

水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响

严富来¹ 张富仓¹ 范兴科² 王英¹ 郭金金¹ 张晨阳¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明滴灌不同水氮调控对宁夏沙土地区春玉米生长、产量、氮素吸收和根区土壤硝态氮分布及残留量的影响,设计灌水和施氮2因素、3个灌水量水平(W0.6, 0.6K_cET₀; W0.8, 0.8K_cET₀; W1.0, K_cET₀, K_c为作物系数, ET₀为潜在作物蒸发蒸腾量)和4个施氮量水平(N150, 150 kg/hm²; N225, 225 kg/hm²; N300, 300 kg/hm²; N375, 375 kg/hm²),进行了大田试验。结果表明:相同灌水条件下,春玉米地上部干物质累积速率和氮素累积速率(W0.8灌水水平除外)均随施氮量的增加先增加后减小。快增期内, W1.0N300处理的春玉米地上部干物质平均累积速率和W0.8N375处理的氮素平均累积速率最大,分别为513.71、2.75 kg/(hm²·d)。春玉米地上部干物质累积量(W0.8N375除外)和产量随施氮量的增加先增加后减小,其中W0.8N300处理的产量最大,为16387 kg/hm²。相比其他灌水处理, W0.8灌水水平下的营养器官氮素转运量较大,最大为41.14 kg/hm²。随着灌水量和施氮量的增加, 60~100 cm土层硝态氮累积量所占的比例逐渐增加,其中, W0.6灌水水平下,土壤残留的硝态氮主要聚集在0~60 cm土层中, W0.8灌水水平下,土壤残留的硝态氮主要聚集在0~90 cm土层中。考虑试验区年际降雨量分布不均,选取灌水量与有效降雨量之和为532 mm,施氮量300 kg/hm²为宁夏沙土地区适宜的滴灌灌水施肥制度。

关键词: 春玉米; 沙土地区; 水氮互作; 氮素累积; 土壤硝态氮; 滴灌

中图分类号: S275.6; S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)07-0283-11

OSID:



Effects of Water and Nitrogen Fertilizer Supply on Yield and Nitrogen Absorption and Utilization Efficiency of Spring Maize in Sandy Soil Area in Ningxia

YAN Fulai¹ ZHANG Fucang¹ FAN Xingke² WANG Ying¹ GUO Jinjin¹ ZHANG Chenyang¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of fertigation on spring maize growth, yield, and nitrogen absorption and utilization efficiency, soil NO₃⁻-N distribution and residual amount in sandy soil area in Ningxia, to provide a theoretical and experimental basis for the irrigation and nitrogen management of spring maize in this area. The plot experiments were conducted with two factors of irrigation and nitrogen. There were three irrigation levels (W0.6, 0.6K_cET₀; W0.8, 0.8K_cET₀ and W1.0, K_cET₀, K_c was the crop coefficients, ET₀ was the potential reference crops evapotranspiration) and four nitrogen levels (N150, 150 kg/hm²; N225, 225 kg/hm²; N300, 300 kg/hm² and N375, 375 kg/hm²). The results showed that under the same irrigation levels, the dry matter accumulation rate, shoot biomass, yield, water use efficiency and nitrogen accumulation rate (except for W0.8 treatment) were increased at first, and then decreased with the increase of nitrogen application rate. The yield of W0.8N300 treatment was 16387 kg/hm², reached the maximum value. During the fast-growing period, the dry matter average accumulation rate of W1.0N300 and the nitrogen average accumulation rate of W0.8N375 treatment were the highest, which were 513.71 kg/(hm²·d) and 2.75 kg/(hm²·d), respectively. Compared with other

收稿日期: 2019-10-22 修回日期: 2019-12-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403303)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)和教育部高等学校创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 严富来(1995—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: 937429331@qq.com

通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

irrigation treatments, the N remobilization of vegetative organs under W0.8 irrigation level was the highest, which was 84.67%. Both irrigation and nitrogen application amount were increased at the same time, and the soil NO_3^- -N residual amount was increased gradually in the 60 ~ 100 cm at the same time. At W0.6 and W0.8 irrigation levels, the soil NO_3^- -N residual amount was mainly concentrated in the 0 ~ 60 cm and 0 ~ 90 cm soil layers, respectively. Considering the uneven distribution of annual rainfall in Ningxia, the results suggested that it was an appropriate schedule for spring maize in this area when the sum of irrigation and effective rainfall amount was 532 mm and nitrogen application rate was 300 kg/hm².

