

施肥对淡灰钙土春玉米产量和土壤水盐运移的影响

梁锦秀, 赵 营, 郭鑫年, 周 涛

(宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002)

摘 要:在宁夏灌区淡灰钙土上,通过田间试验的方法,研究了喷灌和漫灌条件下不同氮磷钾施用量对春玉米产量和土壤水盐运移动态的影响。结果表明:不同施肥处理的平均产量为 $6.9 \sim 13.2 \text{ t/hm}^2$, 变异系数为 $2.7\% \sim 13.6\%$ 。相对于对照处理,不同氮磷钾配比都能显著提高产量(不施氮肥处理除外, $P < 0.05$),增产率为 $12.7\% \sim 92.5\%$ 。氮磷钾施用量与春玉米产量都服从二次曲线关系,增产效应为氮肥 $>$ 钾肥 $>$ 磷肥。在玉米生育期内,喷灌更有利于 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 50 \text{ cm}$ 土层土壤水分分布的均匀性,而漫灌造成土壤水分向深层 $50 \sim 80 \text{ cm}$ 运移。在喷灌条件下,土壤盐分通常表聚在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层,其最高含量可达 2.11 g/kg ,而漫灌使盐分向深层土壤运移, $50 \sim 80 \text{ cm}$ 土层盐分含量达 $0.53 \sim 1.07 \text{ g/kg}$ 。因此,在淡灰钙土春玉米种植条件下,喷灌配合氮磷钾施肥可显著增产,但其对耕层土壤的洗盐效果不及漫灌施肥。

关键词:喷灌施肥; 淡灰钙土; 春玉米; 产量; 土壤水盐运移

中图分类号: S513; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)05-0126-06

Effect of Fertilization and Sprinkling Irrigation on the Yield of Spring Maize and Soil Water and Salt Movement in Light Sierozems

LIANG Jin-xiu, ZHAO Ying, GUO Xin-nian, ZHOU Tao

(Institute of Agricultural Resources and Environment,

Ningxia Academy of Agriculture and Forestry, Yinchuan 750002, China)

Abstract: A field experiment was conducted in light sierozems soil to study the effects of flood irrigation, sprinkling irrigation and different N, P_2O_5 , K_2O application rates on the yield of spring maize and the dynamics of soil water and salt in the Yellow River Irrigation Region. The results showed that the yield of spring maize ranged from 6.9 to 13.2 t/hm^2 , and coefficient of variation of ranged from 2.4% to 13.6% . In contrast to treatment CK (no any fertilizers), there were significant differences ($P < 0.05$) found in different combination of N, P_2O_5 , K_2O rates (except in treatment of no N fertilizer), the yield increment ranged from 12.7% to 92.5% . Quadratic relationships were used to describe the relations between N, P_2O_5 , K_2O rates and the spring maize yield, and the yield increasing effect was $\text{N} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{K}_2\text{O}$. During the growing period of spring maize, sprinkling irrigation was benefit for soil water distribution uniformity in both $0 \sim 20 \text{ cm}$ and $20 \sim 50 \text{ cm}$ soil depth, but soil water moved to deep soil of $50 \sim 80 \text{ cm}$. Soil salt always accumulated in topsoil of $0 \sim 20 \text{ cm}$ under the sprinkling irrigation condition, and the highest soil salt content was found with 2.11 g/kg . However, soil salt moved to deep soil of $50 \sim 80 \text{ cm}$ under the flood irrigation condition, and which ranged from 0.53 to 1.07 g/kg . Therefore, sprinkling irrigation and combination applying of N, P_2O_5 , K_2O fertilizers could significantly increase crop yield, but salt movement from topsoil with sprinkling irrigation was less than that with flood irrigation.

