

预报式灌溉决策支持系统下棉田 土壤氮磷的淋失与利用

靳思佳^{1,2,4}, 齐志明^{1,2,3*}, 桂东伟^{1,2}, 李向义^{1,2}, 曾凡江^{1,2}, 陈小平^{1,2,4}

(1.中国科学院 新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2.新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 策勒 848300; 3.加拿大麦吉尔大学
生物资源工程系, 加拿大魁北克省圣安妮德贝勒维 H9X 3V9; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 【目的】探究预报式灌溉决策支持系统对减少新疆典型绿洲棉田土壤氮磷损失的影响。【方法】采用双因素完全随机试验, 设置 3 种灌溉决策方式(预报式灌溉(DSSIS)、墒情灌溉(SMS)、经验灌溉(E))和 2 个灌溉量水平(100%(FI)与 75%(DI)), 研究了不同灌溉决策和灌水量对土壤氮磷分布、棉花生物量、氮磷吸收和产量的影响。【结果】①经验灌溉存在硝态氮淋失问题, 预报式灌溉的硝态氮淋失风险大于墒情灌溉, 但灌溉决策的改变不会引起速效磷在各土层的差异分布。②与 E 和 SMS 处理相比, DSSIS 处理显著提高了 28.5%和 40.0%的棉花地上部全氮量。③DSSIS 处理可最大提高 33.7%的籽棉产量, 80.7%的水分生产力, 25.2%的氮肥偏生产力和 25.6%的磷肥偏生产力。【结论】预报式灌溉决策具有降低硝态氮淋失风险, 促进棉花氮吸收, 提高籽棉产量, 提高水分生产力和氮磷肥偏生产力的综合优势。

关键词: 灌溉; 硝态氮; 速效磷; 模型; 土壤

中图分类号: S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020034

OSID:



靳思佳, 齐志明, 桂东伟, 等. 预报式灌溉决策支持系统下棉田土壤氮磷的淋失与利用[J].灌溉排水学报, 2020, 40(3): 70-78.

JIN Sijia, QI Zhiming, GUI Dongwei, et al. Using Decision-support Irrigation System to Reduce Nitrogen and Phosphorus Leaching and Improve Their Uptake by Cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 40(3): 70-78.

0 引 言

【研究意义】氮、磷是作物生长所需的重要营养元素, 土壤中氮、磷养分的丰缺状况直接影响着农作物的生长。旱地农田土壤中, 氮、磷的迁移受灌溉的影响较大, 其中淋溶作用是导致养分损失的主要原因, 灌溉水是农田养分淋溶的重要驱动力^[1]。土壤对磷的固定作用比较强烈, 磷被淋溶下移的程度很小。但是, 磷肥或有机肥的大量长期施用会显著增加土壤磷的吸附饱和度, 从而降低土壤磷的吸附能力, 增加磷的迁移损失率^[2-3]。不合理的灌水管理不仅会造成肥料的大量损失, 降低氮、磷养分利用率, 还会增加农业成本,

而且严重污染了生态环境^[4-6]。因此, 合理的灌溉决策制度对促进作物生长以及保护生态环境有着重要意义。

【研究进展】氮肥施入土壤后有高达 20%~50%的部分以硝态氮的形式淋溶到深层土壤^[7]。硝态氮的淋溶主要受灌溉方式和灌水量的影响。相对于漫灌、沟灌等粗放型灌溉方式, 滴灌和喷灌可显著降低硝态氮的淋溶风险^[8]。随着灌水量的增加, 浅层土壤硝态氮逐渐减少, 深层土壤硝态氮逐渐增加^[9-10]。调亏灌溉可有效降低土壤硝态氮的下移深度, 同时供给作物充足的氮素^[11]。灌溉决策也会影响土壤硝态氮的分布, 少量多次灌溉比多量少次灌溉更能减少硝态氮的下移深度^[12]。磷的当季利用率只有 10%~15%, 其余大部分被固定于土壤中, 也有部分可溶性和颗粒态磷被淋溶损失^[13]。当土壤速效磷超过 60 mg/kg 时, 磷的淋溶就会线性增加^[14-15], 适当调亏灌溉有益于提高 0~40 cm 土层的速效磷分布量^[16]。

根区水质模型(RZWQM)是由美国农业部于 1992 年推出的农业系统作物和环境管理模型。该模

收稿日期: 2020-01-20

基金项目: 青年千人计划新疆项目(Y672071001); 美丽中国生态文明建设科技专项资助项目(XDA23060302); 国家自然科学基金项目

(U1603343, 41471031); 中国科学院新疆分院扶贫课题(KFJ-FP-201903)

作者简介: 靳思佳(1994-), 女, 甘肃张掖人。硕士研究生, 主要从事农田节水灌溉与养分淋溶研究。E-mail: jsj6023@163.com

通信作者: 齐志明(1978-), 男, 江西上饶人。副教授, 主要从事排水与灌溉工程、水文与水质模拟等研究。E-mail: Zhiming.qi@mcgill.ca

型能较好模拟不同环境下作物水分胁迫及与产量之间的响应关系,可用于指导灌溉,并在多个地方得到了较好的验证^[17-20]。Gu 等^[21]基于该模型开发了 IrrSch 灌溉决策系统软件,并应用于美国科罗拉多州的干旱区玉米和密西西比州的湿润区大豆的灌溉模拟。Chen 等^[22-23]在此基础上,建成了一套结合 IrrSch 灌溉决策软件和灌溉控制硬件的新型预报式灌溉决策支持系统(DSSIS),能够在节约灌溉用水的基础上维持作物产量,提高水分利用效率。此外,该灌溉软件指导灌水有益于保持 1 m 土层较高的土壤含水率和储水量^[24]。【切入点】该预报式灌溉系统对于灌水时间和灌溉量的精准控制是实现节水增产的关键,而灌水时间和灌溉量的变化势必会影响土壤中氮磷养分的分布变化,作物养分吸收也会因此发生变化。但是,目前该预报式灌溉系统正处于初建期,对于土壤氮磷养分的分布和利用情况尚不明确。【拟解决的关键问题】探究该新型预报式灌溉决策支持系统控制下棉田土壤硝态氮和速效磷的分布情况,以及