Key words: spring maize; sandy soil area; water and nitrogen interaction; nitrogen accumulation; soil NO_3^- -N; drip irrigation

0 引言

滴灌作为一种高效的节水灌溉技术,既可进行实时、精确的水肥供应,又能提高作物根区水肥分布的均匀度^[1],在干旱半干旱地区得到了广泛的应用^[2-3]。研究表明,滴灌条件下适宜的氮肥供应能明显促进玉米对氮素的吸收,提高作物产量和氮肥利用效率^[4];但是,水肥供应过多不仅降低作物水肥利用效率和产量^[5],还会使大量土壤硝态氮淋移到深层土壤,造成地下水污染^[6-8]。因此,研究和掌握滴灌施肥条件下作物的氮素吸收和养分分布情况,制定合理的灌溉施肥制度,可提高作物养分吸收及产量,减小水肥供应和地下水污染,从而促进我国农业可持续发展。

应用田间试验手段研究滴灌水肥耦合对作物氮素吸收及土壤硝态氮残留量的影响是制定高效灌溉施肥制度的重要途径。目前,国内外在应用滴灌水肥一体化技术进行作物养分吸收方面已开展了诸多研究。WANG等^[9]和CHILUNDO等^[10]研究表明,滴灌能提高玉米的水氮利用效率,减小氮营养流失,降低土壤中硝态氮向深层土壤渗漏的风险。GHEYSARI等^[11]研究发现,150、200 kg/hm²的施氮水平下,100% ET_c (作物需水量)和113% ET_c 灌水水平的玉米氮素吸收量分别高于70% ET_c 和85% ET_c 。刘洋等^[12]研究发现,滴灌玉米成熟期干物质量和氮素吸收量比地面灌溉提高22%和23%,产量平均提高了9%。在针对不同灌溉方式对土壤硝态氮含量及分布的影响研究中,王建东等^[13]发现,相比地下滴灌,地表滴灌能降低土壤中硝态氮下渗的几率。韦彦等^[14]研究表明,滴灌施肥条件下土壤硝态氮大多聚集在表层,淋洗量比畦灌减少85.9%。玉米作为我国第一大粮食作物,在保障粮食安全及能源危机上具有重要作用^[15]。地处西北干旱半干旱地区的宁夏,是我国重要的春玉米生产基地之一,水资源短缺和传统的地面灌溉方式使宁夏沙土地区的春玉米灌溉保证率较低,产量不稳和水肥利用效率低下等问题依然存在。本文采用水肥一体化滴灌技术,

通过研究宁夏沙土地地区不同水氮供应条件下的春玉米产量、氮素吸收累积及其转运效率,探究收获后根区土壤硝态氮的分布残留情况,分析滴灌玉米的水氮耦合效应。结合该地区实际降雨情况,提出适合该沙土地地区的春玉米水氮管理方案,旨在为干旱半干旱沙土地地区玉米高产协同水分、养分高效利用及减小地下水污染提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年4—9月在宁夏回族自治区吴忠市盐池县冯记沟试验基地进行。试验地位于东经106°31',北纬38°34',海拔1 204 m,属典型的温带大陆性季风气候。试验区年日照时数为2 867 h,年平均气温8.5℃,大于等于10℃积温为2 944.9℃,无霜期128 d;年平均降雨量290 mm,且年际变化大,多集中在7—9月,年蒸发量2 179.8 mm。试验区土壤为沙土,土壤容重1.55 g/cm³,0 ~ 100 cm田间持水率为27.10%(体积含水率),pH值8.60,地下水埋深30 m以上,基础肥力(质量比)为:有机质4.13 g/kg,全氮0.30 g/kg,全磷0.34 g/kg,全钾19.24 g/kg,速效磷5.48 mg/kg,速效钾78.33 mg/kg。试验区玉米生育期(4—9月)有效降雨量为205 mm(图1)。

1.2 试验材料与设计

供试春玉米品种为“先玉1225”,为当地推广的密植品种。2018年4月20日播种,2018年9月26日收获,共160 d。肥料选用常用肥,分别为尿素(N质量分数为46.4%)、磷酸一铵(N质量分数为12%、P₂O₅质量分数为61%)和硫酸钾(K₂O质量分数为52%)。滴灌施肥系统由水泵、过滤器、施肥罐和输配水管道系统等组成。滴灌带为内嵌式滴灌带,滴头间距30 cm,滴头流量2.5 L/h,滴头工作压力0.1 MPa。试验设置灌水量和施氮量2因素,施氮量设置4个水平:150、225、300、375 kg/hm²(N150、N225、N300、N375),磷钾施用量均为150 kg/hm²。将试验区2000—2017年春玉米生育期内潜在作物蒸发蒸腾量(ET_0)和作物系数 K_c 相结合(图1a), K_c 根据作

