文章编号:1000-7601(2020)06-0112-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.06.16

局部根区滴灌与穴施尿素对土壤氮素空间分布的影响

韩国君,陈年来,褚 润,孙小妹,任建新,张 莉

(甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为研究节水灌溉条件下穴施尿素、滴灌施肥对土壤铵态氮、硝态氮和碱解氮运移的影响,2019 年在甘肃农业大学遮雨棚内开展施肥与灌溉试验,采用穴施尿素和滴灌施肥两种施肥方式,施纯氮量 240 kg·hm^{-2}和 180 kg·hm^{-2},充分灌溉量和局部根区滴灌量分别是 14 L 和 7 L。测定在距离滴头水平 30 cm、垂直 40 cm 范围内土壤铵态氮、硝态氮和碱解氮含量,分析施肥与灌溉后土壤氮素转化及迁移特征。结果表明,土壤硝态氮更容易随灌水发生水平迁移,而土壤铵态氮更容易向土壤纵深迁移。土壤氮素含量的空间变异大小依次为:硝态氮>铵态氮>碱解氮;土壤硝态氮、铵态氮和碱解氮含量的平均变幅分别为 32%~40%、26%~37%和 6%~12%。局部根区滴灌土壤硝态氮含量的空间变幅比充分灌溉减小 16%~20%。穴施尿素土壤铵态氮含量的空间变幅比滴灌施肥减小 12%~28%。穴施尿素和局部根区滴灌调控土壤氮素转化速率,赋予肥料养分缓释性能,从而提高土壤氮素供应能力。因此,穴施尿素结合局部根区滴灌是较优的施肥与灌溉方式。

关键词:局部根区滴灌;滴灌施肥;穴施尿素;速效氮;运移;转化

中图分类号:S274.3;S143. 1 **文献标志码**:A

Effects of partial root-zone irrigation and fertilization on spatial distribution of available nitrogen in soil

HAN Guojun, CHEN Nianlai, CHU Run, SUN Xiaomei, REN Jianxin, ZHANG Li

(*College of Resources and Environmental Sciences*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to study the effects of irrigation and fertilization in root zone on the transformation of soil nitrogen (N), two fertilization methods including hole applying urea and fertigation were used with fertilization rates of 240 kg·hm^{-2} and 180 kg·hm^{-2}. During the experimental time, two irrigation methods including full irrigation and partial root zone irrigation were tested separately, with irrigation amounts of 14 L and 7 L. The NH_4^+-N, NO_3^--N, and alkaline N contents in soil were investigated, and the spatial distribution characteristics of different forms of N after fertilization and irrigation were analyzed. The results showed that the NH_4^+-N content in soil was more easily distributed in the soil, while the NO_3^--N content in soil was more likely to migrate horizontally. In terms of spatial distribution, the variation of soil N content was: NO_3^--N > NH_4^+-N > alkaline N. The spatial variation of soil NO_3^--N content was 32%~40%, that of NH_4^+-N content was 26%~37%, and that of alkaline N content was 6%~12%. The spatial variation of NO_3^--N content in partial root-zone irrigated soil was 16%~20% less than that in full irrigated soil. The spatial variation of NH_4^+-N content in urea hole-application soil was 12%~28% less than that in drip-fertilized soil. Therefore, N conversion rate in soil can be regulated to maintain the effect of nutrient stability release. The optimal method of fertilization and irrigation was the combination of hole-applying urea and partial root-zone irrigation, which improved the soil N supply capacity in this experiment.

Keywords: partial root-zone irrigation; fertigation; hole-applying urea; available nitrogen; transport; transformation

收稿日期:2019-10-25 **修回日期**:2020-10-25

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金(GAUXKJS-2018209);国家自然科学基金(31960631)

作者简介:韩国君(1977-),男,甘肃白银人,副教授,主要从事农业资源利用与植物营养生理研究。E-mail:hangj@ gsau.edu.cn

通信作者:褚润(1981-),女,山东济宁人,博士,副教授,主要从事植物逆境生理生态及农业废弃物资源化利用研究。E-mail:churun3@126.com

发展节水灌溉和高效施肥技术、推进农业化肥减量和节本增效已是当前农业研究的重要任务之一[1-2]。局部根区灌溉(Partial Root-zone Irrigation, PRI)是适用于我国干旱区的农业节水灌溉技术,具有可操作性强、节水优产、减少氮淋失等优势[3]。与充分灌溉相比,局部根区灌溉的水分侧向入渗明显、深层渗漏较少,有效减少硝态氮淋失,并能促进土壤下层硝态氮向上层迁移,增加植物吸收利用氮素的机会[4-5]。有研究表明,局部根区灌溉马铃薯节水可达 30%,土壤残留氮比充分灌溉减少 29%[6]。滴灌施肥(Fertigation)在我国被称为水肥一体化,它是一种高效的灌溉与施肥方式[7]。滴灌施肥能显著减少氮的淋溶损失,增加土壤中有效态氮的含量,提高作物对养分的利用率[8]。一次性基施缓控释肥或减量施氮均可实现一次性施肥,能维持我国玉米、小麦和水稻三大粮食作物的产量不降低,减量施氮 20%~37%时,氮肥利用率提高 2.3%~20.4%,显著减少农田氨挥发、N_2O 排放、氮淋溶损失[9-10]。一次性穴施尿素在提高土壤剖面氮素合理分布、降低氮素释放速度[11]、简化施肥管理和减少氮素损失[12]等方面发挥显著作用。研究显示,土壤氮素矿化在表施、深施尿素和灌溉施肥 5 d 后达到高峰[13]。氮肥深施 15 cm 可延缓氮肥释放、减少氮素淋失量、保证土壤氮素持续供应[14]。节水减氮有助于发挥深层累积硝态氮的生物有效性,增加作物叶片氮的积累量[15]。节水减氮对作物产量无显著影响,但能最大限度地提高作物水氮利用效率[16]。

当前,虽然已开展较多灌溉与施肥技术的理论研究,但局部根区滴灌下穴施尿素、滴灌施肥对土壤中氮素分布及运移的研究鲜有报道。因此,本文结合局部根区灌溉技术与一次性穴施尿素方式,研究节水灌溉与减量施肥对土壤有效态氮含量及分布的影响,对于节约灌溉用水量、减少化肥使用量及农业生产节本增效的实践具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　试验设计