Key words: sprinkling irrigation and fertilization; light sierozems; spring maize; yield; soil water and salt movement

收稿日期: 2013-11-08

修回日期: 2014-01-06

资助项目: 国家自然科学基金“生物质炭对于扬黄灌区土壤水分运动和利用的影响机理与效应”(51269025); 宁夏回族自治区农业综合开发办项目“耕地地力提升及多元养分调控技术集成与推广”课题(NFKJ-2012-04)

作者简介: 梁锦秀(1962—), 女, 宁夏银川市人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为植物营养。E-mail: liangjinxu0951@163.com

通信作者: 周涛(1966—), 男, 重庆巴县人, 研究员, 理学博士, 主要研究方向为土壤生态与植物营养。E-mail: zhoutao6084609@163.com

喷灌作为一种新型的灌溉技术,已经被广泛应用于农业生产中。发达国家都非常重视喷灌技术的研究与应用,以色列在 20 世纪 90 年代初就已经全部实现了喷灌和微灌,两者分别占 25%和 75%^[1]。我国自 20 世纪 70 年代开始引进和推广喷灌技术以来,无论在喷灌设备的研制与生产还是在不同作物喷灌制度建立等方面都取得了较快的发展。截至 2002 年底,我国喷灌和微灌面积达 246.7 万 hm²,占节水灌溉面积的 13.2%,占有效灌溉面积的 4.4%^[2]。相对于常规大水漫灌,喷灌对土壤水分均匀度和养分运移特征的影响都有较大差异。Li 和 Kawano^[3]利用二维模型研究了土壤初始含水率及其分布、灌水定额、喷灌强度等要素对土壤水分分布的影响,发现喷灌水在土壤中分布均匀性在很大程度上取决于初始土壤水分分布的均匀性。刘海军等^[4]对喷灌条件下冬小麦进行了田间试验,建立相对产量和相对耗水量的模型,并提出了喷灌冬小麦的灌水定额为 450.5 m³/hm²。Stern 和 Bresler^[5]在喷灌条件下,研究了不同灌水均匀系数对玉米田土壤含水率在作物根区分布的影响,发现土壤水分分布比喷灌水深的分布更加均匀。Allaire-Leung 等^[6]通过两年的田间试验,发现土壤中沿喷灌支管的硝态氮含量比两个喷头之间的值大,但是硝态氮淋失量却没有显著的增大,土壤剖面中硝态氮的含量随深层渗漏的增加而增大。Pang 等^[7]通过 CERES-Maize 模型研究了不同灌水量、均匀度、施氮量和时间对作物产量和氮素淋失量的影响,认为灌水均匀度在 90%以上时对产量和深层渗漏的影响都不太显著,但是当其降低到 75%以下时,将会导致深层渗漏的增加,产量降低。另外一些研究发现^[8-9],喷灌水进入到作物冠层以后进行再分配,使得冠层下面的灌水均匀度要大于冠层上面的灌水均匀度,因此土壤水分分布与作物冠层下面的灌水均匀度密切相关。

宁夏灌区是西北地区重要的商品粮基地,春玉米是该区优势特色作物。农民传统的施肥和大水漫灌方式,导致水肥利用率较低,农业生产效益低,生态环境污染加剧^[10-11]。宁夏灌区取水总量为 73.587 亿 m³,其中农业取水量 66.978 亿 m³,占总取水量的 91.0%^[12],随着黄委会对宁夏配水额度的减少,农业节水灌溉成为未来的发展方向。喷滴灌等节水技术