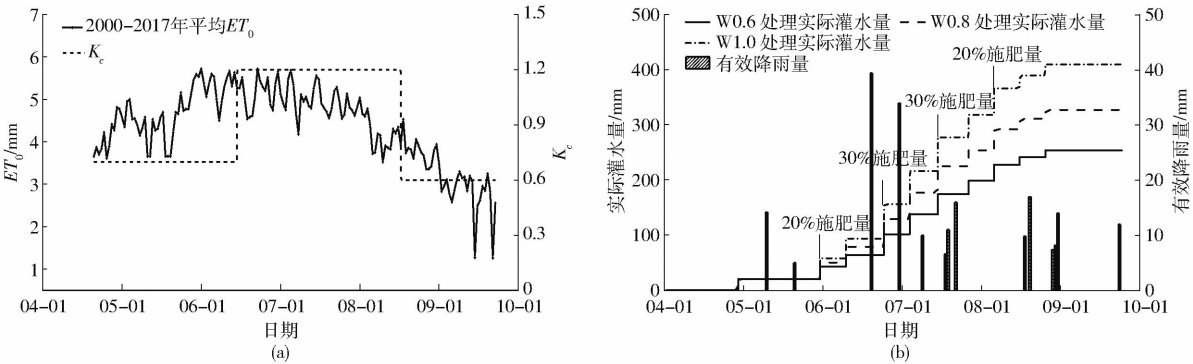


图 1 春玉米生育期内有效降雨量、多年平均潜在作物蒸腾蒸发量、实际灌水量和施肥量

Fig. 1 Effective rainfall, multi-year average potential reference crop evapotranspiration, actual irrigation amount and fertilizer application rate during spring maize growth stage

物生育阶段而定,苗期取 0.7、拔节-灌浆期取 1.2、乳熟-成熟期取 0.6^[16]。进而推算出试验区春玉米生育期内潜在充分耗水量(K_cET_0)为 450 mm,记为 W1.0。以此为依据,设 3 个滴灌水量 W0.6 ($0.6K_cET_0$)、W0.8 ($0.8K_cET_0$)和 W1.0,共 12 个处理,各处理 3 次重复。试验区为引黄(水库蓄水)灌区,需采取轮灌工作制度,因此采取 10 d 作为设计灌水间隔^[17]。为了控制春玉米苗期生长过快,促进根系生长,该地区在生产中一般采用玉米小苗末期开始灌水,但该地区春季极易发生春旱,导致出苗率降低;另外根据该地区历史气象资料,试验区年际降雨量变化较大,且多集中在 7—9 月。因此,春玉米的灌溉制度需根据实际降雨情况进行灌水量和灌水日期的调整(主要调节灌水日期,即遇降雨灌水日期顺延^[17])。2018 年春玉米生育期内的实际灌水量分别为 W0.6 (253 mm)、W0.8 (327 mm)、W1.0 (409 mm)(图 1)。

试验区采用水肥一体化的滴灌施肥方式,小区面积为 132 m² (20 m × 6.6 m),每个处理 3 次重复。春玉米采用宽窄行播种,宽行玉米间距为 70 cm,窄行玉米间距为 40 cm,玉米株距为 20 cm,种植密度为 90 945 株/hm²。滴灌带铺设在窄行玉米中间,一条滴灌带控制 2 行春玉米灌水施肥,为保证灌水施肥的均匀性,采用横向供水方式^[18]。根据春玉米的生长特性,整个生育期共施肥 4 次,每次施肥量占总施肥量分别为 20% (苗期)、30% (小喇叭口期)、30% (抽雄期)和 20% (灌浆期)^[17](图 1b)。

1.3 测定内容和方法

1.3.1 地上部干物质累积量与植株氮素吸收累积量测定

分别在春玉米播种后 51、70、85、113、160 d 取样,每个小区选取有代表性的植株 3 株,从茎基部与地上部分离,去除表面污垢后按茎、叶片、苞叶 + 穗轴、籽粒 4 部分分离,放入干燥箱 105℃ 杀青 0.5 h,

75℃ 下干燥至恒定质量,采用电子天平称量并计算单株地上干物质质量,最后换算成群体生物量(kg/hm²)。并称取各器官的干物质质量后磨碎,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,并用连续流动分析仪(Auto Analyzer-Ⅲ型,德国 Bran Luebbe 公司)测定植物样品全氮含量^[19]。

1.3.2 地上部干物质质量与氮素累积速率计算

将 1.3.1 节测定的干物质质量和氮素吸收累积量采用 Logistic 函数进行非线性回归拟合,Logistic 函数表达式为^[20]

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \tag{1}$$

式中 y ——地上部干物质累积量,kg/hm²
 k ——相应的潜在最大值,kg/hm²
 a ——与干物质有关的阻滞系数
 b ——干物质的增长率
 t ——生长时间,d

对方程求一阶导数,可得生育期干物质和植株氮素累积速率,对方程求二阶导数,并求其特征值方程可得累积速率持续时间^[21]。特征值方程分别为

$$T_1 = (\ln a - 1.317)/b \tag{2}$$

$$T_2 = (\ln a + 1.317)/b \tag{3}$$

式中 T_1 、 T_2 ——地上部干物质或植株氮素快增期出现、结束的日期

由此可将干物质和氮素积累过程分为渐增期、快增期和缓增期^[22]。

1.3.3 产量测定及水分利用效率计算

在春玉米成熟期,随机选取小区 1 条滴灌带控制的 2 行玉米,连续取 20 株,每个小区 3 次重复。晒干脱粒测定其总质量,最终折算成含水率为 14% 的籽粒产量^[23]。