施肥与灌溉试验于 2019 年在甘肃农业大学遮雨棚内进行,设穴施尿素和滴灌施肥两种施肥方式,穴施尿素是一次性将尿素深施至 15 cm 土层土壤,滴灌施肥是将尿素溶解于水中随滴灌施入土壤。根据滴灌范围划分成面积为 1.2 m ×0.7 m 的试验小区,小区之间埋深 50 cm 防渗膜,防止水分、养分相互迁移干扰。在试验地上方搭建遮雨棚的同时,其顶部及四周皆用塑料膜覆盖遮雨。

滴灌用医用输液器进行模拟,滴头流量 2.5 L·h^{-1}。灌水量根据实际土壤含水量、灌水上限(田间持水量的 90%)和小区面积计算得到,局部根区滴灌和充分灌溉的一次灌水量分别为 7 L 和 14 L。以纯 N 计设常量施肥(240 kg·hm^{-2})和减量施肥(180 kg·hm^{-2})两种施肥量,常量施肥下 A1 处理为穴施尿素的局部根区滴灌处理,F1 处理为穴施尿素的充分灌溉处理,D1 处理为滴灌施肥的局部根区滴灌处理;减量施肥下 A2 处理为穴施尿素的局部根区滴灌处理,F2 处理为穴施尿素的充分灌溉处理,D2 处理为滴灌施肥的局部根区滴灌处理,共计 6 个处理(表 1),每个处理重复 4 次。

1.2　土壤取样

在灌溉、施肥 5 d 后用土钻采集试验小区的土壤样品,取样点、施肥点、滴灌点位置见图 1。水平方向以滴灌点为 0 cm 开始取土壤样品,每隔 10 cm 为一个采样点,分别为距离滴头 0、10、20 cm 和 30 cm,垂直方向由上至下每 10 cm 取土壤样品 1 次,分别为 0~10、10~20、20~30、30~40 cm。

用四分法将土壤样品分成 2 份,放入自封袋存至 4℃冰箱,其中 1 份用于测定土壤含水量,另 1 份

表 1　施肥与灌溉试验处理

Table 1　The treatments of fertilization and irrigation experiment

处理 Treatment	施肥量 Fertilizer rate	施肥方式 Fertilizer management	灌水方式 Irrigation mode	灌水量/L Irrigation amount
A1	常量施肥 Constant fertilization 240 kg·hm^{-2}	穴施尿素 Hole-applying urea	局部根区滴灌 Partial root-zone drip irrigation	7
F1		穴施尿素 Hole-applying urea	充分滴灌 Full root-zone drip irrigation	14
D1		滴灌施肥 Fertigation	局部根区滴灌 Partial root-zone drip irrigation	7
A2	减量施肥 Reduced fertilization 180 kg·hm^{-2}	穴施尿素 Hole-applying urea	局部根区滴灌 Partial root-zone drip irrigation	7
F2		穴施尿素 Hole-applying urea	充分滴灌 Full root-zone drip irrigation	14
D2		滴灌施肥 Fertigation	局部根区滴灌 Partial root-zone drip irrigation	7

用于土壤硝态氮、铵态氮和碱解氮含量的测定。供试土壤容重 1.4 g·cm^{-3},pH 为 8.12,田间持水量 22%,有机质 8.10 g·kg^{-1},全氮 0.62 g·kg^{-1},土壤铵态氮 9.60 mg·kg^{-1},硝态氮 10.07 mg·kg^{-1}。

1.3 测定项目与方法

土壤全氮用半微量开氏法测定;土壤铵态氮含量用 2 mol·L^{-1} KCL 浸提-靛酚蓝比色法测定;土壤硝态氮含量用紫外分光光度法测定;土壤碱解氮含量用碱解扩散法测定。土壤矿质氮是硝态氮和铵态氮之和。

1.4 数据处理及统计分析

用 SPSS 20.0 进行 ANOVA 单因素方差分析,用 Duncan's 新复极差法多重比较处理之间的显著性(P<0.05)和交互作用。用 Origin 9.1 软件作图。

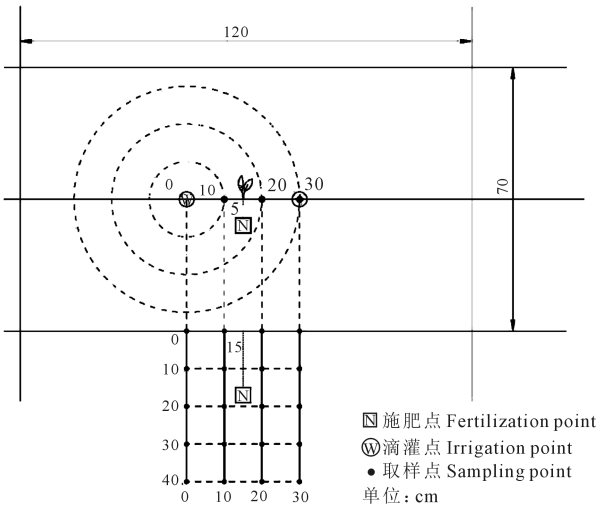


图 1 试验小区土壤取样示意图

Fig.1 Sketch map of soil sampling in experimental plot

2 结果与分析

2.1 滴灌水分入渗速率及土壤含水量空间分布

土壤水分入渗速率是单位时间内地表单位面积土壤的渗入水量,用以表征土壤的渗透特性。土壤最初入渗速率非常大,随后由大变小直至达到最后的稳定值。滴灌土壤水分入渗速率呈先快速下降、而后缓慢减小的趋势(图 2),尤其在滴灌开始的 10 min 内土壤的入渗速率变化较快,为 0.0154 kg·m^{-2}·s^{-1},与之相比,30 min 时土壤入渗速率(0.0068 kg·m^{-2}·s^{-1})下降 56%;在 120 min 时土壤入渗速率又减小近 50%,其值仅为 0.0035 kg·m^{-2}·s^{-1}。

灌水结束 5 d 后各试验小区土壤相对含水量如表 2 所示,局部根区滴灌处理的灌溉湿润区域与充分灌溉处理的土壤含水量之间差异很小,但 2 种处理的灌水量分别为 7 L 和 14 L。在距离滴头 0 cm 处,局部根区滴灌(穴施尿素 A1/A2、滴灌施肥 D1/D2)处理 0~10 cm 表层土壤含水量显著小于 30~40 cm

