02 g/kg, 其中0~20 cm土壤层总氮量为2.86 g/kg, 20~40 cm土壤

收稿日期: 2022-12-15 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 云南省科技厅科技入滇项目(YKK2019092733)

作者简介: 向梦(1998-), 女, 博士研究生, 主要从事农业面源污染治理研究。E-mail: XiangMeng@whu.edu.cn

通信作者: 崔远来(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉和农业面源污染治理研究。E-mail: YLCui@whu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

层总氮量为 1.17 g/kg。养殖废水取自实验站内养猪场集污池，经静置处理。灌溉水符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)。灌水量和总氮质量浓度见表 1。

表 1 灌溉水的氮质量浓度

Tab.1 Concentration of nitrogen in irrigation water

灌水日期	清水		养殖废水	
	灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	总氮量 TN/ (mg·L ⁻¹)	灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	总氮量 TN/ (mg·L ⁻¹)
20161208	52.63	6.39	52.63	159.15
20170105	368.42	1.36	368.42	173.86
20170114	473.68	3.43	473.68	84.35
20170205	368.42	1.23	610.53	90.05
20170303	52.63	6.39	52.63	159.15
总计	1 263.16	-	1 400	-

1.2 试验方法与处理设计

试验包括不同灌水水质及氮肥 2 个因素，设 5 个处理：清水灌溉+不施氮肥 (CK, 空白对照)、清水灌溉+全量氮肥 (C1)、清水灌溉+减量氮肥 (C2)、养殖废水灌溉+不施氮肥 (R1) 和养殖废水灌溉+施用氮肥 (R2)。每个处理各 3 次重复。C1 处理与洱海流域农户水肥管理模式一致，施氮肥总量 390 kg/hm²，按基肥：幼苗期：越冬前：蒜薹伸长期=2：1：1：1 比例施氮肥。C2 处理各生育期施氮肥量均为 C1 处理的 80%，探究常规减氮对大蒜生长影响；R1 处理仅进行养殖废水灌溉，不施用氮肥；R2 处理施氮肥 150 kg/hm²，以基肥形式一次施用，基肥处理均与 C1 处理一致，不再追肥。不同处理的施氮日期及施氮量见表 2，追肥随水浇施，各处理磷肥 (120 kg/hm², P₂O₅)、钾肥 (225 kg/hm², K₂O) 以及其他田间管理与当地一致。因生育期内清水施氮量为 3.25 kg/hm²，C1 处理和 C2 处理实际施氮量分别为 393.25 kg/hm² 和 315.25 kg/hm²。R1 处理和 R2 处理的实际施氮量根据测定的灌溉时养殖废水含氮质量浓度、灌水量和小区实际面积折算，实际施氮量分别为 C1 处理的 44.5%、77.6%。

表 2 不同处理大蒜施氮量

Tab.2 Nitrogen fertilizer application amount of garlic under

施肥日期	施氮量/(kg·hm ⁻²)				
	CK	C1	C2	R1	R2
20161012	-	150.00	120.00	-	150.00
20161114	-	80.00	64.00	-	-
20161208	-	80.34	64.34	9.35	8.24
20170105	-	0.50	0.50	46.03	40.55
20170114	-	1.62	1.62	25.57	22.53
20170205	-	0.45	0.45	57.59	50.73
20170303	-	80.34	64.34	37.08	32.66
总计	0	393.25	315.25	175.63	304.70

田间试验采用随机区组设计，试验小区面积为 6 m² (2 m×3 m)。小区内部用田埂覆塑料薄膜形式

分隔，田埂宽 0.3 m、高 0.4 m，地下包裹部分埋入田面以下 0.4 m 以防止侧渗。如表 3 所示，不同生育期的计划湿润层深度均为 0~40 cm。试验期间用 EM50 实时监测土壤水分状况，当计划湿润层土壤水分下降到体积田间持水率的 60% 时灌水，灌水上限为体积田间持水率。

表 3 大蒜生育期划分及各阶段计划湿润层深度

Tab.3 Division of garlic growth stages and depth of planned

wetting layer in each stage		
生育期	生育期 时间/d	计划湿润层 深度/cm
出苗期 (20161012—20161023)	12	0~40
幼苗期 (20161024—20170203)	103	0~40
鳞芽花芽分化期 (20170204—20170210)	7	0~40
蒜薹伸长期 (20170211—20170312)	30	0~40
鳞茎膨大期 (20170313—20170413)	32	0~40