棉花养分吸收情况,并与基于土壤水分传感器的墒情灌溉和基于传统经验的灌溉决策方式进行比较,为田间灌溉管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验样地位于中科院新疆生态与地理研究所策勒沙漠研究站(37°01'N, 80°43'E)。该区属于暖温带大陆性荒漠气候,极端干旱,年均降水量仅 35.1 mm,年均蒸发量高达 2 595.3 mm,干燥度为 20.8。光热资源丰富,年均日照时间达 2 697.5 h,年太阳总辐射能达 604.6 kJ/cm²,年均温为 11.9 °C,无霜期长,有利于农作物的生长^[25]。土壤以风沙土为主,田间持水率在 19.63%~33.31%^[26]。农田灌溉用水主要来自策勒河和地下水。每个试验小区面积为 60 m²,小区四周铺设隔水膜防止水分横向运移。小区各土层土壤主要理化指标见表 1。

表 1 试验地土壤主要理化指标

Table 1 The main physical and chemical indicators of the soil

土壤深度/cm	砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.02~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	体积质量/ (g cm ⁻³)	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	全磷量/(g kg ⁻¹)
0~15	67.5	31.8	0.7	1.32	7.779	0.430	0.734
15~30	64.7	34.1	1.2	1.32	4.976	0.285	0.694
30~45	69.9	29.1	1.0	1.34	3.609	0.223	0.644
45~65	58.8	39.6	1.6	1.36	3.835	0.231	0.619
65~100	58.1	40.2	1.7	1.16	3.702	0.231	0.622

1.2 试验设计

试验设置 2 个控制因素,即灌溉决策方式和灌水量。其中灌溉决策方式有 3 种。

1) 基于 RZWQM2 与 IrrSch 灌溉软件相结合的预报式灌溉决策支持系统(Decision Support System for Irrigation Scheduling, 简称 DSSIS)。当 RZWQM2 预测发生水分胁迫时,由 IrrSch 灌溉软件根据系统模拟的当前土壤水分状况、根系深度、预测的未来 4 d 降雨量和田间持水率计算灌溉量,触发 1 次灌溉,水量计算式为:

$$SIA = (\theta_{fc} - \theta) \times L - \sum (R + PR_4), \quad (1)$$

式中: SIA 为建议的灌水量(cm); θ_{fc} 为田间持水率(cm³/cm³); θ 为模拟的土壤体积含水率(cm³/cm³); L 为模拟的根系长度(cm); R、PR₄ 分别为当天和未来 4 d 预测的降雨量(cm)。

其中 RZWQM2 预测土壤水分时需要的参数主要有:土壤水力学参数(土壤的饱和导水率,基于 Brooks-Corey 公式的 2 个土壤水分特征曲线参数:进气值和孔隙尺寸分布指数,以及田间持水率、凋萎系数)和作物参数(气孔导度、放射率)。这些参数已

经通过 7 a 田间试验率定得到^[27]。

2) 基于土壤水分传感器的墒情灌溉决策(Soil Moisture Sensor, 简称 SMS)。利用土壤水分传感器(SMTS-II-485)实时监测土壤水分变化,当 10 cm 土层体积含水率低于 0.06 cm³/cm³时触发灌溉,至 20 cm 土层体积含水率达 0.15 cm³/cm³时停止灌溉,其中灌溉阈值是参考 Haley 和 Dukes 的研究结果设置的^[28]。

3) 基于常规农民经验的灌溉决策(Experience, 简称 E)。灌水量有 2 个水平,即 100%的充分灌溉(Full Irrigation, 简称 FI)和 75%亏缺灌溉(Deficit Irrigation, 简称 DI),100%灌水量为相应灌溉决策的建议灌水量,75%灌水量为相应灌溉决策建议灌水量的 75%。

试验于 2019 年进行,试验供试棉花品种为新陆早 136 号,生育期在 120 d 左右,播种日期为 2019 年 4 月 6 日,播种密度约为 27 万~30 万株/hm²。播种前施入羊粪 15 383.3 kg/hm²,其中总氮量为 128.3 kg/hm²,总磷量为 44.5 kg/hm²。2019 年灌溉时间与灌水量见表 2。

表 2 2019 年不同灌溉决策下的灌溉时间与灌溉量

Table 2 Irrigation time and amount under different irrigation decisions in 2019

处理	项目	灌溉事件											合计
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
DSSIS-FI	日期	0405	0524	0617	0705	0715	0724	0803	0815	0826	-	-	-
	灌溉量/cm	10.00	4.67	5.31	5.68	6.28	6.18	6.00	6.01	6.00	-	-	56.12
DSSIS-DI	日期	0405	0524	0617	0705	0715	0724	0803	0815	0826	-	-	-
	灌溉量/cm	10.00	3.50	3.98	4.70	4.57	4.58	4.67	4.51	4.50	-	-	45.00
SMS-FI	日期	0405	0513	0605	0705	0721	0806	-	-	-	-	-	-
	灌溉量/cm	10.00	7.72	6.67	8.67	7.59	7.58	-	-	-	-	-	48.23
SMS-DI	日期	0405	0513	0605	0705	0721	0806	-	-	-	-	-	-
	灌溉量/cm	10.00	5.58	5.00	6.68	5.92	5.88	-	-	-	-	-	39.05
E-FI	日期	0405	0525	0601	0611	0622	0703	0715	0721	0731	0806	0815	-
	灌溉量/cm	10.00	6.30	8.33	8.65	10.08	9.79	9.83	9.77	9.92	9.79	10.04	102.51
E-DI	日期	0405	0525	0601	0611	0622	0703	0715	0721	0731	0806	0815	-
	灌溉量/cm	10.00	4.63	6.27	6.25	7.38	7.38	7.70	7.27	7.48	7.42	7.58	79.34

注 表中 DSSIS-FI 和 DSSIS-DI 分别为预报式的灌溉决策下的 100%和 75%灌溉。SMS-FI, SMS-DI 分别为墒情灌溉决策下的 100%和 75%灌溉。E-FI 和 E-DI 分别为常规农民经验的灌溉决策下的 100%和 75%灌溉。