水分利用效率的计算公式为^[23]

$$WUE = Y/ET \tag{4}$$

其中 $ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W \tag{5}$

式中 Y ——产量,kg/hm²

ET ——作物耗水量,mm
 P_r ——有效降雨量,mm
 U ——地下水补给量,mm
 I ——灌水量,mm
 D ——深层渗漏量,mm
 R ——径流量,mm
 ΔW ——试验初期和试验末期土壤水分的变化量,mm

在春玉米播前和收获后,在每个小区内取土,距滴灌带 0、20、40 cm 3 个位置点取样,每 20 cm 取 1 次,土壤剖面范围分别在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm,采用干燥法测定土壤含水率,取其平均值作为该小区土壤含水率(%)。因试验区地势平坦,地下水埋藏较深,根据实测,生育期内 1 m 深土壤含水率变化不大,且滴灌湿润程度较浅, U 、 R 和 D 均可忽略不计。则可将式(5)简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W$$

(6)

1.3.4 收获期根区土壤硝态氮含量测定

在春玉米收获后采用土钻法取土,选取每个小区一根滴灌带滴头中间位置开始,与滴灌带水平距离 0、20、40 cm 3 个位置点取样,土壤剖面范围分别在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm。将土样风干磨细过筛,然后用 2 mol/L KCl 溶液浸提(干土 5 g,土液质量比 1:10),再用流动分析仪(AutoAnalyzer-Ⅲ型,德国 Bran + Luebbe 公司)测定土壤中硝态氮(NO_3^- -N)的含量^[19]。

1.3.5 相关指标计算

收获指数为产量(kg/hm^2)与地上部干物质累积量(kg/hm^2)的比值;植株氮素吸收量(kg/hm^2)为植株氮素含量(%)与干物质质量(kg/hm^2)的乘积;

抽雄期后氮素吸收量(kg/hm^2)为成熟期氮素吸收总量与抽雄期营养器官氮素吸收量(kg/hm^2)的差值;营养器官氮素转运量(kg/hm^2)为抽雄期营养器官氮素吸收量(kg/hm^2)与成熟期营养器官氮素吸收量(kg/hm^2)的差值;营养器官氮素转运率(NRE)为营养器官氮素转运量(kg/hm^2)与抽雄期营养器官氮素累积量(kg/hm^2)的比值;氮素利用效率(NUE, kg/kg)为产量(kg/hm^2)与植株氮素累积量(kg/hm^2)的比值;氮素吸收效率(UPE, kg/kg)为植株氮素累积量(kg/hm^2)与施氮量(kg/hm^2)的比值;氮肥利用率(kg/kg)为产量(kg/hm^2)与施氮量(kg/hm^2)的比值;氮收获指数为籽粒氮素累积量(kg/hm^2)与植株氮素累积量(kg/hm^2)的比值^[17,24]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 处理数据;采用 SPSS 20.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析;采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对春玉米地上部干物质、氮素累积速率的影响

表 1 为地上部干物质质量、氮素累积量与生长时间的 Logistic 函数的拟合方程,并对其求一阶导数(图 2)、二阶导数(表 2)。由图 2 可知,地上部干物质、氮素累积速率均随生长时间的递进先增加后减小,各处理之间的差异随着生长时间的推进而加大。相同灌水情况下,地上部干物质累积速率和氮素累积速率(除 W0.8 灌水水平)均随施氮量的增加先增加后减小。如表 2 所示,快增期内,各灌水水平下的地上部干物质平均累积速率最大值分别为 W0.6N225、

表 1 地上部干物质质量、氮素累积量与生长时间的 Logistic 函数拟合

处理	地上部干物质质量			氮素累积量		
	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P
W0.6N150	$Y = 20\,916.66 / (1 + 399.27e^{-0.057t})$	0.99	<0.01	$Y = 82.58 / (1 + 498.15e^{-0.068t})$	0.98	<0.01
W0.6N225	$Y = 25\,983.21 / (1 + 808.61e^{-0.068t})$	0.99	<0.01	$Y = 113.85 / (1 + 1\,318.55e^{-0.085t})$	0.99	<0.01
W0.6N300	$Y = 20\,742.19 / (1 + 914.42e^{-0.069t})$	0.99	<0.01	$Y = 99.53 / (1 + 1\,225.33e^{-0.083t})$	0.99	<0.01
W0.6N375	$Y = 21\,790.84 / (1 + 664.04e^{-0.064t})$	0.99	<0.01	$Y = 107.37 / (1 + 707.39e^{-0.073t})$	0.99	<0.01
W0.8N150	$Y = 22\,891.59 / (1 + 881.97e^{-0.069t})$	0.99	<0.01	$Y = 91.96 / (1 + 1\,869.06e^{-0.094t})$	0.96	<0.01
W0.8N225	$Y = 27\,571.16 / (1 + 938.34e^{-0.069t})$	0.99	<0.01	$Y = 120.96 / (1 + 2\,033.24e^{-0.091t})$	0.99	<0.01
W0.8N300	$Y = 28\,910.09 / (1 + 650.24e^{-0.066t})$	0.99	<0.01	$Y = 124.92 / (1 + 1\,936.99e^{-0.094t})$	0.99	<0.01
W0.8N375	$Y = 27\,634.89 / (1 + 427.29e^{-0.058t})$	0.99	<0.01	$Y = 125.29 / (1 + 4\,364.13e^{-0.100t})$	0.99	<0.01
W1.0N150	$Y = 29\,274.00 / (1 + 421.16e^{-0.053t})$	0.99	<0.01	$Y = 100.52 / (1 + 350.99e^{-0.063t})$	0.95	<0.01
W1.0N225	$Y = 30\,990.65 / (1 + 484.57e^{-0.058t})$	0.99	<0.01	$Y = 123.60 / (1 + 360.38e^{-0.068t})$	0.98	<0.01
W1.0N300	$Y = 29\,666.12 / (1 + 2765.39e^{-0.079t})$	0.99	<0.01	$Y = 136.88 / (1 + 879.91e^{-0.075t})$	0.99	<0.01
W1.0N375	$Y = 23\,394.15 / (1 + 395.98e^{-0.056t})$	0.99	<0.01	$Y = 104.56 / (1 + 1\,171.19e^{-0.081t})$	0.99	<0.01