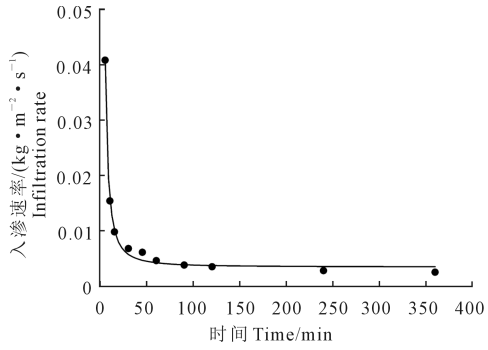


图 2 滴灌土壤水分入渗速率

Fig.2 Infiltration rate of soil water with drip irrigation

表 2 不同施肥与灌溉处理土壤相对含水量空间分布

Table 2 Spatial distribution of soil moisture under different fertilization and irrigation treatments

处理 Treatment	土层 Soil depth /cm	滴头水平距离 Distance from irrigation point/cm							
		0		10		20		30	
		平均值 Mean/%	标准差 SD	平均值 Mean/%	标准差 SD	平均值 Mean/%	标准差 SD	平均值 Mean/%	标准差 SD
A1/A2	0~10	10.67c	0.58	10.67b	1.15	11.00a	2.65	9.00b	0.05
	10~20	13.33abc	0.58	15.00a	2.65	13.00a	1.00	12.33ab	1.15
	20~30	12.33abc	2.52	13.33ab	0.58	13.00a	1.00	12.67ab	1.15
	30~40	16.33a	4.16	13.33ab	0.58	14.33a	1.53	14.33a	1.53
F1/F2	0~10	11.67ab	1.15	11.00b	1.73	10.67a	3.06	11.33ab	4.04
	10~20	15.00ab	3.46	14.33a	3.21	13.67a	2.08	12.33ab	1.15
	20~30	15.06ab	3.00	13.00ab	1.00	12.33a	2.08	11.67ab	5.86
	30~40	13.67abc	1.15	13.33ab	0.58	12.00a	4.58	12.00ab	4.58
D1/D2	0~10	10.05c	1.05	12.05ab	0.95	11.45a	0.55	13.00ab	2.00
	10~20	12.60abc	1.40	12.27ab	1.70	12.67a	0.95	11.97ab	0.35
	20~30	13.50abc	0.50	12.50ab	0.50	13.35a	0.65	10.85ab	0.15
	30~40	13.70abc	0.70	13.15ab	0.15	12.90a	0.10	12.90ab	0.10

注:A1/A2 处理为穴施尿素的局部根区滴灌 7 L,F1/F2 处理为穴施尿素的充分滴灌 14 L,D1/D2 处理为滴灌施肥的局部根区滴灌 7 L;标注字母 A1、F1、D1 处理施肥量为 240 kg·hm^{-2},标注字母 A2、F2、D2 处理施肥量为 180 kg·hm^{-2}。比较不同土壤深度、施肥与灌溉处理之间的土壤相对含水量,同列中不同字母表示差异达 P<0.05 显著性。下同。

Note: A1/A2 is partial root-zone irrigation of 7 L with hole-applying urea; F1/F2 is full irrigation of 14 L with hole-applying urea; D1/D2 is partial root-zone irrigation of 7 L with fertigation. Labeled with letters A1, F1, and D1, the treated fertilizer amount is 240 kg·hm^{-2}; the treatments labeled with letters A2, F2 and D2 is 180 kg·hm^{-2}. Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level.The same below.

土层,它们在距离滴头水平方向 20 cm 各土层之间土壤相对含水量无显著差异。

2.2　施肥与灌溉对土壤铵态氮含量的影响

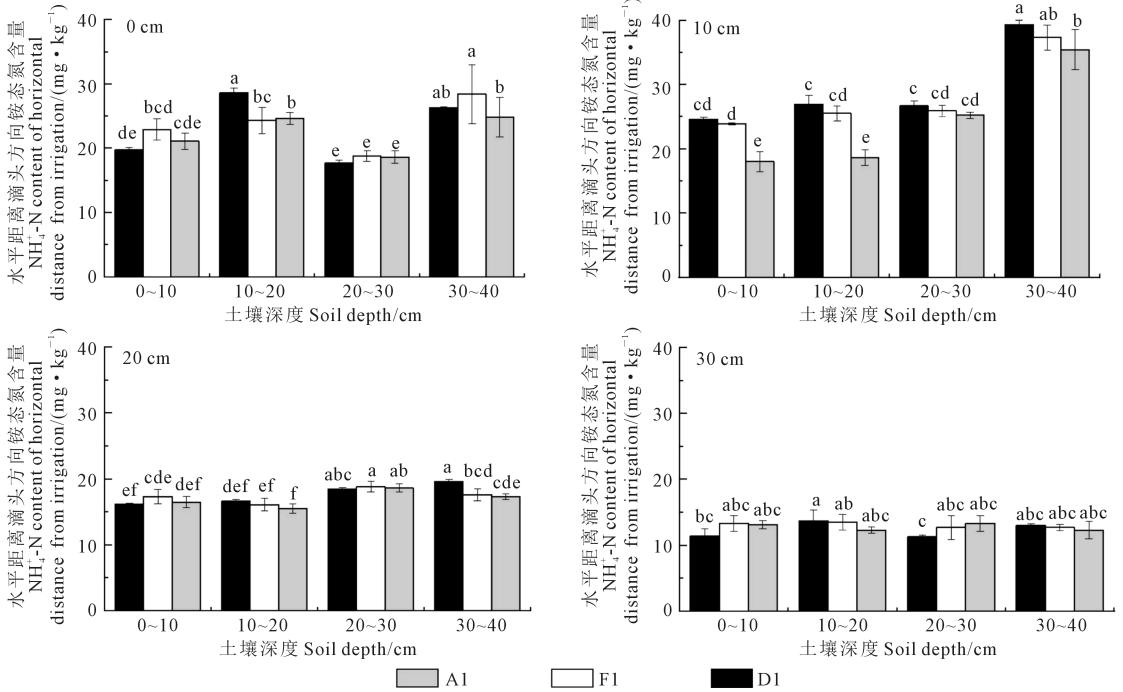
总体来说,在距离滴头水平 30 cm 和垂直 40 cm 范围内(图 3,图 4),在水平方向上,距离滴头 30 cm 土壤铵态氮含量较小,距离滴头 10 cm 土壤铵态氮含量较大,且铵态氮含量最大值出现在距离滴头 10 cm 下方 30~40 cm 土层中。说明土壤铵态氮水平迁移较小,其更容易向土壤纵深分布。