1.3 田间取样与测定方法

1) 气象观测: 气象数据由站内自动气象站采集, 包括最低气温、最高气温、风速、太阳辐射、相对湿度、降雨时间及降雨量等。未来气象数据来源于 Weather Application Program Interface (API) (<http://api.openweathermap.org>)。

2) 土壤: 按照随机取样法则, 每个小区选择 3 个样点, 用直径 3 cm 的土钻按 0~15、15~30、30~45、45~65 cm 和 65~100 cm 分层收集全部土样。从 2019 年 4 月种植至 10 月收获, 每 30 d 采集 1 次, 最后 1 次取样深度加深至 100~130、130~170、170~205 cm。土样取回后逐个充分混匀, 取部分立即用烘干法测定质量含水率。另取部分鲜土过 2 mm 筛, 采用氯化钙浸提-流动分析仪法测定硝态氮。剩余部分自然风干后过 1 mm 筛, 采用碳酸氢钠浸提-紫外分光光度计法测定速效磷。

3) 作物: 选择棉花生长的几个关键生育期(苗期、蕾期、花铃期、收获期), 采集棉花植株地上部分, 每小区随机选取 3~6 株。棉花烘干后称质量, 测定地上部生物量。之后全部粉碎过 0.5 mm 筛, 测定地上部全氮和全磷量。将籽棉产量作为最终收获产量。由于田间试验中无法精准控制每块小区的实际棉花株数, 实际的地上部生物量、地上部总氮总磷量和产量会因为株数差异而存在偏差, 故选择比较分析其理论值, 具体计算方法见 1.4。

1.4 计算公式

生物量、产量、生产力计算方法为: 地上部生物量 (kg/hm^2) = 生物量 ($\text{kg}/\text{株}$) $\times$ 理论株数 ($\text{株}/\text{hm}^2$);

地上部养分量 (kg/hm^2) = 养分量 ($\text{kg}/\text{株}$) $\times$ 理论株数 ($\text{株}/\text{hm}^2$); 籽棉产量 (kg/hm^2) = 实际产量 ($\text{kg}/60 \text{ m}^2$) / 实际株数 ($\text{株}/60 \text{ m}^2$) $\times$ 理论株数 ($\text{株}/\text{hm}^2$); 灌溉水分生产力 (kg/m^3) = 籽棉产量 (kg/hm^2) / 灌溉用水量 (m^3/hm^2); 肥料偏生产力 (kg/kg) = 籽棉产量 (kg/hm^2) / 肥料纯养分的投入量 (kg/hm^2)。

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 统计整理数据, 计算均值、误差等。利用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析 (LSD, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉处理下土壤质量含水率、硝态氮和速效磷的分布情况

表 3 是棉花生长季内不同灌溉处理下的平均土壤质量含水率情况。从表 3 可以看出, 不同灌溉决策下平均土壤质量含水率有显著性差异, 而灌水量对于土壤质量含水率无显著性影响。DSSIS 和 E 处理的各土层土壤质量含水率显著高于 SMS 处理 ($P < 0.05$), DSSIS 处理与 E 处理的各土层土壤质量含水率无显著差异 ($P > 0.05$)。FI 处理与 DI 处理的各层土壤质量含水率无显著性差异 ($P > 0.05$)。DI 处理的灌水量为 FI 处理的 75%, 但土壤质量含水率差异性不显著, 可能是因为取样时土壤比较干旱。另外一个原因可能是 25% 的灌水差异, 在较大的田间系统误差下, 不能显现出统计学上的显著差异。DI 处理下的土壤质量含水率为 0.07 g/g, 比 FI 处理低 12.5%, 但是这个差异比灌水量差异 (25%) 要小, 在统计检测下也没有显著

性差异。0~100 cm 土层中，SMS 处理的土壤质量含水率最高（0.06~0.12）g/g，SMS 处理的土壤质量含水率比 E 处理低 17%~33%。

表 3 不同灌溉处理下的平均土壤质量含水率

Table 3 Average soil moisture content under different irrigation treatments

g/g

灌溉处理		土层/cm					
		0~15	15~30	30~45	45~65	65~100	0~100
灌溉决策	DSSIS	0.06±0.00 a	0.07±0.01 a	0.07±0.01 a	0.10±0.01 a	0.11±0.01 a	0.08±0.01 a
	SMS	0.04±0.00 b	0.04±0.00 b	0.05±0.01 b	0.08±0.01 b	0.09±0.01 b	0.06±0.00 b
	E	0.06±0.01 a	0.07±0.01 a	0.07±0.01 a	0.10±0.01 a	0.12±0.01 a	0.08±0.01 a
灌水量	FI	0.05±0.01 a	0.06±0.02 a	0.06±0.01 a	0.10±0.01 a	0.11±0.01 a	0.08±0.01 a
	DI	0.05±0.01 a	0.06±0.02 a	0.05±0.01 a	0.09±0.02 a	0.10±0.01 a	0.07±0.01 a
处理	DSSIS-FI	0.06±0.00 a	0.07±0.01 a	0.07±0.00 a	0.10±0.01 a	0.12±0.01 a	0.09±0.01 a
	DSSIS-DI	0.06±0.00 a	0.07±0.01 a	0.07±0.00 a	0.09±0.02 a	0.11±0.01 a	0.08±0.00 a
	SMS-FI	0.04±0.00 b	0.04±0.00 b	0.05±0.01 b	0.08±0.00 b	0.10±0.01 b	0.06±0.00 b
	SMS-DI	0.03±0.00 b	0.04±0.00 b	0.05±0.00 b	0.07±0.01 b	0.09±0.01 b	0.06±0.00 b
	E-FI	0.06±0.00 a	0.07±0.00 a	0.07±0.01 a	0.10±0.01 a	0.12±0.01 a	0.08±0.00 a
	E-DI	0.06±0.01 a	0.06±0.01 a	0.06±0.01 a	0.10±0.01 a	0.11±0.01 a	0.08±0.01 a