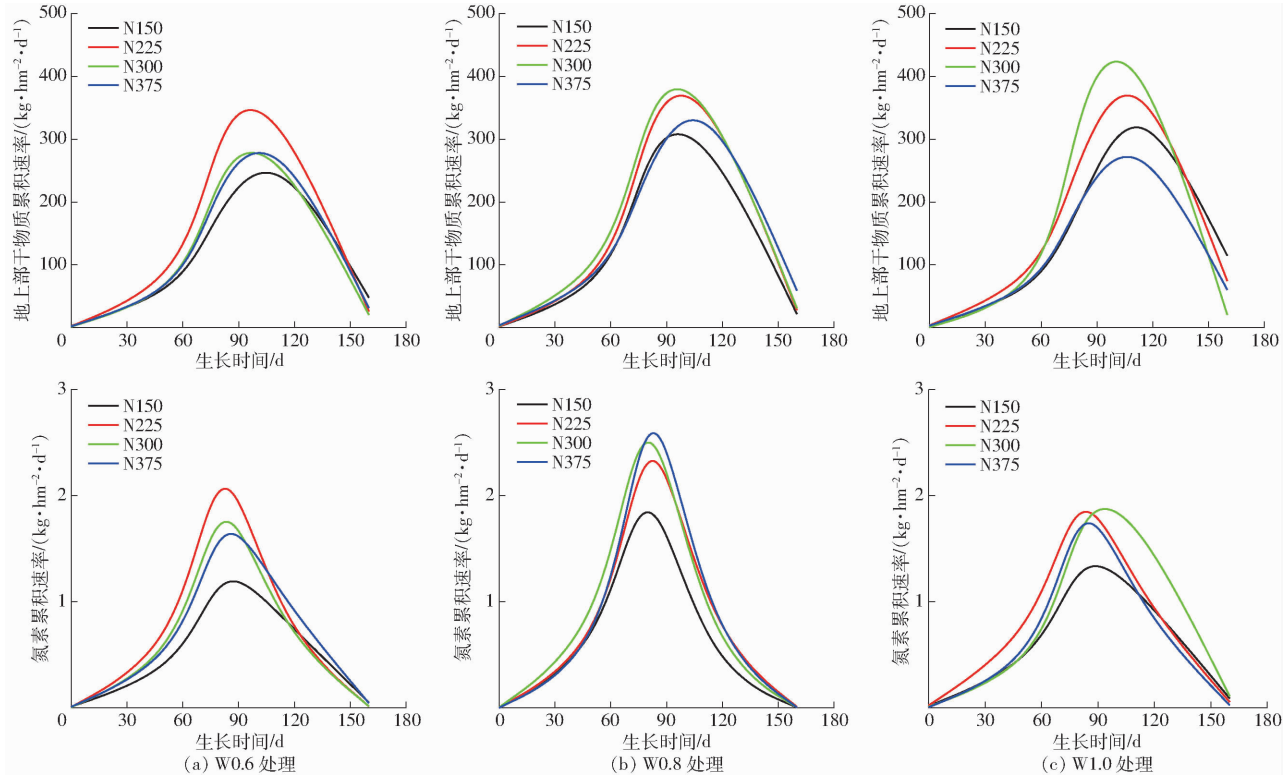


图 2 不同水氮处理对地上部干物质、氮素累积速率的影响

Fig.2 Effects of different water and nitrogen treatments on rate of aboveground dry biomass and nitrogen accumulation