成为宁夏灌区农业发展的新模式,尤其是在黄河冲积平原两侧的高阶地和洪积扇形成的淡灰钙土地区,如贺兰山东麓,该区域是宁夏灌区制种春玉米的主产区。由于制种春玉米的主产区淡灰钙土质地偏砂性,其保水保肥能力差,喷灌技术在近几年得到快速的发展。大多数研究集中探讨了喷灌或施肥对作物产量、土壤水分和养分分布特征^[3-9],但在宁夏灌区淡灰钙土区域,喷灌条件下施肥对制种春玉米产量和土壤水盐运移的研究还未见报道。因此,本文通过田间试验,探讨同等喷灌条件下,不同氮、磷、钾施用量对春玉米产量、土壤水分和盐分动态变化规律的影响,提出合理的春玉米氮、磷、钾推荐施肥量,为宁夏灌区春玉米喷灌施肥提供合理的水肥管理策略。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏灌区永宁县黄羊滩农场制种春玉米生产基地,该地属贺兰山东麓山前洪积平原。该地气候特点是干旱少雨、蒸发强烈、光照充足、热量丰富、无霜期短和温差大,年均降水小于 200 mm。土壤类型为淡灰钙土,多为砂壤土,0.4 m 以上为轻砂壤土,而 0.4 m 以下为粗砂土,土壤保水保肥性差。表土 0—20 cm 土壤盐分为 1.0 g/kg,有机质含量为 9.6 g/kg,全氮、全磷和全钾分别为 0.4、0.5、19.8 g/kg,有效磷和速效钾含量分别为 7.1、131.8 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用三元二次回归最优设计,即 N、P、K 三个因素,12 个处理见表 1,各处理随机排列,重复 3 次,小区面积 20 m²。氮肥为尿素(N,46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅,46%),钾肥为硫酸钾(K₂O,52%)。氮肥分拔节孕穗期(5 月下旬)、大喇叭口期(6 月中下旬)、抽雄期(7 月上旬)3 次施入,比例分别为 25%、50%、25%;磷、钾肥在拔节前一次性施入。春玉米品种为郑大 12,4 月 1 日播种,9 月 29 日收获,栽培密度为 7.5 万株/hm²。春玉米生育期间的田间灌水采用喷灌方式,播种 4 月初至 5 月初,该区域土壤处于解冻状态,该阶段不进行灌溉。5—9 月的玉米生育期间,根据土壤水分含量和玉米需水规律确定每次灌水定额,用水表测定每次灌水用量(见图 1)。

表 1 不同氮磷钾施用量 kg/hm²

养分	处 理											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	0	0	84	84	300	300	300	300	300	516	516	600
P ₂ O ₅	0	225	63	387	0	225	225	225	450	63	387	225
K ₂ O	0	112.5	337.5	337.5	112.5	225	450	0	112.5	337.5	337.5	112.5

注:肥料用量指纯养分量。

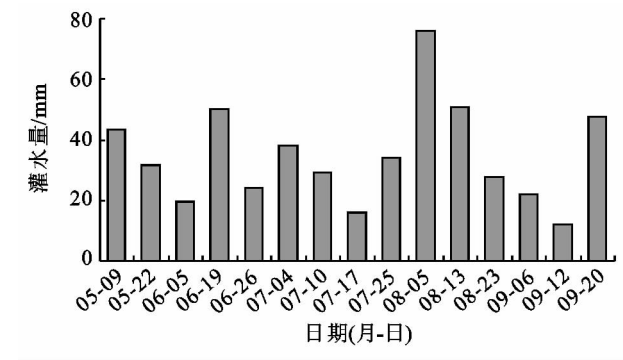


图 1 春玉米生育期期间喷灌灌水用量

1.3 样品采集与测定

1.3.1 玉米产量统计 按小区全区收获玉米,脱粒烘干法测含水量,统计其经济产量。

1.3.2 土壤样品采集与测定 由于各小区喷灌量一致,以当地漫灌处理(灌水量根据习惯方式决定,每次漫灌量 105~150 mm,明显高于喷灌的 15.9~76.0 mm,见图 1)为对照,在春玉米播种至收获期内,定期每 10~15 天 1 次对 0—20 cm,20—50 cm、50—80 cm 土壤采集 5 点混合样,采用重量法(105℃烘干称重)

测定土壤含水量(灌水前后、雨前雨后加测)。同时,玉米生育期间 5—9 月份,也以当地漫灌和常规施肥为对照,在不同施肥处理下(处理 2 和处理 6)定期测定不同剖面土壤盐分含量(电导法)。

1.4 数据处理与统计

文中数据都采用 Excel 2007 和 DPS 5.01 软件进行统计分析,显著水平为 5%。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾施用量对春玉米产量的影响