注 表中 DSSIS、SMS 和 E 分别为预报式灌溉决策、墒情灌溉决策和经验灌溉决策。FI 和 DI 分别为 100%充分灌溉水平和 75%亏缺灌溉水平。DSSIS-FI 和 DSSIS-DI 分别为预报式的灌溉决策下的 100%充分和 75%亏缺灌溉。SMS-FI 和 SMS-DI 分别为墒情灌溉决策下的 100%充分和 75%亏缺灌溉。E-FI 和 E-DI 分别为经验灌溉决策下的 100%充分和 75%亏缺灌溉。不同字母表示差异显著，下同。

表 4 是棉花生长季内不同灌溉处理下的平均土壤硝态氮情况。由表 4 可知，DSSIS 和 SMS 处理 0~100 cm 土层的硝态氮量显著高于 E 处理（ $P<0.05$ ），DSSIS 处理与 SMS 处理无显著差异（ $P>0.05$ ）。FI 处理与 DI 处理的硝态氮量无显著差异（ $P>0.05$ ）。不同灌溉决策中，0~15 cm 土层的硝态氮表现为 DSSIS 处理>SMS 处理>E 处理，其中 DSSIS 处理比 E 处理显著高 10.6%（ $P<0.05$ ）。45~65、65~100 cm 土层的硝态氮量表现为 SMS 处理>DSSIS 处理>E 处理，其中 SMS 和 DSSIS 处理分别比 E 处理显著高 35.1%和 19.4%、24.1%和 14.2%（ $P<0.05$ ）。0~100 cm 土层中，DSSIS 和 SMS 处理的硝态氮量更多。FI 与 DI 灌溉水

平中，0~30 cm 土层硝态氮表现为 DI 处理>FI 处理，30~100 cm 土层，FI 处理>DI 处理，但均无显著差异（ $P>0.05$ ）。DI 处理的硝态氮量在浅层土壤（0~30 cm）更多，深层土壤（30~100 cm）更少。此外，E 处理中，E-DI 处理各土层的硝态氮量始终高于 E-FI 处理。DSSIS 和 SMS 处理中，DSSIS-DI 和 SMS-DI 处理的浅层土壤（0~30 cm）硝态氮量分别大于 DSSIS-FI 和 SMS-FI 处理，深层土壤（30~100 cm）硝态氮量分别小于 DSSIS-FI 和 SMS-FI 处理。说明 DSSIS 和 SMS 处理中，DI 处理比 FI 处理更有益于提高浅层土壤中的硝态氮量，而减少深层土壤中的硝态氮量。E 处理中，DI 水平有利于提高各土层的硝态氮量。

表 4 不同灌溉处理下的平均土壤硝态氮量

Table 4 Average NO_3^- -N content under different irrigation treatments

mg/kg

灌溉处理		土层/cm					
		0~15	15~30	30~45	45~65	65~100	0~100
灌溉决策	DSSIS	15.50±0.66 a	8.69±0.61 a	4.98±0.48 b	5.48±0.36 a	6.35±0.72 a	8.20±0.31 a
	SMS	14.75±0.87 ab	8.70±0.71 a	6.20±0.66 a	6.20±0.14 a	6.90±0.53 a	8.55±0.49 a
	E	14.01±1.35 b	7.84±1.10 a	4.66±0.33 b	4.59±0.43 b	5.56±0.59 b	7.33±0.63 b
灌水量	FI	14.38±1.07 a	8.33±0.90 a	5.36±1.07 a	5.65±1.32 a	6.28±1.01 a	8.00±0.87 a
	DI	15.13±1.13 a	8.49±0.93 a	5.20±0.55 a	5.20±0.36 a	6.26±0.60 a	8.05±0.52 a
处理	DSSIS-FI	15.17±0.34 a	8.57±0.69 a	4.99±0.61 c	5.68±0.35 b	6.56±0.85 ab	8.20±0.31 ab
	DSSIS-DI	15.82±0.79 a	8.81±0.59 a	4.96±0.40 c	5.29±0.29 b	6.13±0.60 b	8.20±0.35 ab
	SMS-FI	14.47±0.70 ab	8.65±0.68 a	6.60±0.67 a	7.04±1.00 a	7.08±0.47 a	8.79±0.51 a
	SMS-DI	15.03±0.86 a	8.74±0.85 a	5.80±0.36 b	5.37±0.45 b	6.71±0.59 ab	8.31±0.39 ab
	E-FI	13.49±1.16 b	7.67±0.94 a	4.48±0.32 c	4.24±0.23 c	5.20±0.54 c	7.02±0.52 c
	E-DI	14.54±1.47 ab	8.01±1.36 a	4.84±0.27 c	4.94±0.25 bc	5.92±0.43 bc	7.65±0.63 bc

图 1 是棉花收获后土壤硝态氮在 0~205 cm 土层的残留情况。由图 1 可知, 0~205 cm 土层中硝态氮残留量, DSSIS 和 SMS 处理高于 E 处理 ($P<0.05$), 尽管 FI 处理的灌水量比 DI 处理高 25%, 但二者无显著差异 ($P>0.05$), 这表明大水漫灌的 E 处理下氮的流失量较大, 因此氮的残留量较低。不同灌溉决策中, 0~100 cm 土层的硝态氮残留量表现为 SMS 处理>DSSIS 处理>E 处理, 其中 SMS 处理比 E 处理提高 53.6% ($P<0.05$)。100~205 cm 土层的硝态氮残留量表现为 DSSIS 处理>SMS 处理>E 处理, 其中 DSSIS 处理比 E 处理提高 70.4% ($P<0.05$)。DSSIS 和 SMS 处理中, 0~100 cm 土层的硝态氮残留量, DI 处理高于 FI 处理 (即 DSSIS-DI 处理>DSSIS-FI 处理、SMS-DI 处理>SMS-FI 处理), 100~205 cm 土层的硝态氮残留量, FI 处理高于 DI 处理 (即 DSSIS-FI 处理>DSSIS-DI 处理、SMS-FI 处理>SMS-DI 处理)。E 处理中, 205 cm 以上土壤各土层的硝态氮残留量表现为 E-DI 处理>E-FI 处理。说明 DSSIS 和 SMS 处理中的 DI 水平可以将更多的硝态氮存储在 0~100 cm 土层, 从而降低硝态氮在 100~205 cm 土层的残留量。而 E 处理中, DI 水平可以提高硝态氮在 0~205 cm 土层的残留量。