1.3 观测指标与方法

试验期间各小区定株观测大蒜幼苗期 (越冬前)、鳞芽花芽分化期、蒜薹伸长期和鳞茎膨大期的生长发育状况，包括株高、叶片数、假茎粗和叶面积指数。产量包括鳞茎产量和蒜薹产量，鳞茎采收标准：从鳞茎上部膨大处向上 2 cm 的位置剪去上部假茎，去除根系；蒜薹采收标准：从鳞茎上部膨大处向上 10 cm 的位置采收。收获时各小区随机选取 100 株大蒜称取鳞茎、蒜薹、茎叶的湿质量和干质量。灌溉水总氮采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度计法测定。大蒜收获后测定其鳞茎、蒜薹、茎叶的含氮量，同时测定大蒜播种前和收获后 0~20 cm 和 20~40 cm 深度的土壤总氮，均采用凯氏定氮法测定。

1.4 数据处理与分析

数据采用 SPSS22.0 进行方差分析，显著性检验水平为 $P<0.05$ 。

各处理大蒜水氮利用效率指标选取氮肥吸收利用率 (Nitrogen recovery efficiency, RE_N, %)、氮肥偏生产力 (Nitrogen partial factor productivity, PFP_N, kg/kg)、灌溉水分生产率 (Irrigation water productivity, WP_I, kg/m³)，计算公式^[15-18]如下：

$$RE_N = (U - U_0) / F \times 100\%, \quad (1)$$

$$PFP_N = Y / F, \quad (2)$$

$$WP_I = Y / W_I, \quad (3)$$

式中： U 为施氮区植株累计吸氮量 (kg/hm²)； U_0 为不施氮区植株累计吸氮量 (kg/hm²)； F 为施氮量 (kg/hm²)； Y 为施氮区产量 (kg/hm²)； W_I 为灌溉量 (m³/hm²)。0~40 cm 土层土壤总氮量为 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤总氮量的平均值，土壤总氮增量为收获后与播种前土壤总氮量的差值。

2 结果与分析

2.1 不同处理下大蒜生理生长特性及产量

2.1.1 生理生长特性

不同处理大蒜各生育期的单株干质量、株高、假茎粗、叶面积指数 (LAI) 见表 4, 各生长指标从幼苗期到鳞茎膨大期均呈增加趋势。在幼苗期中前期, 单株干质量表现为 C1 处理最优, 相比 C1 处理, 清水减氮 C2 处理和养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理无显著差异, C1 处理>R1 处理, R1 处理的大蒜单株干质量与 CK 无显著差异; 株高和假茎粗均为 C1 处理最优, 施基肥的 C1 处理、C2 处理、R2 处理显著高于未施基肥的 R1 处理和 CK, R1 处理与 CK 无显著差异, 相比 C1 处理, 清水减氮 C2 处理和养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理未对株高和假茎粗产生显著影响; LAI 值表现为 R2 处理最优, C1 处理>C2 处理>R1 处理>CK, 相比 C1 处理, 清水减氮 C2 处理和养殖废水灌溉+不施氮肥 R1 处理显著降低了 LAI 值, 延缓了叶片生长, 而养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理保障了叶片正常生长。

在幼苗期后期-蒜薹伸长期, 单株干质量表现为 C1 处理最优, 养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理与 C1 处理无显著差异, 清水减氮 C2 处理和养殖废水灌溉+不施氮肥 R1 处理的单株干质量均显著小于 C1 处理, 显著大于 CK; 株高 R2 处理最大, R1 处理、R2 处理与 C1 处理无显著差异, C2 处理与 C1 处理无显著差异, 但显著低于 R2 处理, 显著高于 CK; 假茎粗表现为 R2 处理最优, R2 处理与 C1 处理无显著差异, C2 处理和 R1 处理均显著小于 C1 处理, 显著大于 CK; LAI 值 R2 处理最优, C1 处理、R1 处理次之, C2 处理>CK; R2 处理和 R1 处理的株高、LAI 值增幅显著大于 C1 处理、C2 处理。综合 4 项生长指标, 养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理大蒜生长最优, 均达到了 C1 处理的生长水平。