比较平均值来看,在 180 kg · hm^{-2}减量施肥下,滴灌施肥 D2 处理土壤铵态氮含量平均值为 11.99 mg · kg^{-1},明显小于穴施尿素 A2 处理(14.64 mg · kg^{-1})、F2 处理(15.21 mg · kg^{-1})。而且,滴灌施肥土壤铵态氮含量的空间变幅为 32.77%,大于穴施尿素 A2 处理(28.20%)、F2 处理(25.53%)。但是在 240 kg · hm^{-2}常量施肥下,滴灌施肥 D1 处理、穴施尿素 A 处理和 F 处理的铵态氮空间变幅分别为 36.90%、31.94%、33.15%,各处理之间差异较小。总之,滴灌施肥处理土壤铵态氮含量的空间变幅比穴施尿素大 12%~28%,而穴施尿素处理的土壤铵态氮空间分布更均匀。

2.3　施肥与灌溉对土壤硝态氮含量的影响

总体看来,无论常量施肥还是减量施肥(图 5、图 6),在垂直方向上,各处理 0~10 cm 土壤表层硝态氮含量最大。在常量施肥下,充分灌溉 F1 处理土壤硝态氮最大值为 27.43 mg · kg^{-1}(在距离滴头 30 cm 处),而局部根区滴灌 A1 处理、D1 处理最大值仅为 19.56、20.73 mg · kg^{-1}(在距离滴头 20 cm 处),它们之间相差 24%~29%;同样,在减量施肥下,充分灌溉 F2 处理在距离滴头 30 cm 处土壤硝态氮含量最大值为 20.73 mg · kg^{-1},而局部根区滴灌 A2 处理、D2 处理在距离滴头 20 cm 处土壤硝态氮含量最大值分别为 14.33、12.33 mg · kg^{-1},它们之间相差 31%~41%。可见,无论常量还是减量施肥,灌水量对土壤硝态氮运移的影响较大。充分灌溉处理土壤硝态氮在湿润边界容易产生聚集,且土壤硝态氮更容易在水平方向上发生运移。

在常量施肥下,充分灌溉 F1 处理、局部根区滴灌 A1 处理和 D1 处理土壤硝态氮的空间变幅分别为 40.16%、36.59%、39.22%;在减量施肥下,充分灌溉 F2 处理、局部根区滴灌 A2 处理和 D2 处理土壤硝态氮的空间变幅分别为 38.54%、32.41%、33.77%。当施氮量减少 25%时,局部根区滴灌、充分灌溉和滴灌施肥的土壤硝态氮含量比常量施肥分别降低了19.64%、22.97%、39.22%。无论常量施肥还是减量施肥,充分灌溉处理的硝态氮积累大于局部根区滴灌处理,灌水量对土壤硝态氮含量的影响大于施肥处理。



注:同列中不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in the figure indicate significant difference (P<0.05). The same below.

图 3　常量施肥与灌溉下土壤铵态氮空间分布

Fig.3　Spatial distribution of soil ammonium nitrogen under irrigation and regular fertilization

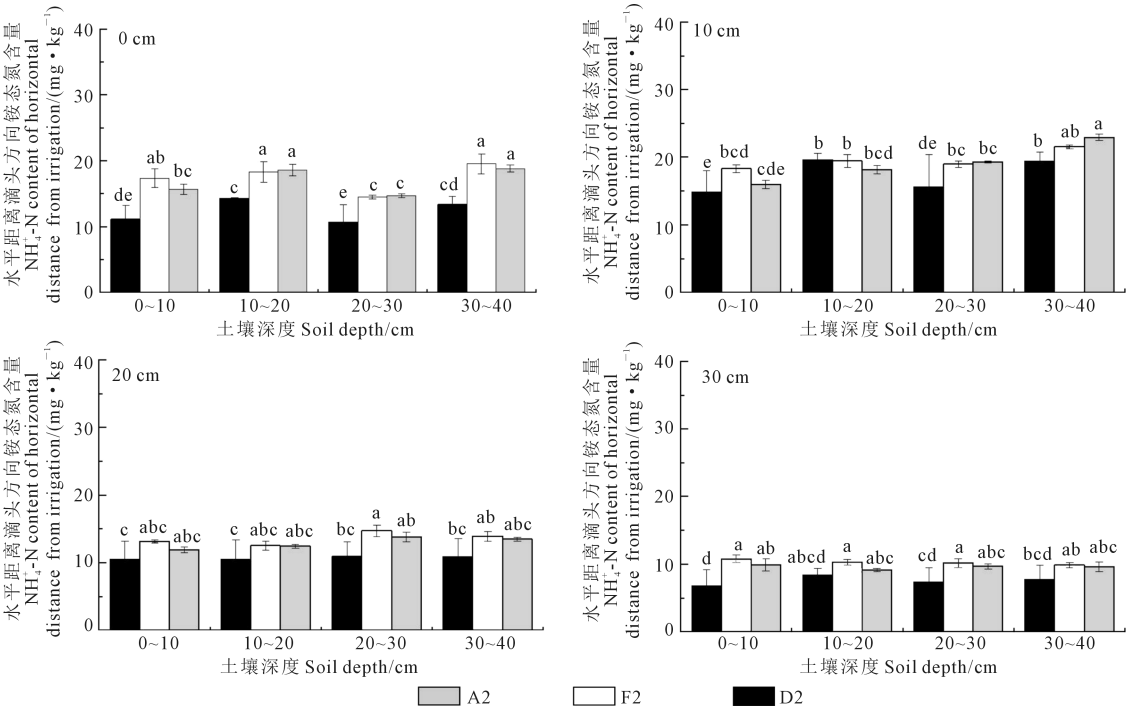


图 4 减量施肥与灌溉下土壤铵态氮空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil ammonium nitrogen under irrigation and reduced fertilization