从表 2 可以看出,不同氮磷钾施用量处理间春玉米产量存在显著性差异,其平均产量 6.9~13.2 t/hm²,变异系数为 2.7%~13.6%。平均产量最低的为处理 1 和 2,分别只有 6.9,7.7 t/hm²,都显著低于其它氮磷钾配比处理。玉米平均产量最高为处理 7,达 13.2 t/hm²,其次是处理 10,6,11,分别为 13.1,12.8,12.5 t/hm²,但这 4 个处理间差异不显著。相对于处理 1(不施肥),其它不同氮磷钾配比可增产 12.7%~92.5%。

表 2 氮磷钾施用量对淡灰钙土春玉米产量的影响

处理	N/(kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)	K ₂ O/(kg·hm ⁻²)	平均产量/(t·hm ⁻²)	变异系数/%	5%显著水平
1	0	0	0	6.9	8.0	e
2	0	225	112.5	7.7	10.8	e
3	84	63	337.5	9.2	13.0	d
4	84	387	337.5	10.4	7.1	cd
5	300	0	112.5	10.9	8.9	c
6	300	225	225	12.8	13.6	a
7	300	225	450	13.2	5.1	a
8	300	225	0	10.1	7.0	cd
9	300	450	112.5	11.2	9.4	bc
10	516	63	337.5	13.1	3.6	a
11	516	387	337.5	12.5	2.7	a
12	600	225	112.5	12.4	6.6	ab

已有研究表明^[13],在淡灰钙土上种植玉米,氮磷钾配合较习惯施肥能显著提高玉米的果穗数、株高、穗长、穗行数、行粒数、穗粒数和百粒重等农艺性状指标,从而达到增产的目的,这与本试验产量结果一致。也有很多研究认为^[14-16],适当增施钾肥、氮肥形态和施氮运筹模式等都会对春玉米产量、氮素吸收和利用产生影响,甚至达显著水平,但这些研究都是基于常规大水漫灌条件的结果,而对于不同土壤类型区域喷灌条件下氮磷钾肥合理配施及肥料运筹方式对春玉米产量的影响还有待加强。

2.2 春玉米产量的单因子效应与推荐施肥量

通过不同氮磷钾施用量下春玉米产量的回归分析,可得到氮磷钾肥单因子效应方程(见表 3),计算

氮磷钾肥的最佳经济产量施用量与最高产量施用量。结果表明,氮磷钾施用量与春玉米产量分别都服从二次曲线关系,氮磷钾肥单因子效应方程相关系数 R²分别为 0.807,0.144,0.333,这表明氮、磷、钾肥施用中,氮肥是春玉米增产的第一关键施肥因子,其次是钾肥和磷肥。与喷灌不同,在滴灌条件下,栽培密度对春玉米产量的影响最为重要^[17];氮磷钾配施可以改善春玉米的农学性状,从而提高其产量^[14,18]。

本试验条件下,由于是喷灌施肥,且春玉米产量水平很高,单因子效应方程计算结果表明,氮、磷、钾的最高产量施肥量分别为 N 513,P₂O₅ 304,K₂O 418 kg/hm²,相应的最佳经济产量施肥量分别为 N 450,P₂O₅ 228,K₂O 348 kg/hm²,其施用量都明显高于武

鹏、彭畅、陈海军等人的推荐用量^[14,16,18]。这可能一方面是由于土壤条件差异造成,试验地淡灰钙土土壤肥力偏低,加上其漏水漏肥严重,为保证较高的作物产量,需要更多的肥料投入。另一方面是灌水方式不同,再加上玉米品种、生长特性和养分吸收利用的差异等,造成施肥量推荐结果的差异较大。但这仅是在本试验条件获得施肥推荐量,更加合理的氮磷钾施用

量还需要通过春玉米目标产量、土壤养分供应和作物养分需求规律确定。

因此,对喷灌条件下淡灰钙土春玉米的生长发育动态规律、养分吸收利用规律和合理施肥等研究仍需进一步深入探讨。单从产量的角度考虑(表2),本试验氮、磷、钾的合理施用量分别为 N 300 kg/hm², P₂O₅ 225 kg/hm², K₂O 225~450 kg/hm²。