在鳞茎膨大期, 单株干质量表现为 R2 处理最优, R2 处理与 C1 处理无显著差异, R1 处理和 C2 处理显著小于 C1 处理, 显著大于 CK; 株高表现为 R2 处理最优, R1 处理、C1 处理次之, C2 处理>CK; 假茎粗表现为 R2 处理最优, R2 处理与 C1 处理无显著差异, R1 处理和 C2 处理显著小于 C1 处理, 显著大于 CK; LAI 值表现为 R2 处理最优, C1 处理、R1 处理次之, C2 处理>CK。综合 4 项生长指标, 养殖废水灌溉+施氮肥 R2 处理达到了 C1 处理的生长水平, 养殖废水灌溉+不施氮肥 R1 处理的株高和 LAI 值达到了 C1 处理的生长水平, 而清水减氮 C2 处理均未达到 C1 处理的生长水平。

表 4 不同处理大蒜各生育期的单株干质量、株高、假茎粗、叶面积指数

Tab.4 Plant dry weight, plant height, stem diameter and leaf area index at different growth stages of garlic under different treatments

指标	处理	30DAT (幼苗期)	64DAT (幼苗期)	140DAT (蒜薹伸长期)	181DAT (鳞茎膨大期)
单株 干质量/g	CK	0.68b	1.11b	7.73c	9.57c
	C1	0.79a	1.82a	12.94a	16.48a
	C2	0.77a	1.73a	9.24b	12.01b
	R1	0.70b	1.52b	10.66b	13.66b
	R2	0.75a	1.67a	12.56a	16.94a
株高/ cm	CK	23.35b	39.30b	55.12c	62.61d
	C1	28.34a	46.31a	67.09ab	89.25b
	C2	27.29a	44.16a	63.24b	82.34c
	R1	24.00b	40.54b	67.54ab	90.86b
	R2	28.71a	45.18a	83.11a	103.67a
假茎粗/ cm	CK	0.53b	0.54b	0.82c	1.10c
	C1	0.61a	0.63a	1.38a	1.90a
	C2	0.60a	0.61a	1.27b	1.78b
	R1	0.53b	0.54b	1.25b	1.69b
	R2	0.61a	0.63a	1.38a	1.99a
叶面积 指数	CK	0.38c	0.49d	1.36d	1.49d
	C1	0.55a	0.98a	2.63b	3.35b
	C2	0.46b	0.75b	2.22c	2.78c
	R1	0.39c	0.58c	2.58b	3.22b
	R2	0.56a	1.01a	4.78a	5.59a

注 DAT 为种植时间 (d); 同列数据后不同小写字母表示同一时间不同处理间的显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

2.1.2 产量

表 5 为不同处理大蒜产量和鳞茎含水率, 由表 5 可知, C1、C2、R1、R2 处理鳞茎产量相较 CK 分别提高 111.30%、81.23%、98.19%、142.01%。C1、C2、R1、R2 处理蒜薹产量相较 CK 分别提高 17.66%、12.62%、18.34%、22.17%。C1、C2、R1、R2 处理鳞茎含水率在 65% 上下, 相较 CK 分别提高 5.42%、6.13%、6.67%、5.11%, 养殖废水灌溉对大蒜鳞茎含水率影响较小。施氮处理的产量和鳞茎含水率均显著高于 CK, 施氮处理间无显著差异。

表 5 不同处理大蒜产量和鳞茎含水率

Tab.5 Garlic yield and bulb water content under different treatments

处理	鳞茎产量 (鲜质量)/(t·hm ⁻²)	蒜薹产量 (鲜质量)/(t·hm ⁻²)	鳞茎 含水率/%
CK	14.33b	0.73b	61.81b
C1	30.28a	0.86a	65.16a
C2	25.97a	0.82a	65.60a
R1	28.40a	0.86a	65.93a
R2	34.68a	0.89a	64.97a