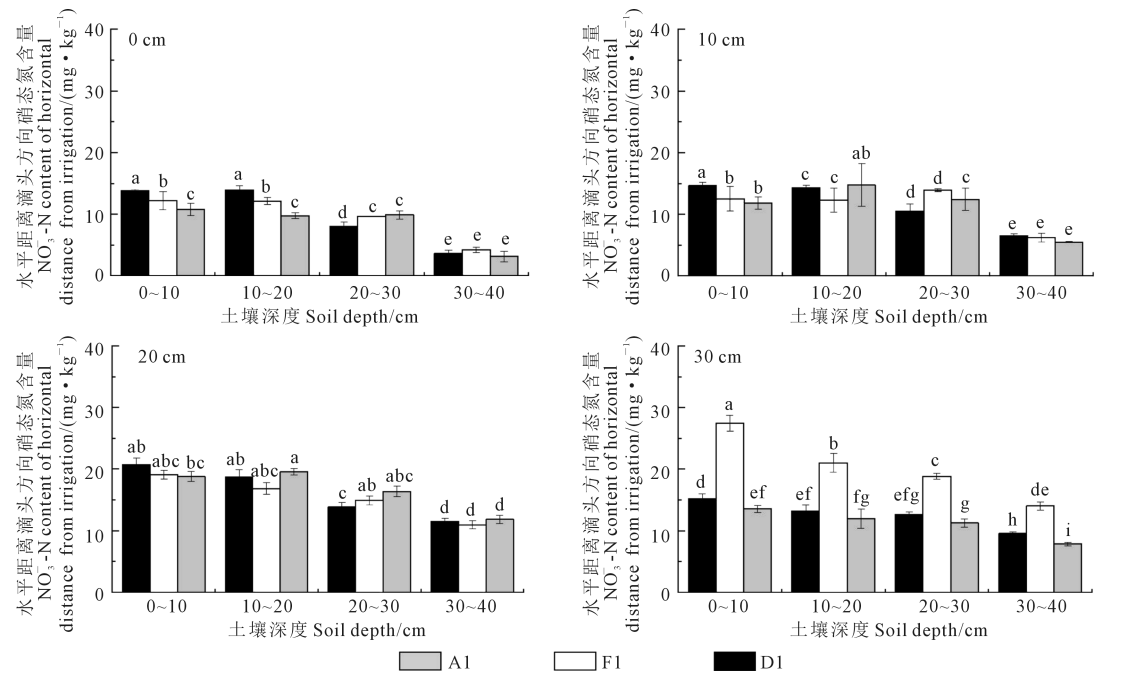


图 5 常量施肥与灌溉下土壤硝态氮的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of soil nitrate nitrogen under irrigation and regular fertilization

2.4 施肥与灌溉对土壤碱解氮含量的影响

分析可知,在距离滴头水平 30 cm 和垂直 40 cm 范围内,无论常量施肥还是减量施肥,各处理之间土壤碱解氮含量差异较小(图 7、图 8)。在常量施肥下,A1 处理、F1 处理和 D1 处理土壤碱解氮平均含量分别为 127.91、126.32、125.76 mg · kg^{-1},其空间变异系数分别为 5.67%、8.97%、9.26%;在减量施肥下,A2 处理、F2 处理和 D2 处理土壤碱解氮平均含量分别为 75.49、77.35、75.07 mg · kg^{-1},其空间变异系数分别为 9.94%、11.66%、9.90%。无论是常量施肥还是减量施肥,各处理之间的土壤碱解氮含量差异不显著。可见,土壤碱解氮空间分布较均匀,灌水量和施肥方式对土壤碱解氮含量的影响较小。

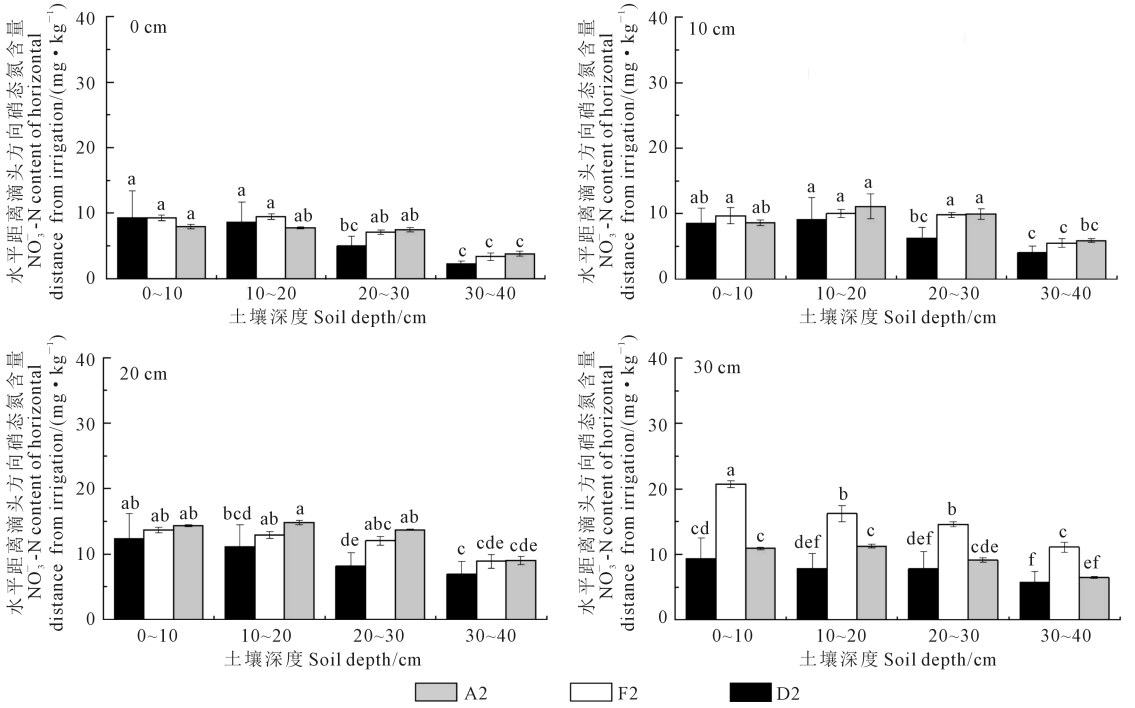


图 6　减量施肥与灌溉下土壤硝态氮的空间分布

Fig.6　Spatial distribution of soil nitrate nitrogen under irrigation and reduced fertilization