表3 春玉米氮磷钾肥单因子效应方程和推荐施肥量

养分	单因子效应方程		最高产量施肥量 ⁽¹⁾ /(kg·hm ⁻²)	最佳经济施肥量/(kg·hm ⁻²)
N ⁽²⁾	Y=7662+19.50N-0.019N ²	R ² =0.807	513	450
P ₂ O ₅	Y=9440+13.97P-0.023P ²	R ² =0.144	304	228
K ₂ O	Y=8797+15.90K-0.019K ²	R ² =0.333	418	348

注:1)当季春玉米收购价格为1.8元/kg;2)N、P₂O₅、K₂O价格分别为4.24、6.24、4.80元/kg。

2.3 喷灌施肥对土壤水分运移动态的影响

在春玉米生育期内,无论喷灌还是漫灌条件下,0—20,20—50,50—80 cm 土层土壤水分都呈动态变化(图2)。图2a可以看出,漫灌和喷灌条件下,0—20 cm 土壤水分含量分别在7.4%~19.5%和6.4%~18.5%之间,最高峰值都出现在8月7日前后(春玉米大喇叭口期),随后由于玉米开始较高的耗水量,其土壤含水量迅速降低到10%左右,当两种灌溉条件下表层土壤水分动态变化趋势基本一致,由于该区域年降水量低于200 mm,其表层土壤含水量与当地灌水管理密切相关。图2b显示,漫灌和喷灌条件下,20—50 cm 土壤水分含量分别为6.6%~19.1%和6.7%

~16.9%,土壤含水量高峰也都出现在8月7日前后,玉米全生育期的动态趋势与0—20 cm 土壤水分极其相似。图2c表明,漫灌和喷灌对50—80 cm 深层土壤含水量的影响差异明显,二者分别为5.3%~21.1%和5.4%~13.1%,同一调查时期,漫灌条件下深层土壤含水量通常比喷灌的高0.3%~13.3%,说明大水漫灌下土壤水分向深层的下移明显。两种灌溉方式对0—20 cm 和20—50 cm 土层土壤水分灌溉均匀度的影响也有差异,漫灌和喷灌条件下,两个土壤剖面土壤含水量差异分别为0.3%~5.6%和0.2%~3.6%,相比之下,喷灌更有利于土壤水分分布的均匀性。

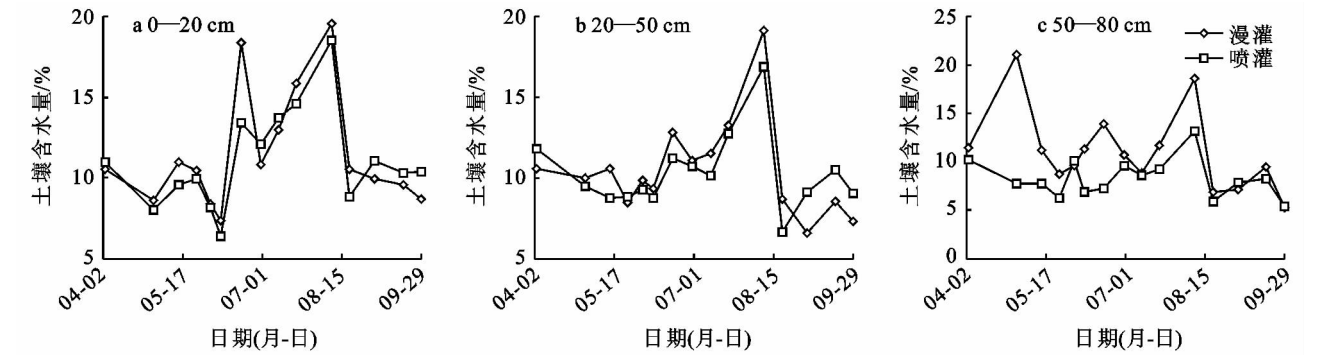


图2 春玉米生育期间喷灌和漫灌下不同土层土壤水分含量动态

由于本试验土壤为砂质壤土,漫灌对0—20 cm, 20—50 cm 和深层50—80 cm 土壤水分含量均有较大影响。但喷灌主要影响0—20,20—50 cm 土层土壤水分,这与李银科等^[19]在甘肃石洋河流域研究结果基本一致,他认为雨季降水或灌水对土壤水分的贡献主要在10—40 cm 土层。从图2还可以看出,在春玉米播种后至4月底,该地区土壤处于解冻状态,0—20,20—50,50—80 cm 各层土壤水分含量保持在10%左右。随着后期玉米苗快速生长对水分需求增加和地表蒸发加强,5月上旬开始了喷灌和漫灌灌水,各层土壤水分含量分布总体是0—20 cm 最高,其次是20—50 cm,