2.2 不同处理下大蒜水氮利用效率

2.2.1 大蒜吸氮量

表 6 为不同处理大蒜各部位吸氮量, 由表 6 可知, C1、C2、R1、R2 处理大蒜吸氮量比 CK 显著提高 247.49%、198.56%、280.49%、369.00%。各处理不同部位干物质量均为鳞茎>茎叶>蒜薹, 其中鳞茎占 76%~82%, 茎叶占 17%~23%, 蒜薹占 1%~2%。

各处理鳞茎单位含氮量 R2 处理>R1 处理>C1 处理>C2 处理>CK, C2 处理与 C1 处理无显著差异, C1、C2、R1、R2 处理的鳞茎单位含氮量与 CK 相比显著提高 89.18%、77.09%、111.46%、128.60%。各处理不同部位的单位含氮量均是蒜薹最低, 养殖废水灌溉组 R1、R2 处理的蒜薹单位含氮量显著高于

清水灌溉组 C1、C2 处理。养殖废水灌溉组 (R1、R2 处理), 单位质量的鳞茎含氮量在大蒜各部分含氮量中最大, 茎叶与鳞茎含氮量差距不显著; 清水灌溉组 (C1、C2、CK 处理), 茎叶含氮量显著大于鳞茎。施氮处理茎叶单位含氮量显著高于 CK, 但施氮处理之间无显著差异。

表 6 不同处理大蒜各部位吸氮量

Tab.6 Nitrogen absorption of different parts of garlic under different treatments

处理	干物质量/(t·hm ⁻²)			单位含氮量/(g·kg ⁻¹)			吸氮量/(kg·hm ⁻²)
	鳞茎	蒜薹	茎叶	鳞茎	蒜薹	茎叶	
CK	5.55Ab	0.138Bb	1.25Bb	10.91Bd	10.20Bc	13.69Ab	78.31c
C1	10.57Aab	0.163Ba	2.28Ba	20.64Bc	17.33Cb	23.05Aa	272.12ab
C2	8.97Aab	0.156Ca	2.60Ba	19.32Bc	17.93Bb	21.89Aa	233.80b
R1	9.75Aab	0.164Ca	2.91Ba	23.07Ab	19.48Ba	23.01Aa	297.96ab
R2	11.97Aa	0.169Ca	2.79Ba	24.94Aa	20.72Ba	23.37Aa	367.27a

注 不同大(小)写字母表示不同部位(处理)间的显著性差异(P<0.05)。

2.2.2 大蒜水氮利用效率

不同处理大蒜的氮肥吸收利用率 (RE_N)、氮肥偏生产力 (PFP_N)、灌溉水分生产率 (WP_I) 见表 7。C2、R1、R2 处理的 RE_N 分别比 C1 处理提高 0.08%、154.71% 和 92.25%, 仅 R1 处理差异显著, 养殖废水灌溉显著提高了氮肥吸收利用率。C2、R1、R2 处理的 PFP_N 分别比 C1 处理提高 7.01%、110.75% 和 47.63%, 仅 R1 处理差异显著。C2、R1、R2 处理的 WP_I 与 C1 处理相比相对变化分别为-15.25%、-29.19% 和 2.34%, 均无显著差异。C1、C2、R1、R2 处理的 WP_I 均显著高于 CK。

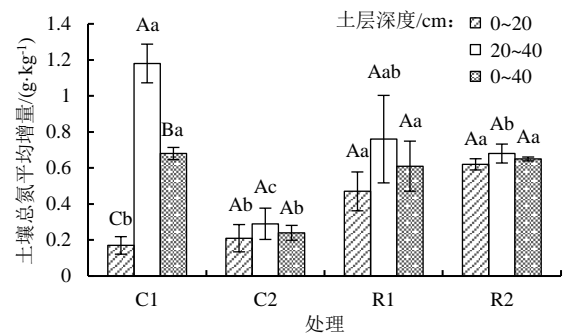
表 7 不同处理的大蒜水氮利用效率

Tab.7 Water and nitrogen use indexes of garlic under different treatments

处理	RE _N /%	PFP _N /(kg·kg ⁻¹)	WP _I /(kg·m ⁻³)
CK	-	-	10.15b
C1	49.28b	77.01b	24.39a
C2	49.32b	82.41b	20.67a
R1	125.52a	162.30a	17.27a
R2	94.74ab	113.69ab	24.96a