表 5 是棉花生长季内不同灌溉处理下的平均土

表 5 不同灌溉处理下的平均土壤速效磷量

Table 5 Average Olsen-P content under different irrigation treatments

mg/kg

灌溉处理		土层/cm					
		0~15	15~30	30~45	45~65	65~100	0~100
灌溉决策	DSSIS	49.16±4.73 a	18.80±3.13 a	6.55±0.56 a	4.27±0.42 a	2.50±0.29 a	16.26±1.77 a
	SMS	46.48±4.02 a	18.51±1.53 a	6.39±0.59 a	4.37±0.62 a	2.42±0.20 a	15.63±1.22 a
	E	50.02±4.59 a	16.86±1.20 a	6.32±0.42 a	4.23±0.69 a	2.60±0.31 a	16.00±1.25 a
灌水量	FI	49.61±3.69 a	18.56±2.35 a	6.53±0.43 a	4.40±0.42 a	2.55±0.28 a	16.33±1.19 a
	DI	47.49±5.18 a	17.55±2.04 a	6.31±0.59 a	4.18±0.68 a	2.46±0.26 a	15.60±1.54 a
处理	DSSIS-FI	50.03±4.71 a	19.43±3.62 a	6.58±0.71 a	4.40±0.41 a	2.51±0.25 a	16.59±1.86 a
	DSSIS-DI	48.30±5.29 a	18.17±2.96 a	6.53±0.47 a	4.13±0.43 a	2.48±0.37 a	15.92±1.87 a
	SMS-FI	48.13±3.47 a	18.92±1.74 a	6.59±0.24 a	4.48±0.20 a	2.46±0.20 a	16.11±1.09 a
	SMS-DI	44.83±4.30 a	18.09±1.40 a	6.19±0.81 a	4.26±0.90 a	2.38±0.22 a	15.15±1.30 a
	E-FI	50.68±3.30 a	17.32±0.95 a	6.42±0.33 a	4.32±0.65 a	2.68±0.39 a	16.29±0.62 a
	E-DI	49.35±6.08 a	16.39±1.36 a	6.21±0.53 a	4.14±0.82 a	2.52±0.22 a	15.72±1.75 a

2.2 不同灌溉处理下的棉花地上部生物量和全氮全磷量变化

表 6 是不同灌溉处理下棉花收获期的地上部生物量、全氮量和全磷量。由表 6 可知, 收获期棉花地上部生物量表现为 E 处理>DSSIS 处理>SMS 处理, 其中 E 处理与 DSSIS 处理无显著差异 ($P>0.05$), E 和 DSSIS 处理分别比 SMS 处理显著提高了 35.3%和

壤速效磷情况。由表 5 可知, 不同灌溉决策和灌溉水平的平均土壤速效磷分布量, 无显著差异 ($P>0.05$)。与硝态氮不同, 大水漫灌的 E 处理并没有导致更多的磷的淋失。不同灌溉决策中, 速效磷在 0~100 cm 土层的分布量表现为 DSSIS 处理>E 处理>SMS 处理, 但无显著差异 ($P>0.05$)。不同灌溉水平中, FI 水平的速效磷分布量略高于 DI 水平, 也无显著差异 ($P>0.05$)。速效磷在 0~15 cm 土层分布最多 (44.83~50.68) mg/kg, 15~30 cm 土层的速效磷分布量仅有 0~15 cm 土壤层的 33.2%~40.5%, 30~100 cm 土层中速效磷量更低。

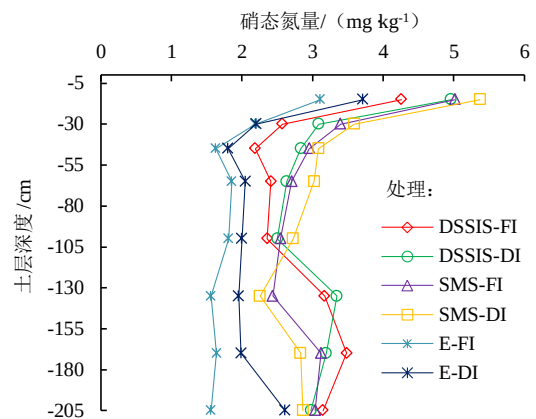


图 1 收获后的土壤硝态氮残留

Fig.1 Residual NO_3^- -N content after harvesting

26.6% ($P<0.05$)。FI 和 DI 不同灌溉水平中, FI 处理的地上部生物量高于 DI 处理, 但无显著差异 ($P>0.05$)。6 个灌溉处理中, E-FI 处理的地上部生物量最高为 10 491.26 kg/hm², SMS-DI 处理的地上部生物量最低为 7 368.67 kg/hm², E-FI 处理比 SMS-DI 处理显著提高了 42.4% ($P<0.05$)。生物量高的处理全氮全磷量也相应较高。收获期棉花地上部全氮量表

现为 DSSIS 处理>E 处理>SMS 处理, 其中 DSSIS 处理分别比 E 和 SMS 处理显著提高了 29.1%和 39.2% ($P<0.05$)。6 个灌溉处理中, DSSIS-DI 处理的地上部全氮量最高为 177.98 kg/hm², SMS-DI 处理的地上部全氮量最低为 115.97 kg/hm², DSSIS-DI 处理比 SMS-DI 处理显著提高了 53.0% ($P<0.05$)。收获期棉花地上部全磷量表现为 E 处理>DSSIS 处理>SMS

处理, 其中 E 处理比 SMS 处理显著提高了 68.8% ($P<0.05$)。6 个灌溉处理中, E-DI 处理的地上部全磷量最高为 30.85 kg/hm², SMS-FI 处理的地上部全磷量最低为 17.12 kg/hm², E-DI 处理比 SMS-FI 处理显著提高了 80.1% ($P<0.05$)。FI 处理与 DI 处理之间的地上部全氮全磷量无显著差异 ($P>0.05$)。