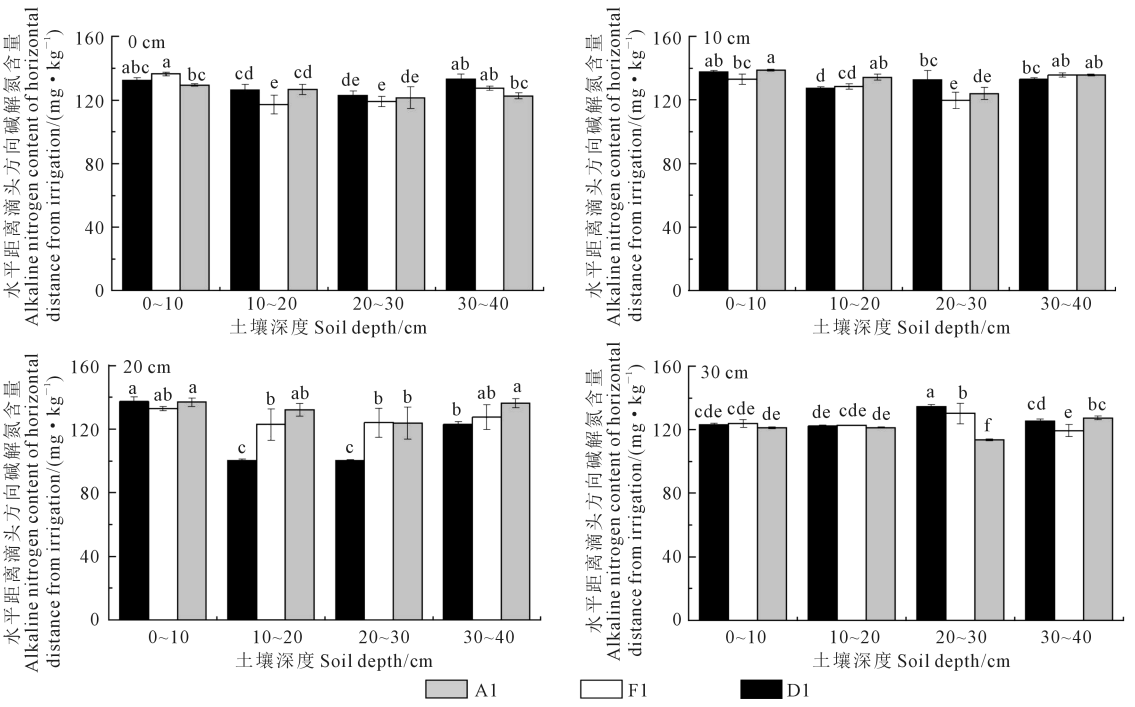


图 7　常量施肥与灌溉下土壤碱解氮的空间分布

Fig.7　Spatial distribution of soil alkaline nitrogen under irrigation and regular fertilization

2.5　施肥与灌溉对土壤氮素转化的影响

由于常量施肥(240 kg·hm^{-2})与减量施肥(180 kg·hm^{-2})的施氮量比值为 1.33,从尿素转化为土壤硝态氮的比例来看(图 9),滴灌施肥 D1/D2 处理的斜率 1.65,大于穴施尿素的 A1/A2 处理和 F1/F2 处理的斜率 1.26 和 1.30。从尿素转化为土壤铵态氮的比例来看,滴灌施肥 D1/D2 处理的斜率为 1.73,大于穴施尿素的 A1/A2 处理和 F1/F2 处理的斜率为1.31和 1.37。说明穴施尿素处理土壤硝态氮、铵态氮转化得较慢,而滴灌施肥处理转化得较快,造成氮素损失的风险较大。

由图 9 可见,施肥方式即穴施尿素和滴灌施肥

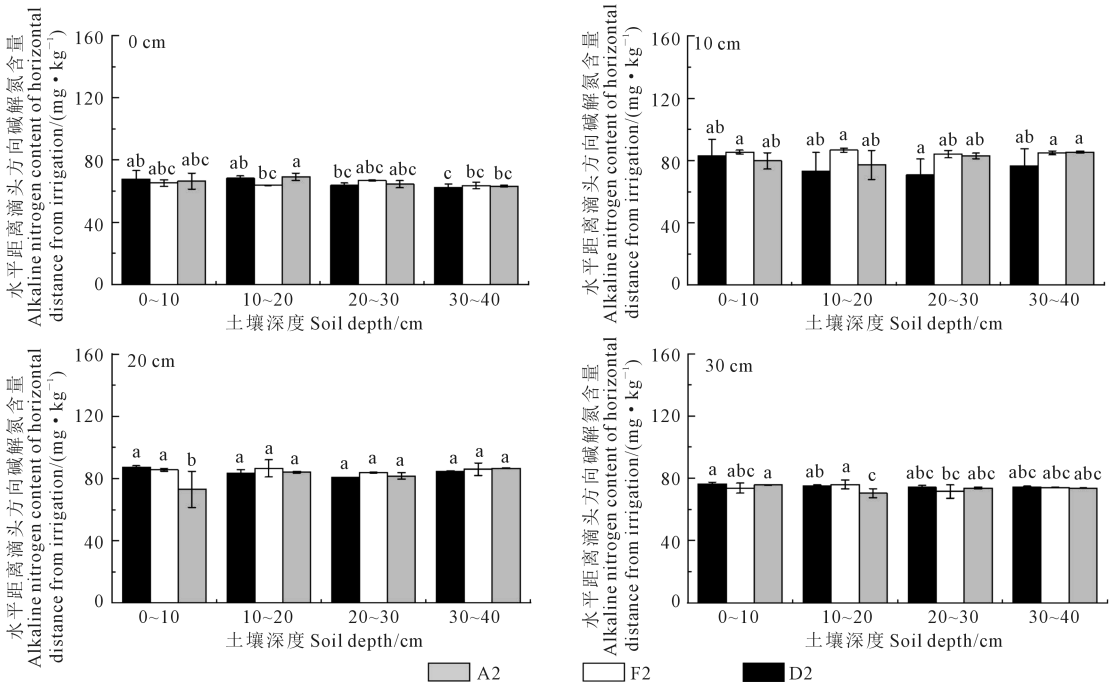


图 8 减量施肥与灌溉下土壤碱解氮的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of soil alkaline nitrogen under irrigation and reduced fertilization