表 2 不同处理春玉米地上部干物质和氮素累积特征

Tab.2 Accumulation of aboveground dry biomass and nitrogen of spring maize under different treatments							
项目	处理	渐增期		快增期		缓增期	
		持续时间/d	平均累积速率/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	持续时间/d	平均累积速率/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	持续时间/d	平均累积速率/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)
地上部干物质	W0.6N150	81.98	53.92	46.21	261.34	31.81	111.41
	W0.6N225	79.09	69.42	38.74	387.29	42.17	120.96
	W0.6N300	79.73	54.98	38.17	313.72	42.10	97.00
	W0.6N375	80.96	56.88	41.16	305.69	37.89	108.22
	W0.8N150	79.21	61.07	38.17	346.23	42.62	106.00
	W0.8N225	80.10	72.73	38.17	417.00	41.72	129.84
	W0.8N300	78.19	78.14	39.91	418.24	41.90	134.35
	W0.8N375	81.73	71.45	45.41	351.33	32.85	145.51
	W1.0N150	89.17	69.37	49.70	340.09	21.13	181.37
	W1.0N225	83.90	78.05	45.41	394.00	30.69	169.75
	W1.0N300	83.64	74.95	33.34	513.71	43.01	139.62
	W1.0N375	83.29	59.35	47.04	287.16	29.67	128.45
氮素累积	W0.6N150	81.98	0.25	46.21	1.25	31.81	0.34
	W0.6N225	79.09	0.35	38.74	2.12	42.17	0.40
	W0.6N300	79.73	0.30	38.17	1.81	42.10	0.36
	W0.6N375	80.96	0.32	41.16	1.72	37.89	0.42
	W0.8N150	79.21	0.29	38.17	1.89	42.62	0.29
	W0.8N225	80.10	0.37	38.17	2.41	41.72	0.41
	W0.8N300	78.19	0.40	39.91	2.57	41.90	0.40
	W0.8N375	81.73	0.37	45.41	2.75	32.85	0.42
	W1.0N150	89.17	0.29	49.70	1.39	21.13	0.43
	W1.0N225	83.90	0.39	45.41	1.84	30.69	0.47
	W1.0N300	83.64	0.37	33.34	2.10	43.01	0.62
	W1.0N375	83.29	0.31	47.04	1.83	29.67	0.39

W0.8N300 和 W1.0N300 处理,其中 W1.0N300 处理的地上部干物质平均累积速率最大,为 $513.71\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$,与其他两个处理相比分别提高了 32.56% 和 22.83% ;各灌水水平下的氮素平均累积速率最大值分别为 W0.6N225、W0.8N375 和 W1.0N300 处理,其中 W0.8N375 处理的氮素平均累积速率最大,为 $2.75\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$,与其他两个处理相比分别提高了 29.72% 和 30.95% 。

2.2 水氮互作对春玉米地上部干物质累积量、产量和水分利用效率的影响

由图 3(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)可知,在 W0.6 和 W1.0 灌水水平条件下,当施氮量分别高于 $225、300\text{ kg}/\text{hm}^2$ 时会抑制该灌水条件下春玉米的生长,从而降低了地上部干物质质量累积量,地上部干物质累积量总体表现出随施氮量增加先增加后减小的趋势,说明施氮量

过大阻碍干物质的累积,降低了籽粒干物质的累积量。而在 W0.8 灌水水平条件下,该现象并不太明显。在各处理之间籽粒干物质累积量最大,分别占总累积量的 $52.69\% \sim 57.00\%$ 。W1.0N225 处理的总累积量最大,但与 W0.8N300 和 W1.0N300 处理无显著性差异($P > 0.05$)。各灌水水平下,产量均随施氮量的增加先增加后减小,其中 W0.8N300 处理的产量最大,为 $16\,387\text{ kg}/\text{hm}^2$,虽与 W1.0 灌水水平最高产量处理无显著性差异($P > 0.05$),却显著高于 W0.6 灌水水平最高产量处理($P < 0.05$)。另外,在 W0.6 灌水水平条件下,N375 处理的水分利用效率显著低于其他处理($P < 0.05$);在 W0.8 和 W1.0 灌水水平条件下,WUE 随着灌水量的增加先增加后减小,W0.8N300 处理的 WUE 最高,为 $3.34\text{ kg}/\text{m}^3$,与 W0.6N225 和 W1.0N300 相比提高了 19.71% 和 17.16% 。

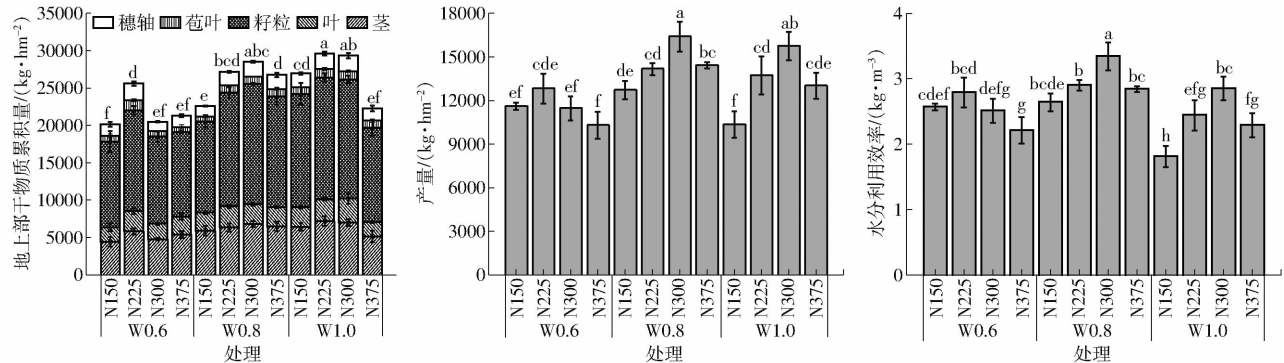


图 3 不同水氮处理对地上部干物质累积量、产量及水分利用效率的影响

Fig. 3 Effects of different water and nitrogen treatments on aboveground dry biomass, yield and water use efficiency