表 6 不同灌溉处理下棉花收获期地上部生物量、全氮量和全磷量

灌溉处理	生物量/ (kg hm ⁻²)	全氮量/ (kg hm ⁻²)	全磷量/ (kg hm ⁻²)
灌溉决策	DSSIS	9 504.67±877.23 a	174.86±12.76 a
	SMS	7 510.56±1 415.96 b	125.59±25.71 c
	E	10 159.26±958.67 a	134.41±11.64 b
灌水量	FI	9 335.90±1 535.67 a	150.06±23.02 a
	DI	8 780.42±1 610.03 a	139.84±32.06 a
处理	DSSIS-FI	9 864.00±693.29 ab	173.42±18.37 ab
	DSSIS-DI	9 145.33±985.20 abc	177.98±6.09 a
	SMS-FI	7 652.44±944.93 bc	135.13±18.38 c
	SMS-DI	7 368.67±931.74 c	115.97±31.00 c
	E-FI	10 491.26±1 158.93 a	129.17±5.37 c
	E-DI	9 827.26±711.57 ab	141.64±12.16 bc

2.3 不同灌溉处理下的棉花产量、水分和养分生产力

表 7 是各处理籽棉产量、水分和养分生产力的对比。由表 7 可知, 3 种灌溉决策中, DSSIS 的籽棉产量、水分生产力和氮磷肥偏生产力都是最高的。FI 处理和 DI 处理的籽棉产量、水分生产力和氮磷肥偏生产力无显著差异 ($P>0.05$)。籽棉产量表现为 DSSIS 处理>E 处理>SMS 处理, DSSIS 处理比 SMS 处理显著提高了 33.7% ($P<0.05$), DSSIS 处理比 E 处理提高了 12.2%, 但差异不显著 ($P>0.05$)。水分生产力

表现为 DSSIS 处理>SMS 处理>E 处理, 其中 DSSIS 处理比 E 处理显著提高了 80.7% ($P<0.05$)。氮肥偏生产力表现为 DSSIS 处理 E 处理>SMS 处理, DSSIS 处理比 SMS 处理显著提高了 25.2% ($P<0.05$), DSSIS 处理比 E 处理提高了 12.2%, 但差异不显著 ($P>0.05$)。磷肥偏生产力表现为 DSSIS 处理>E 处理>SMS 处理, DSSIS 处理比 SMS 处理显著提高了 25.6% ($P<0.05$), DSSIS 处理比 E 处理提高了 12.3%, 但差异不显著 ($P>0.05$)。

表 7 不同灌溉处理下棉花籽棉产量、水分和养分生产力

灌溉处理	籽棉产量/ (kg hm ⁻²)	水分生产力/ (kg m ⁻³)	氮肥偏生产力/ (kg kg ⁻¹)	磷肥偏生产力/ (kg kg ⁻¹)
灌溉决策	DSSIS	6 339.40±923.73 a	1.59±0.28 a	49.43±7.20 a
	SMS	4 484.93±946.31 b	1.39±0.37 a	34.97±7.38 b
	E	5 649.88±1306.17 a	0.76±0.24 b	44.06±10.21 a
灌水量	FI	5 622.69±1169.98 a	1.09±0.38 a	43.85±9.12 a
	DI	5 360.12±1440.50 a	1.40±0.50 a	41.80±11.23 a
处理	DSSIS-FI	6 506.78±1207.86 a	1.41±0.26 ab	50.74±9.42 a
	DSSIS-DI	6 172.01±676.27 ab	1.76±0.19 a	48.13±5.27 ab
	SMS-FI	4531.84±212.52 c	1.22±0.06 bc	35.34±1.66 c
	SMS-DI	4 438.02±1427.75 c	1.54±0.50 ab	34.61±11.13 c
	E-FI	5 829.44±910.66 abc	0.63±0.10 c	45.46±7.10 abc
	E-DI	5 470.32±1756.09 abc	0.88±0.29 c	42.66±13.69 abc

3 讨论

本试验研究发现 0~200 cm 土层的确态氮量, 预报式灌溉和墒情灌溉都显著大于经验灌溉。已有研究表明, 除了残留在作物根层的硝态氮可被吸收再利用, 其他土层中的硝态氮都会以淋溶或挥发的形式损失, 造成对深层土壤和大气的污染^[29]。棉花根系主要分布在 0~65 cm 土层, 预报式灌溉和墒情灌溉处理下 65 cm 土层以下的硝态氮量与 30~65 cm 土层相当, 甚至要高。由此可知, 预报式灌溉和墒情灌溉的硝态氮深层淋溶损失风险极大。经验灌溉的硝态氮量虽然在 65 cm 土层以下相对较低, 但与预报式和墒情处理下的分布趋势相同。而且在相同施氮水平下, 经验灌溉的棉花地上部全氮量显著小于预报式灌溉和墒情灌溉。说明经验灌溉下的较低的土壤硝态氮量并非棉花吸收氮素所致。因此, 3 种灌溉控制方式均存在硝态氮淋失风险。经验灌溉下硝态氮发生淋失的原因, 主要在于其灌水量大(灌水总量为 79.34~102.51 cm), 灌水次数频繁(11 次), 灌溉水分的下渗对硝态氮进行了严重淋洗。该研究结果与王平等^[30]的研究结果相似, 其表明在常规施氮下灌溉 66 cm 就会引起硝态氮在 150~200 cm 土层中的大量累积。预报式灌溉的灌水时间(共灌水 9 次)和灌水量(灌水总量为 45~56.12 cm)相对合理, 因此将更多硝态氮储存在了 100~205 cm 土层, 但也构成了极大的淋失风险。墒情灌溉的总灌水量(29.05~48.23 cm)和灌溉次数(6 次)虽然比预报式灌溉和经验灌溉都要少, 但墒情灌溉单次灌水量较大, 可能是引起硝态氮在深层土壤残留较多的重要原因。