2.2.3 土壤总氮量变化

不同处理在大蒜种植前后土壤总氮平均增量见图 1。各处理均是 20~40 cm 土层总氮量平均增量大于 0~20 cm 土层, 深层土壤总氮增加幅度较大。C2、R1、R2 处理 0~40 cm 土层土壤总氮平均增量比 C1 处理分别降低 63.40%、9.25%、3.89%, 仅 C2 处理差异显著。R1、R2 处理在 0~20 cm 土层内土壤总氮平均增量均显著高于 C1 处理, 分别提高 170.90% 和 255.93%, 在 20~40 cm 土层的土壤总氮平均增量均低于 C1 处理, 分别降低 36.10% 和 42.49%。



注 不同大(小)写字母表示不同土层(处理)间的显著性差异(P<0.05)。

图 1 不同处理的土壤总氮平均增量

Fig.1 Average increment of soil nitrogen content under different treatments

3 讨论

本研究表明, 养殖废水灌溉能促进大蒜生长, 提高大蒜的单株干质量、株高、假茎粗、LAI 值和产量, 养殖废水灌溉条件下施用氮肥的促进效果更好。晏军等^[8]研究表明减量施肥 20% 后, 养殖废水中的营养物质能满足作物养分需求, 而减量施肥 40% 的处理其产量显著降低。虽然养殖废水灌溉能显著促进作物的生长发育, 但不能完全以养殖废水替代施肥, 有必要进行一定量的施肥^[19]。R2 处理中大蒜的生育指标和产量均优于 R1 处理, 表明大蒜的整体生长发育和产量受生育前期水氮(肥)管理的影响。在试验年份大蒜生育前期, 降水可满足大蒜幼苗的需水, 基本无需人工灌溉, 养殖废水灌溉组 (R1 处理和 R2 处理) 在前期提供的氮素养分远少于清水灌溉组 (C1 处理和 C2 处理), 因此仅有施用氮肥的养殖废水灌溉处理 (R2 处理) 的大蒜生长状况与清水灌溉组无较大差异, 而不施氮肥的养殖废水灌溉处理 (R1 处理) 的生长状况较差。因此, 应施用一定量的氮肥避免大蒜生育前期的氮素养分亏缺而导致

大蒜生长缓慢。同理,在其他生育期大蒜水、肥需求不同步时,也会对生长发育造成一定的影响,因此在实际应用中应根据实际情况适当灌溉、施肥。另有研究表明处理过的养殖废水灌溉可增加作物的产量,在灌溉浓度超过一定限度时出现光合作用效率降低、出苗率较低、烧苗等情况^[20-21]。本研究中养殖废水灌溉未影响大蒜出苗情况,一方面是因为养殖废水的营养物浓度没有超过大蒜烧苗的肥料浓度,另一方面可能是由于养殖废水第一次灌溉时间为 64DAT,位于幼苗期中期,不在出苗对肥料浓度较敏感的阶段。在减量氮肥的养殖废水灌溉组(R1 处理和 R2 处理),大蒜生长指标(单株干质量、株高、假茎粗和 LAI 值)较清水灌溉减量氮肥处理(C2 处理)好,同时与清水灌溉全量氮肥处理(C1 处理)差异较小,说明养殖废水灌溉在减少施氮量的同时可一定程度上促进大蒜生长发育,不会对大蒜生长产生负面影响,一方面是因为养殖废水灌溉时氮素的利用效率高,另一方面养殖废水灌溉也为大蒜提供了氮素以外的其他养分。R1 处理和 R2 处理相比 C1 处理虽然减少了施氮量,但其鳞茎产量的相对变化不显著,甚至 R2 处理的产量高于 C1 处理,表明养殖废水灌溉下在一定范围内的减施氮肥仍可以使大蒜保产甚至增产,这与前人研究结果相符合^[22-24]。在试验年份灌溉条件下,R1 处理由养殖废水灌溉输入的总氮约为 C1 处理的 44.5%,可使大蒜产量基本达到洱海流域农户水肥管理模式(C1 处理)的产量,再补充一定的氮肥(如 R2 处理),更有助于提高产量。