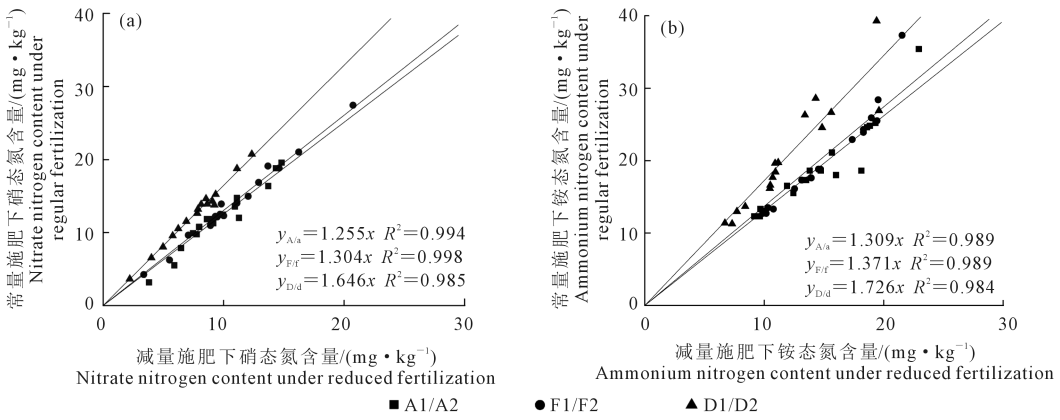


图 9 施肥与灌溉对土壤氮素转化的影响

Fig.9 Effects of fertilization and irrigation on soil nitrogen conversion rate

对土壤氮素转化的速率具有一定影响,由于尿素转化为土壤铵态氮和硝态氮的土层空间含量不同,使得两种施肥量下尿素转化为土壤矿质氮的比值不同,即呈现不同斜率。当施氮量减少 25%时,穴施尿素下局部根区滴灌、穴施尿素下充分灌溉、滴灌施肥下局部根区滴灌的土壤硝态氮含量分别减少了 19.64%、22.97%、39.22%,土壤铵态氮含量分别减少了 23.28%、26.05%、41.82%。可见,各处理土壤硝态氮、铵态氮的降幅大小顺序为:滴灌施肥下局部根区滴灌>穴施尿素下充分灌溉>穴施尿素下局部根区滴灌。因此,滴灌施肥处理土壤矿质氮含量变幅大于穴施尿素处理。采用穴施尿素的施肥方式减缓了土壤氮素转化,可以调控养分的缓慢释放。

3 讨论与结论

3.1 灌溉方式对土壤有效氮分布的影响

在我国半干旱区农田中,土壤硝态氮随地下水位降低而造成积累[17]。施氮刺激土壤硝化过程,易造成土壤 NO_3^--N 累积,从而增加土壤氮损失的风险[18]。我国华北冬小麦、夏玉米轮作区土壤硝态氮的残留量超过 150 kg·hm^{-2},远大于欧盟 90 kg·hm^{-2}的标准[19]。有研究显示,施用尿素 150 kg·hm^{-2}的膜下沟灌是适用于河套灌区春玉米的种植模式[20]。非充分灌溉下 150 kg·hm^{-2}施氮量更有利于棉花增产[21]。局部根区滴灌对 10~20 cm 土层

^{15}N淋洗作用较常规灌溉减弱,能促进下层土壤 NO_3^--N 向上迁移,增加植物吸收利用氮素的机会[22]。穴施尿素比滴灌施肥土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 分布更集中[23]。滴灌施肥土壤 NO_3^--N 易在较远的湿润边界产生累积,而 NH_4^+-N 在滴头附近出现高峰值[24]。但也有研究表明,冬小麦滴灌施肥的土壤 NO_3^--N 在滴头下方土壤湿润边界无聚集[25]。

本试验中,充分灌溉处理土壤 NO_3^--N 积累量显著大于局部根区滴灌,且在较远的湿润边界产生聚集。在空间分布上,充分灌溉处理土壤 NO_3^--N 浓度在距离滴头 30 cm 处最高,而局部根区滴灌处理最大值在距离滴头 20 cm 处,两种灌水处理最大值相差 31%~41%。说明土壤 NO_3^--N 含量与灌水量密切相关,充分灌溉更容易使土壤 NO_3^--N 发生水平迁移。

3.2　施肥方式对土壤氮素迁移及利用的影响

我国旱作农业生产中氮肥损失率为 45%左右,春玉米分次施用尿素 240 kg·hm^{-2}后氮肥表观损失率达 42.6%[19]。采用减量施氮可获得与习惯施肥相当的玉米产量,能减少氮肥损失[26]。长期定位试验表明,施氮 135 kg·hm^{-2}土壤矿质氮含量增幅大于 180 kg·hm^{-2}处理[27]。土壤对硝态氮积累有一个缓冲作用,即土壤的氮素环境承受力。优化施肥措施使土壤硝态氮积累限制在一定范围,可减少氮淋失。其中,秸秆还田能提高土壤氮素缓冲性,促进作物氮素吸收和减少土壤硝态氮残留[28]。施用缓释尿素可增加土壤速效氮后期供给量[29]。控释氮肥与尿素混施处理既能减少氮素向深层土壤的淋失,也能促进植株氮吸收[19]。氮肥深施是一种操作简单且效果稳定的施肥方式。研究发现,尿素深施增产效果比表施高2.7%~11.6%左右,氮肥利用率提高 7.2%~12.8%[30]。尿素穴施 10 cm 后土壤速效氮含量显著大于表施,且出现的时间较早,其向日葵产量、植株吸氮量和氮肥利用率显著高于表施处理[31]。尿素深施 15 cm 可延缓氮肥释放,减少氮素淋失量,保证土壤氮素持续供应,油菜籽粒产量、根系分布较优[32],氮肥吸收利用率较高[33]。尿素深施 15 cm 改善了深层根系生长状况,提高了玉米产量和氮素吸收量[34]。尿素施入土壤遇水后,易被脲酶水解,先肥后水的滴灌施肥方式更适合深根系作物,使 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 集中于作物根系附近[35]。

通过研究穴施尿素与滴灌施肥下土壤速效氮的转化与迁移,发现土壤 NH_4^+-N 浓度与施肥方式相关,且更容易向土壤纵深分布。穴施尿素和滴灌施肥之间土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量的空间分布差异较大,穴施尿素处理土壤 NH_4^+-N 含量的空间变幅比滴灌施肥处理小 12%~28%,穴施尿素处理的土壤铵态氮含量空间分布更均匀。说明尿素穴施 15 cm 可调控土壤氮素转化速率,以维持土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的稳定释放及其空间分布的均匀性。

参 考 文 献:

[1] 张丹. 农业节水灌溉存在的问题与发展对策研究[J]. 水资源研究, 2017, 6(1):49-54.