预报式灌溉能够促进棉花地上部生物量和全氮量的增加, 提高籽棉产量、水分生产力和肥料偏生产力。此研究结果与 Chen 等^[22]对预报式灌溉系统的初步测试中, 预报式灌溉可最大节约 50%灌水量, 提高 4%籽棉产量和 80.6%水分生产力的结果相似。因为预报式灌溉的灌水时间和水量控制相对精准, 使棉田土壤水分环境处于相对适宜的稳定状态, 能够满足棉花水分需求, 保证正常的生长发育, 促进籽棉产量的提高。适宜的土壤水分环境也有利于有机肥养分的分解释放^[31], 供给棉花充足的养分。此外, 预报式灌溉下硝态氮在根层土壤的分布更多, 氮素的供应更充足。墒情灌溉的土壤含水率长时间处于亏缺状态, 棉花水分吸收受限, 有机肥养分分解缓慢, 水分和养分供应不足, 使墒情灌溉的棉花不能进行正常的生长发育, 造成棉花矮小、枝叶稀疏、结铃较少的现象^[32-33], 最终影响了籽棉产量, 也导致了较低的氮磷养分偏生产力。经验灌溉的土壤水分供应过于充足, 棉花营养生

长过盛, 影响了最终产量。此外, 经验灌溉下, 根层土壤硝态氮量较低, 影响了棉花对氮的吸收。因此, 3 种灌溉决策方式中, 预报式灌溉决策对棉花生长, 氮磷养分吸收和产量增加更具有优势作用。

4 结论

1) 经验灌溉存在硝态氮淋失问题, 预报式灌溉的硝态氮淋失风险大于墒情灌溉, 但灌溉决策的改变不会引起速效磷在各土层的差异分布。

2) 与经验灌溉和墒情灌溉相比, 预报式灌溉显著提高了 28.5%和 40.0%的棉花地上部全氮量。

3) 预报式灌溉可最大提高 33.7%的籽棉产量, 80.7%的水分生产力, 25.2%的氮肥偏生产力和 25.6%的磷肥偏生产力。

参考文献:

- [1] ZHANG Zhijian, ZHU Yinmei, WANG Ke, et al. Phosphorus behavior in soil water system of paddy field and its environmental impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(2): 229-232.
- [2] ANDREW Sharpley, HUBERT Tunney. Phosphorus Research Strategies to Meet Agricultural and Environmental Challenges of the 21st Century[J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29(1): 176-182.
- [3] 张作新, 廖文华, 刘建玲, 等. 过量施用磷肥和有机肥对土壤磷渗漏的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(6): 189-194.
ZHANG Zuoxin, LIAO Wenhua, LIU Jianling, et al. Effect of excessive application of phosphate fertilizer and organic fertilizer on soil phosphorus leakage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(6): 189-194.
- [4] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
ZHANG Weili, TIAN Zhexu, ZHANG Ning, et al. Investigation of groundwater nitrate pollution caused by agricultural nitrogen fertilizer in northern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1995, 1(2): 80-87.
- [5] RICHTER Jarg, ROELCKE Marco. The N-cycle as determined by intensive agriculture: examples from central Europe and China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1): 33-46.
- [6] ZHU Zhaoliang, CHEN Delai. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(3): 117-127.
- [7] 刘光栋, 吴文良. 高产农田土壤硝态氮淋失与地下水污染动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 91-93.
LIU Guangdong, WU Wenliang. The dynamics of soil nitrate nitrogen leaching and contamination of the groundwater in high-yield farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 91-93.

- [8] 赵付江, 赵巍, 谢松青, 等. 不同灌溉方式对茄子生长水分利用和土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 河北农业科学, 2018(3): 20-22, 41.
- ZHAO Fujiang, ZHAO Wei, XIE Songqing, et al. Effects of different irrigation methods on eggplant growth water use and soil nitrate nitrogen leaching[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2018(3): 20-22, 41.
- [9] 曲继松, 张丽娟, 冯海萍, 等. 节水控氮对黄河上游地区设施菜田氮素时空分布的影响[J]. 北方园艺, 2012(4): 37-40.
- QU Jisong, ZHANG Lijuan, FENG Haiping, et al. Effect of water saving and nitrogen control on spatial and temporal distribution of nitrogen in protected vegetable fields in the upper Yellow River[J]. Northern Horticulture, 2012(4): 37-40.
- [10] 杨梦娇. 不同灌水量及施肥量条件下硝态氮在土壤中的分布规律[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- YANG Mengjiao. Distribution of nitrate nitrogen in soil under different irrigation and fertilization conditions[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [11] 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): 168-176.
- WANG Wenliang, GUO Pengfei, HU Yuyan, et al. Effects of regulated deficit irrigation on soil moisture, nitrate nitrogen distribution and yield of spring wheat under drip irrigation in Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 168-176.
- [12] DI H J, CAMERON K C, MOORE S, et al. Nitrate leaching and pasture yields following the application of dairy shed effluent or ammonium fertilizer under spray or flood irrigation: Results of a lysimeter study[J]. Soil Use and Management, 2006, 14(4): 209-214.
- [13] 黄达, 彭继伟, 王凯. 农田土壤磷的迁移途径及控制措施[J]. 河南农业, 2015, 12(11): 18.
- HUANG Da, GUO Pengfei, HU Yuyan, et al. Farmland soil phosphorus migration and control measures[J]. Agriculture of Henan, 2015, 12(11): 18.
- [14] 王敬国. 农用化学物质的利用与污染控制[M]. 北京: 北京出版社, 2001.
- WANG Jingguo. Utilization of agricultural chemicals and pollution control[M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2001.
- [15] BLAKE L, HESKTH N, FORTUNE S, et al. Assessing phosphorus Change-Points and leaching potential by isotopic exchange and sequential fractionation[J]. Soil Use and Management, 2002, 18: 199-207.
- [16] 张步翀. 绿洲春小麦调亏灌溉对土壤磷素养分的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 26-29.
- ZHANG Buchong. Effects of regulated deficit irrigation on soil phosphorus nutrients in spring wheat field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 26-29.
- [17] SASEENDRAN S A, AHUJA L R, MA L, et al. Enhancing the water stress factors for simulation of corn in RZWQM2[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 81-94.
- [18] MA Liwang, TROUT Thomas J, AHUJA Lajpat R, et al. Calibrating RZWQM2 model for maize responses to deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 140-149.
- [19] FANG Quanyao, WANG Jianlin, YU Shunzhang. Water-saving potential and irrigation strategies for wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 37-44.
- [20] QI Zhiming, MA Liwang, BAUSCH W C, et al. Simulating maize production, water and surface energy balance, canopy temperature, and water stress under full and deficit irrigation[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 623-633.
- [21] GU Zhe, QI Zhiming, MA Liwang, et al. Development of an irrigation scheduling software based on model predicted crop water stress[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 208-221.
- [22] CHEN Xiaoping, QI Zhiming, GUI Dongwei, et al. A Model-based real-time decision support system for irrigation scheduling to improve water productivity[J]. Agronomy, 2019, 9(11): 1-18.
- [23] CHEN Xiaoping, QI Zhiming, GUI Dongwei, et al. Evaluation of a new irrigation decision support system in improving cotton yield and water productivity in an arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 136-139.
- [24] 李文珍, 齐志明, 桂东伟, 等. 不同滴灌灌溉制度对绿洲棉田土壤水热分布及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 11-16.
- LI Wenzhen, QI Zhiming, GUI Dongwei, et al. Response of water-thermal distribution and yield of cotton to different drip irrigation schedules in oasis field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 11-16.
- [25] 曾凡江. 策勒绿洲生态系统的可持续发展对策[J]. 干旱区研究, 1999(1): 29-34.
- ZENG Fangjiang. Countermeasures for sustainable development of Celle Oasis Ecosystem[J]. Arid Zone Research, 1999(1): 29-34.
- [26] SHAREEF Muhammad, GUI Dongwei, ZENG Fangjiang, et al. Water productivity, growth, and physiological assessment of deficit irrigated cotton on hyperarid desert-oases in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206: 1-10.
- [27] LIU Che, QI Zhiming, GU Zhe, et al. Optimizing irrigation rates for cotton production in an extremely arid area using RZWQM2-simulated water stress[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(6): 2 041-2 052.
- [28] HALEY M B, DUKES M D. Validation of landscape irrigation reduction with soil moisture sensor irrigation controllers[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 138(2): 135-144.
- [29] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
- JU Xiaotang, ZHANG Fusuo. Soil nitrate accumulated and environmental effect of north of China[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 24-28.
- [30] 王平, 陈新平, 张福锁, 等. 不同水氮处理对棉田氮素平衡及土壤硝