2.3 水氮互作对春玉米抽雄期后氮素吸收的影响

由图 4 可知,随着播后时间的递进,春玉米氮素总累积量不断增加。播后第 85 天(抽雄期),各器官的氮累积量表现为叶大于茎;播后第 113 天(灌浆期)和 160 天(成熟期),籽粒的氮素累积量在持续增加,茎、叶的氮素累积量在逐渐减小。抽雄期

(图 4a)春玉米氮素吸收量较小,占总吸收量的 $39.6\% \sim 59.0\%$,相同灌水条件下,除 W1.0N300 和 W1.0N375 处理差异不显著外,不同施氮处理之间差异显著($P < 0.05$),春玉米氮素吸收量均随施氮量的增加先增加后减小。灌浆期(图 4b)氮素快速累积,占总吸收量的 $72.1\% \sim 92.9\%$,W0.8N225、

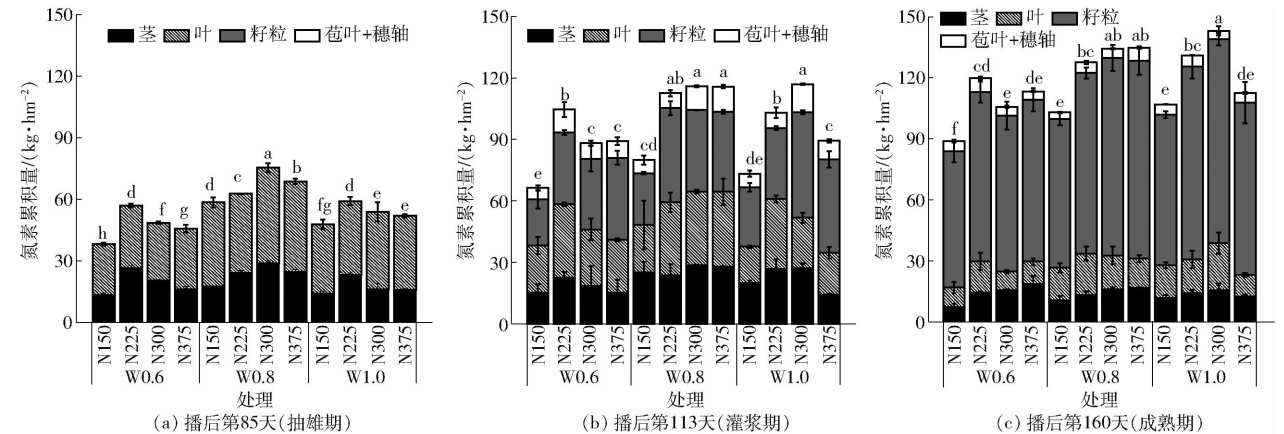


图 4 不同水氮处理对春玉米氮素累积量的影响

Fig. 4 Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen accumulation of spring maize

W0.8N300 和 W0.8N375 处理差异不显著,W0.6 和 W1.0 灌水水平下,春玉米氮素吸收量均随施氮量的增加先增加后减小。随着生育期延长至成熟期(图 4c),植株茎叶中的氮素积累量呈降低趋势,而籽粒的氮素吸收量呈增大趋势,说明抽雄期后营养器官中的氮素向籽粒中转移;另外,相同灌水条件下,成熟期植株的氮素吸收量的表现规律与灌浆期相似(图 4)。

由表 3 可知,灌水量和施氮量的耦合作用对抽雄期后氮素吸收量、营养器官氮素转运量和氮素转运效率(NRE)均有极显著性影响($P<0.01$)。各灌水条件下,N150 处理抽雄期后氮素吸收量均较低,可能与该试验处理氮肥供应不足有关;W0.6 灌水水平下,随着施氮量的增加,营养器官氮素转运量呈先增加后减小的趋势,并在 W0.8 灌水水平下获得最大值,为 41.14 kg/hm²。另外,在 W0.6 灌水水平下,N375 处理的 NRE 最低,显著低于其他处理($P<0.05$);W0.8 灌水水平下,各处理的 NRE 无显著性差异($P>0.05$);W1.0 灌水水平下,N375 处理的 NRE 最高,显著高于其他处理($P<0.05$)。

表 3 不同水氮处理对春玉米抽雄期前后氮素累积及运转的影响

Tab.3 Effects of different water and nitrogen treatments on pre- and post tasseling N accumulation and remobilization of spring maize