50—80 cm 最低。无论漫灌还是喷灌下,玉米处于生育高峰(大喇叭口期),其需水量也显著增加,都降低了0—20 cm 和20—50 cm 土层土壤水分含量。Saffigna等^[20]研究发现,高频率小定额的喷灌灌水,可以保证在产量相同的情况下,灌水量仅为其它灌水量的二分之一,其土壤湿润深度达到了45 cm,本试验砂壤土条件下,其湿润深度可能会达到50 cm。由此可见,土壤剖面水分分布与灌水方式、灌水量(参见图1)、玉米生长发育对水分需求量等因素密切相关。

2.4 喷灌施肥对土壤盐分运移动态的影响

硫酸钾等钾肥施用对土壤盐分含量的影响较大,

而当地常规施肥主要以二铵和尿素为主,因此,本文以漫灌常规施肥为对照,探讨施 K_2O 112.5 kg/hm² (处理2)和 225 kg/hm² (处理4)对土壤剖面盐分运移的影响。对漫灌常规施肥和喷灌施肥条件下土壤盐分运移的动态监测结果如图3所示。图3a表明,在玉米生育期期间,漫灌+常规施肥、喷灌+施肥处理2、喷灌+施肥处理6下,0—20 cm 土层土壤养分含量分别在 0.34~1.27, 0.73~1.61, 0.57~2.11 g/kg 之间。就灌溉方式而言,漫灌条件下表层土壤盐分在不同时期都低于喷灌方式,其土壤最高盐分含量仅为 1.27 g/kg,说明漫灌对表层土壤的洗盐效果相对较好。喷灌条件下,施肥对表层土壤盐分累积也有不同程度影响,施肥处理6下土壤盐分累积通常高于施肥处理2,尤其是在玉米生育后期表现更为明显。漫灌和喷灌条件下,玉米生育关键期(大喇叭口、灌浆到收获)的耗水急剧增加,再加上灌水频率减少和地表增加强烈,土壤水分降低较快(参见图2a),造成表层土壤盐分表聚现象严重。由图3b可以看出,漫灌常规施肥或喷灌施肥对20—50 cm 土层土壤盐分含量动态的影响明显低于表层土壤,不同时期的差异不大,漫灌+常规施肥、喷灌+施肥处理2、喷灌+施肥

处理6, 20—50 cm 土层土壤养分含量分别为 0.30~0.50, 0.37~0.77, 0.50~0.83 g/kg, 总体而言,喷灌施肥处理稍高于漫灌常规施肥。值得注意的是,漫灌常规施肥造成 50—80 cm 土层土壤盐分累积达 0.53~1.07 g/kg, 都高于喷灌施肥处理2和处理6的 0.35~0.89 g/kg (图3c)。这说明漫灌洗盐可使盐分向深层土壤运移,其与土壤水分的运移规律一致;而在喷灌条件下,土壤盐分向下层土壤运移很有限,盐分表聚现象时有发生。

姚宝林等^[21]研究表明,不同水质滴灌的洗盐效果主要集中在表层 0—40 cm 的垂直方向,且土壤盐分累积主要集中在 0—30 cm 范围内,这与本试验喷灌造成盐分表聚的结果基本一致。不同的灌溉方式对土壤盐分垂直分异有显著的影响^[22],常规的灌溉方式在灌溉后短时间内表层土壤发生脱盐,但随后土壤水分蒸发强烈,容易导致盐分的积聚,本试验玉米生育后期也有类似结果。本试验喷灌施肥条件下,土壤盐分主要表聚累积在 0—20 cm 土层,与常规灌溉和滴灌对盐分运移特征影响不同,同一类型区土壤和气候条件下,喷灌、滴灌和常规灌溉对土壤盐分运移的影响规律还需深入探讨。