本研究表明,养殖废水灌溉下大蒜的吸氮量相对对照组有明显提高,略高于清水灌溉组,氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力较清水灌溉组均有提高,不施氮肥的养殖废水灌溉处理(R1 处理)的作物氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力最高,这与前人研究结果相似^[11,25]。养殖废水灌溉(R1 处理和 R2 处理)的氮肥吸收利用率高于清水灌溉(C1 处理和 C2 处理),说明养殖废水灌溉有助于大蒜植株对氮素的吸收利用,提高氮肥的利用率。清水减氮 C2 处理相比 C1 处理的氮肥吸收利用率无明显差异,说明适当减少施氮量不会使大蒜对氮的吸收利用造成太大影响。C2 处理、R1 处理的灌溉水分生产率(WP_i)低于 C1 处理,仅 R2 处理的 WP_i高于 C1 处理,C2 处理轻微减产而使 WP_i降低,而 R1 处理的 WP_i降低是因为灌溉水量的增加,养殖废水作为唯一灌溉水源而未进行清水灌溉时,作物生长需要更多的灌溉水量,R2 处理在增加灌溉水量的同时略有增产故 WP_i没有降低,所以仅进行养殖废水灌溉会降低 WP_i,为

避免 WP_i 的降低应辅以一定的基肥增加作物产量,而为了避免灌溉水量的增加,可根据实际情况进行清水、养殖废水交替灌溉。养殖废水灌溉组(R1 处理和 R2 处理)的土壤总氮平均增量(0~40 cm)相较于 C1 处理基本一致,但 C1 处理深层土壤(20~40 cm)总氮增加显著,而表层(0~20 cm)的增量很小,说明大多数氮素流失至深层土壤。养殖废水灌溉组不同土壤层间氮增量无显著差异,R1 处理和 R2 处理的深层土壤(20~40 cm)总氮量增幅低于 C1 处理,而表层增幅显著高于 C1 处理,说明氮素向深层流失少,有更多的氮素养分保存在表层,一方面降低了流失风险,另一方面增加了表层土壤肥力。有研究表明过多^[10]或长期^[26]养殖污水灌溉会促进氮、磷在土壤剖面中的垂直迁移,增加对地下水污染的风险。养殖废水灌溉的长期影响、氮磷径流损失、地下淋溶的风险等有待进一步研究。

4 结论

1) 养殖废水灌溉对大蒜生长发育有促进作用,尤其对株高、叶面积指数作用较明显,能够在较低施氮水平下达到与农户水肥管理处理 C1 处理水平相当的生长指标。养殖废水灌溉+不施氮肥的 R1 处理在较低施氮水平下达到 C1 处理水平的生长指标,养殖废水灌溉+施用氮肥处理 R2 的大蒜生长表现最佳。

2) 养殖废水灌溉对大蒜产量形成有促进作用,能够在较低施氮水平下达到甚至超过农户水肥管理处理 C1 处理水平的产量。养殖废水灌溉+施用氮肥 R2 处理的大蒜产量最佳,C1 处理、C2 处理、R1 处理、R2 处理鳞茎产量与 CK 相比,分别显著提高 111.30%、81.23%、98.19%、142.01%。

3) 养殖废水灌溉相比农户水肥管理处理 C1 处理提高了大蒜吸氮量、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力,降低了灌溉水分生产率。C1 处理、R1 处理和 R2 处理大蒜吸氮量相较 CK 分别显著提高 247.49%、280.49%和 369.00%,R1 处理和 R2 大蒜氮肥吸收利用率分别比 C1 处理提高 154.71%、92.25%,氮肥偏生产力分别比 C1 处理提高 110.75%和 47.63%,灌溉水分生产率与 C1 处理相比相对变化分别为-29.19%、2.34%,而土壤总氮平均增量比 C1 处理降低 9.25%、3.89%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 大理白族自治州统计局.大理统计年鉴-2022[M].大理:大理白族自治州统计局,2022.
- [2] 许振成,谌建宇,曾雁湘,等.集约化猪场废水强化生化处理工艺试验研究[J].农业工程学报,2007,23(10):204-209.