- 态氮移动的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 946-955.
- WANG Ping, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen balance in cotton fields and soil nitrate nitrogen movement[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(5): 946-955.
- [31] 林明海, 黎娟冰, 熊国根. 红壤旱地与水田条件下有机肥的转化[J]. 土壤通报, 1985(5): 215-218.
- LING Minghai, LI Juanbing, XIONG Guogen. Transformation of organic fertilizer under red soil dry land and paddy field conditions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1985(5): 215-218.
- [32] 肖俊夫, 刘祖贵, 孙景生, 等. 不同生育期干旱对棉花生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 1999(1): 24-28.
- XIAO Junfu, LIU Zugui, SUN Jingsheng, et al. Influences of water stress at different growing stages on growth, development and yield in cotton [J]. Irrigation and Drainage, 1999(1): 24-28.
- [33] 杨九刚, 何继武, 马英杰, 等. 灌水频率和灌溉定额对膜下滴灌棉花生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2011 (3): 29-32.
- YANG Jiugang, HE Jiwu, MA Yingjie, et al. Effects of irrigation frequency and quota on cotton growth and yield with drip irrigation under plastic film[J]. Water Saving Irrigation, 2011(3): 29-32.

Using Decision-support Irrigation System to Reduce Nitrogen and Phosphorus Leaching and Improve Their Uptake by Cotton

JIN Sijia^{1,2,4}, QI Zhiming^{1,2,3*}, GUI Dongwei^{1,2}, LI Xiangyi^{1,2}, ZENG Fanjiang^{1,2}, CHEN Xiaoping^{1,2,4}

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Cele National Station of Observation and Research for Desert-grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele 848300, China; 3. Department of Bioresource Engineering, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9, Canada; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Background】 A new irrigation support system has been developed based on water stress predicted by the root zone water quality model (RZWQM2) to aid irrigation scheduling; it has been tested since 2016 for cotton fields in an oasis in Xinjiang. 【Objective】 The purpose of this paper is to examine the efficacy of the system for predicting leaching and root uptake of nitrate and phosphorus (Olsen-P) against an experiment conducted in 2019 at a cotton field, in efforts to further test if the system can reduce nutrients leaching and improve their uptake by crop compared to traditional irrigation and fertigation methods. 【Method】 The experiment consisted of three decision-aid irrigation methods: irrigation based on the new system (DSSIS), irrigation based on soil moisture dynamics (SMS) and traditional irrigation method used by local farmers (E), and two irrigation levels: keeping soil moisture at 100% (FI) and 75% (DI) of the field capacity (DI) respectively. All treatments were organized in two-factor randomized blocks in the field. In each treatment, we measured $\text{NO}_3^- \text{N}$ and Olsen-P in the soil, cotton biomass, nitrogen and phosphorus in the cotton, as well as the cotton yield. 【Result】 ① Traditional irrigation was more likely to result in $\text{NO}_3^- \text{N}$ leaching, and the risk of $\text{NO}_3^- \text{N}$ leaching in DSSIS was higher than that in SMS. However, changing irrigation methods did not lead to a noticeable difference in Olsen-P distribution in the soil. ② Compared with E and SMS, DSSIS increased nitrogen content in the above-ground part of the cotton by 28.5% and 40.0% respectively. ③ DSSIS increased the yield of cotton seed by 33.7%, water productivity by 80.7%, partial productivity of nitrogen and phosphorus by 25.2% and 25.6% respectively. 【Conclusion】 DSSIS not only reduced the risk of $\text{NO}_3^- \text{N}$ leaching and promoted root nitrogen uptake, it also improved seed yield, water productivity and partial productivity of both nitrogen and phosphorus fertilizers.

Key words: irrigation; $\text{NO}_3^- \text{N}$; Olsen-P; model; soil

责任编辑: 韩 洋