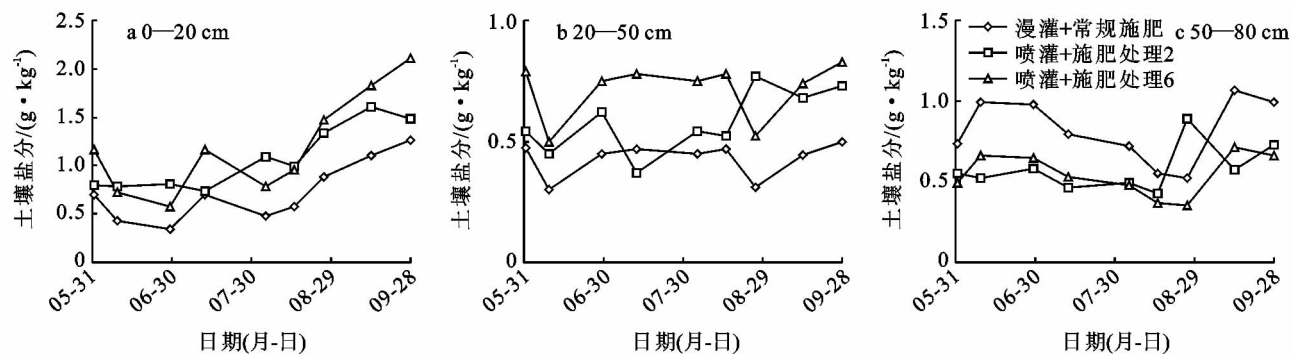


图3 春玉米生育期间喷灌和漫灌施肥下不同土层土壤盐分含量动态

3 结论

(1) 氮磷钾施用量对春玉米产量的影响。不同氮磷钾施用量处理间春玉米产量统计结果表明,相对于不施肥处理(处理1),除不施氮肥处理(处理2)外,不同氮磷钾配比均可显著提高产量,增产率为12.7%~92.5%。不同施肥处理的平均产量为 6.9~13.2 t/hm²,变异系数为 2.4%~13.6%。

(2) 春玉米产量的单因子效应与推荐施肥量。氮磷钾施用量与春玉米产量都服从二次曲线关系,单因子效应方程相关系数 R^2 分别为 0.807, 0.144, 0.333, 增产效应为氮肥>钾肥>磷肥。最高产量施肥量分别为 N 513, P_2O_5 304, K_2O 418 kg/hm²,最佳经济产量施肥量分别为 N 为 450 kg/hm², P_2O_5 为

228 kg/hm², K_2O 为 348 kg/hm²。

(3) 喷灌施肥对土壤水分运移动态的影响。在玉米生育期内,漫灌或喷灌条件下,不同土层土壤水分含量都呈动态变化,土壤剖面水分分布与灌水方式、灌水量、玉米生长发育对水分需求量等因素密切相关。喷灌更有利于 0—20 cm 和 20—50 cm 土层土壤水分分布的均匀性,而漫灌造成深层 50—80 cm 土壤含水量增加。

(4) 喷灌施肥对土壤盐分运移动态的影响。在玉米生育期内,漫灌常规施肥和喷灌施肥对土壤盐分运移的影响有较大差异。漫灌施肥对表层土壤的洗盐效果好于喷灌施肥,其表层最高土壤盐分含量仅 1.27 g/kg。漫灌可使盐分向深层土壤运移,50—80 cm 土层土壤盐分含量达 0.53~1.07 g/kg,而在喷灌

条件下,土壤盐分通常表聚在 0—20 cm 土层。喷灌施肥条件下,0—20 cm 土层土壤盐分含量通常都高于 20—50 cm 和 50—80 cm 土层,盐分表聚时最高含量可达 2.11 g/kg。

参考文献:

[1] 胡毓骥. 中国农业科学院科技代表团访问以色列考察报告[J]. 灌溉排水,1995,14(1):52-59.