[2] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11):2116-2125.

[3] 周芳, 赵玉霞, 王文岩, 等. 局部根区水分胁迫下钙对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1):14-19,71.

[4] Zhang L D, Gao L H, Zhang L X, et al. Alternate furrow irrigation and nitrogen level effects on migration of water and nitrate-nitrogen in soil and root growth of cucumber in solar-greenhouse [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138(2):43-49.

[5] Sepaskhah A R, Ahmadi S H. A review on partial root-zone drying irrigation [J]. International Journal of Plant Production, 2010, 4(4): 1735-6814.

[6] Li C X, Zhou X G, Sun J S, et al. Dynamics of root water uptake and water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(13-15):2805-2810.

[7] Sanjeev K S, Renu K. Fertigation technology for enhancing nutrient use and crop productivity: an overview [J]. Himachal Journal of Agricultural Research, 2015, 41(2):114-121.

[8] 习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003,9(3):271-275.

[9] 董建军, 代建龙, 李霞, 等. 黄河流域棉花轻简化栽培技术评述[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4290-4298.

[10] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839.

[11] 姜超强, 王火焰, 卢殿君, 等. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 154-161.

[12] 丁武汉, 谢海宽, 徐驰, 等. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1097-1109.

[13] 董玉云, 费良军, 穆红文. 施肥方式对膜孔点源入渗尿素转化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1):8-11,18.

[14] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J].农业机械学报, 2016, 47(6):120-128,206.

[15] Wang Z C, Liu F L, Kang S Z, et al. Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays* L.) leaves [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 75:36-40.

[16] Badr M A, Ei-tohamy W A, Zaghloul A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110(3):

9-15.
[17] Zhou J Y, Gu B J, Schlesinger W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):25088.
[18] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2):292-304.
[19] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3):518-528.
[20] 李成, 冯浩, 董勤各. 灌溉施肥对河套灌区垄膜沟灌春玉米土壤水热运移的影响[J].干旱地区农业研究, 2019, 37(2):44-51.
[21] 窦海涛, 石洪亮, 李春艳, 等. 非充分灌溉下氮肥对棉花蕾铃消减及产量的影响[J].干旱地区农业研究, 2018,36(2):86-92.
[22] 王春辉, 祝鹏飞, 束良佐, 等. 分根区交替灌溉和氮形态影响土壤硝态氮的迁移利用[J]. 农业工程学报, 2014,30(11):92-101.
[23] 董玉云, 费良军, 穆红文. 施肥方式对膜孔点源入渗尿素转化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1):8-11.
[24] Li J S, Zhang J J, Ren L. Nitrogen distributions in soil under fertigation from a point source[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(5):61-66.
[25] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对冬小麦农田土壤 NO_3^--N 分布、累积及氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报, 2015, 21(4):927-935.
[26] 苗建国, 金继运, 仇少君, 等. 生态集约化养分管理对春玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3):571-578.
[27] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日. 施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13):2561-2571.
[28] Yang S Q, Wang Y S, Liu R L, et al. Improved crop yield and reduced nitrate nitrogen leaching with straw return in a rice-wheat rotation of Ningxia irrigation district [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):9458.
[29] 武鹏, 杨克军, 王玉凤, 等. 缓释尿素对土壤和玉米植株氮素及干物质和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5):100-107.
[30] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
[31] 郭宇, 李仙岳, 丁宗江, 等. 不同施氮方式对向日葵氮肥利用效率的影响[J].灌溉排水学报, 2018, 37(7):20-27.
[32] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):120-128.
[33] 鲁飘飘, 武际, 胡现荣, 等. 氮肥基施深度对油菜产量和养分吸收利用的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30):34-37.
[34] 于晓芳, 高聚林, 叶君, 等. 深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1):114-119.
[35] 王旭洋, 范兴科. 滴灌条件下施氮时段对土壤氮素分布的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3):182-189.

(上接第 90 页)

[12] 张莉,李玉义,逄焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168.
[13] Yang X Y, Chen X W,Guo E H, et al. Path analysis of phosphorus activation capacity as induced by low-molecular-weight organic acids in a black soil of Northeast China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 840-847.
[14] Andry A, Tovohery R, Tantely R, et al. Farmyard manure improves phosphorus use efficiency in weathered P deficient soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2019, 115(3):407-425.
[15] 王改兰,郭堃梅,黄学芳.酸性物质对石灰性土壤磷的活化效应[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(2):120-122.
[16] 谢迎新,刘超,朱云集,等.氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):64-71.
[17] Reddy G K, Kumar P, Yerasi P K R. Biochar and its potential benefits-a review [J]. Environment and Ecology, 2013, 31(4A): 2000-2005.
[18] 李伟.黄土高原施用生物炭对麦田土壤 N_2O 排放及理化性质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
[19] 鲍士旦.土壤农化分析(第 3 版)[M].北京:中国农业出版社,2000:25-268
[20] 张珺橦,王婧,张莉,等.理化预处理方式对玉米秸秆腐解与养分释放特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(23):226-232.
[21] 郭俊姮,姜慧敏,张建峰,等.玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):67-75.
[22] 丛萍,李玉义,高志娟,等.秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J].农业工程学报,2019,35(1):148-156.
[23] 周然.石灰性土壤微生物生物量 C/P 比的影响因素[D].北京:中国农业大学,2005.
[24] Luo Y, Durenkamp M, Nobili M D, et al. Short term soil priming effects and the mineralization of biochar following its incorporation to soils of different pH [J]. Soil Biologyand Biochemistry, 2011, 43(11): 2304-2314.
[25] 林葆,李书田,周卫.影响硫磺在土壤中氧化的因素[J].土壤肥料,2000,(5):3-8.
[26] 张莉,王婧,逄焕成,等.短期秸秆颗粒还田对小麦-玉米系统作物产量与土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):565-572.