irrigation was conducted experimentally with the dripping rate ranging from 0.9 to 3.2 L/h. The measured data were used to calibrate the HDYDRUS-2D model. **【Result】** The HDYDRUS-2D model can accurately simulate water flow in all soils under membrane regulated irrigation, with the relative errors less than 5%, the coefficient of determination and root mean square deviation being 0.97 and 0.007, respectively. The sandy soil was prone to leakage due to its elaborated hydraulic conductivity. In the membrane-regulated irrigation, adjusting the flow rate in the drip irrigation pipe was needed to improve irrigation efficiency in different soils. On average, the membrane-regulated irrigation worked well for all three soil types. At the end of the irrigation, the ratio of the water on the membrane to the total irrigation amount was more than 70% in all soils, indicating a reduction in water leakage loss. As the dripping rate increased, the proportion of water on the film in the loam soil decreased gradually; the dripping rate in irrigation for this soil should be controlled below a critical value. In the sandy soil, it was required to adjust the buried depth of the drip irrigation pipes to reduce leakage loss. The optimal dripping rate for the sandy clay loam soil and the loam soil was 2 L/h. As the flow rate increased, there was no significant change in the proportion of water on the membrane in the silt soil; the optimal dripping rate for the silt soil was 3 L/h. **【Conclusion】** Our experimental and numerical studies showed the optimal dripping rate for the membrane - regulated surface drip irrigation was 2 L/h for the sandy clay loam soil and the loam soil, and 3 L/h for the silt soil.

. H \ Z R U G W types; membrane-regulated irrigation; water transport; HYDRUS-2D model

(上接第 21 页)

(I I H F W V R I O L Y H V W R F N Z D V W H Z D W H Q Z D W H L U D W G R Q
Q L W U R J H Q X V H H I L F L H Q F \ R I J D U O L

XIANG Meng¹, LI Ying^{1,2}, HAN Huanhao³, CHEN Manyu¹, LIAO Bin¹, CUI Yuanlai^{1*}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co., Ltd, Wuhan 430056, China;

3. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

【Objective】 Garlic is a cash crop in Dali, but its irrigation with livestock wastewater risks environmental pollution. This paper studies the combined effect of livestock wastewater irrigation and nitrogen fertilization on growth, yield, water and nitrogen utilization efficiency of garlic, as well as soil nitrogen in attempts to screen a sustainable livestock wastewater irrigation schedule for garlic production in this region. **【Method】** The experiment was conducted at the National Agricultural Environmental Dali Observation and Experimental Station. There were five treatments: freshwater irrigation without nitrogen application (CK), freshwater irrigation with 390 kg/hm² of nitrogen application (C1), freshwater irrigation with 312 kg/hm² of nitrogen application (C2), livestock wastewater irrigation without nitrogen application (R1), livestock wastewater irrigation with 150 kg/hm² of nitrogen application (R2). In each treatment, we measured the growth indexes, including dry weight, height, stem diameter and leaf area index of the garlic at different growing stages, as well as yield, and water and nitrogen use efficiency of the garlic and soil nitrogen content. **【Result】** The growth of the garlic was the best in R2, but was comparable with that in R1 and C1; R2 gave the highest yield. Compared to CK, C1, C2, R1 and R2 increased the bulb yield by 111.30%, 81.23%, 98.19%, and 142.01%, respectively. The nitrogen absorption and use efficiency of R1 and R2 was 154.71% and 92.25% higher than that of C1, respectively; the nitrogen partial factor productivity of R1 and R2 was 110.75% and 47.63% higher than that of C1, respectively. Compared to C1, R1 reduced the irrigation water productivity and soil nitrogen in the 0-40 cm of soil layer by 29.19%, while R2 increased the irrigation water productivity by 2.34% and reduced soil nitrogen in the 0-40 cm of soil by 3.89%, respectively. Compared to C1, R1 and R2 increased nitrogen in the 0-20 cm of soil layer by 170.90% and 255.93% respectively. **【Conclusion】** Livestock wastewater irrigation combined with appropriate base nitrogen fertilization can sustain garlic growth and yield. Livestock wastewater irrigation improved the nitrogen use efficiency and nitrogen partial factor productivity, with limited effect on average soil total nitrogen.

. H \ Z R U G W livestock wastewater; irrigation; garlic; production; water and nitrogen use efficiency