[2] 逢焕成. 我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J]. 中国土壤与肥料,2006(5):1-6.

[3] Li J, Kawano H. Sprinkler water utilization efficiency [J]. Journal of International Rainwater Catchment Systems,1997,3(1):41-51.

[4] 刘海军,龚时宏,王广兴. 喷灌条件下冬小麦生长及耗水规律的研究[J]. 灌溉排水,2000,19(1):26-29.

[5] Stern J, Bresler E. Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield[J]. Irrigation Science,1983,4(1):17-29.

[6] Allaire-Leung S E, Wu L, Mitchell J P, et al. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field[J]. Agricultural Water Management,2001,48(1):37-50.

[7] Pang X P, Letey J, Wu L. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(1):257-261.

[8] Li J. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system[J]. Agricultural Water Management,1998,38(2):135-146.

[9] Steiner J L, Kanemasu E T, Clark R N. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1983,26(4):1128-1134.

[10] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J].

Science,2009,323(5917):1014-1015.

[11] 杨淑静,张爱平,杨正礼,等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. 中国农业科学,2009,42(11):3947-3955.

[12] 宁夏回族自治区水文水资源勘测局. 宁夏回族自治区水资源公报[M]. 银川:宁夏回族自治区水利厅,2011.

[13] 任福聪,张彦茹. 不同配方肥对春玉米产量及农艺性状的影响[J]. 宁夏农林科技,2012,53(5):8-10.

[14] 武鹏,曹国军,耿玉辉,等. 不同施钾量对春玉米产量及钾素吸收积累的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3324-3326.

[15] 谢佳贵,韩晓日,王立春,等. 不同施氮模式对春玉米产量、养分吸收及氮肥利用率的影响[J]. 玉米科学,2013,21(2):135-138.

[16] 彭畅,刘晓斌,尹彩侠,等. 不同形态氮肥及其运筹对春玉米产量和农艺性状的影响[J]. 核农学报,2013,27(4):509-514.

[17] 王圣毅,成华伟,李丽. 滴灌条件下不同栽培密度对春玉米产量的影响研究[J]. 农业科技通讯,2013(5):54-57.

[18] 陈海军,邹德堂,巩双印,等. 氮磷对极早熟春玉米产量和农艺性状的影响[J]. 黑龙江农业科学,2011(8):32-34.

[19] 李银科,刘世增,刘虎俊,等. 石羊河流域中下游沙漠—河岸过渡带土壤特征研究[J]. 水土保持研究,2012,19(6):29-35.

[20] Saffigna P G, Tanner C B, Keeney D R. Non-uniform infiltration under pot at o canopies caused by interception, stemflow, and hilling [J]. Agron J., 1976, 68: 337-342.

[21] 姚宝林,叶含春,孙三民,等. 红枣滴灌条件下灌水水质对土壤盐分分布的影响研究[J]. 水土保持研究,2011,18(2):218-221.

[22] 许尔琪,张红旗,许咏梅. 伊犁新垦区土壤盐分垂直分异特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(7):71-77.

(上接第 125 页)

[7] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):10-13,18.

[8] 李进鹏,王飞,穆兴民,等. 延河流域土地利用变化对其生态服务价值的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(3):110-114.

[9] 徐学华,张金柱,张慧,等. 太行山片麻岩区植被恢复过程中物种多样性与土壤水分效益分析[J]. 水土保持学报,2007,21(2):133-136,174.

[10] 刘承,王玉宽,傅斌,等. 紫色土不同土地利用方式下降雨入渗试验研究[J]. 水土保持研究,2009,16(3):20-23.

[11] 王亮. 人工模拟降雨条件下紫色土养分流失研究[M]. 重庆:西南大学,2009.

[12] 赵伟,杨培岭,李海山,等. 呼伦湖流域 3 种利用方式草场水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9):220-225.

[13] 付伟章,史衍玺. 模拟降雨条件下肥料品种与施肥方式对氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(3):14-17.

[14] 张会茹,郑粉莉,耿晓东. 地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):52-54,59.

[15] 黄满湘,章申,张国梁,等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报,2003,58(1):147-154.