处理		抽雄期后	营养器官	营养器官
灌水量	施氮量	氮素吸收量/ (kg·hm ⁻²)	氮素转运量/ (kg·hm ⁻²)	氮素转运率/ %
W0.6	N150	46.29 ^{ef}	22.73 ^{de}	59.75 ^a
	N225	56.79 ^{bcde}	31.97 ^b	56.22 ^{ab}
	N300	49.85 ^{cde}	25.24 ^{cd}	51.89 ^{abc}
	N375	59.97 ^{bc}	17.65 ^{ef}	38.62 ^{de}
W0.8	N150	39.39 ^f	33.35 ^b	57.00 ^{ab}
	N225	58.39 ^{bcd}	30.96 ^b	49.36 ^{bc}
	N300	52.38 ^{cde}	41.14 ^a	54.54 ^{ab}
	N375	59.14 ^{bcd}	39.29 ^a	57.14 ^{ab}
W1.0	N150	53.83 ^{cde}	21.31 ^{def}	44.72 ^{cd}
	N225	65.37 ^b	30.03 ^{bc}	50.69 ^{abc}
	N300	82.13 ^a	17.15 ^f	31.81 ^e
	N375	49.10 ^{def}	31.02 ^b	59.71 ^a
ANOVA 检验 <i>F</i> 值				
灌水量		8.02 ^{**}	124.51 ^{**}	8.96 ^{**}
施氮量		13.35 ^{**}	6.21 ^{**}	4.75 [*]
灌水量×施氮量		9.69 ^{**}	15.68 ^{**}	11.90 ^{**}

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),*表示达到显著水平($P<0.05$),**表示达到极显著水平($P<0.01$),下同。

2.4 水氮互作对春玉米氮素利用的影响

由表 4 可知,灌水量对春玉米氮素利用效率(NUE)有显著性影响($P<0.05$),对氮素吸收效率

(UPE)和氮肥利用率有极显著性影响($P<0.01$),对氮收获指数无显著性影响($P>0.05$),施氮量对其均无显著性影响($P>0.05$),但二者的耦合作用却均有极显著性影响($P<0.01$)。W0.6 灌水水平下 N150 处理的 NUE 显著高于其他处理($P<0.05$);W0.8 灌水水平下,N150 和 N300 处理无显著差异($P>0.05$),但显著高于 N375 处理;而 W1.0 灌水水平下,N375 处理显著高于 N150 处理($P<0.05$)。相同灌水水平下,UPE 和氮肥利用率均随着施氮量的增加而减小,另外,各处理之间的氮收获指数的变化范围为 0.69~0.75,进一步说明春玉米吸收的氮素主要用于形成籽粒,促进产量的提高。

表 4 不同水氮处理对春玉米氮素利用的影响

Tab.4 Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen use of spring maize

处理		氮素利 用效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素吸 收效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥 利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮收获 指数
W0.6	N150	138.19 ^a	0.56 ^b	77.38 ^b	0.75 ^a
	N225	112.71 ^{bcde}	0.50 ^c	57.03 ^{def}	0.69 ^c
	N300	114.24 ^{bcd}	0.33 ^e	38.22 ^g	0.72 ^{abc}
	N375	96.46 ^e	0.28 ^f	27.44 ^h	0.70 ^c
W0.8	N150	129.94 ^{ab}	0.65 ^a	84.79 ^a	0.70 ^{bc}
	N225	116.96 ^{bcd}	0.53 ^{bc}	62.95 ^{cd}	0.69 ^c
	N300	128.31 ^{ab}	0.42 ^d	54.62 ^{ef}	0.72 ^{abc}
	N375	113.01 ^{bcde}	0.34 ^e	38.47 ^g	0.72 ^{abc}
W1.0	N150	101.82 ^{de}	0.67 ^a	68.99 ^c	0.69 ^c
	N225	110.27 ^{cde}	0.55 ^b	61.00 ^{de}	0.72 ^{abc}
	N300	115.89 ^{bcd}	0.45 ^d	52.47 ^f	0.70 ^c
	N375	125.17 ^{abc}	0.27 ^f	34.70 ^g	0.75 ^a
ANOVA 检验 <i>F</i> 值					
灌水量		5.65 [*]	16.43 ^{**}	39.13 ^{**}	0.50
施氮量		2.50	1.33	1.32	1.39
灌水量×施氮量		6.63 ^{**}	5.95 ^{**}	5.85 ^{**}	3.43 ^{**}

2.5 水氮互作对根区土壤硝态氮残留及分布规律的影响

如图 5 所示,相同灌水条件下,土壤残留的硝态氮含量与施氮量成正比。W0.6 灌水水平下,土壤残留的硝态氮主要聚集在 0~60 cm 土层,并在滴头正下方 40 cm 处出现硝态氮累积区,在相同土层深度处,各处理土壤中的硝态氮含量在水平方向有向远离滴灌带减小的趋势;W0.8 灌水水平下,硝态氮累积区有向下移动的趋势,土壤残留的硝态氮含量主要聚集在 90 cm 以上的土层,水平方向的硝态氮含量表现规律与 W0.6 灌水水平相似;W1.0 灌水水平下,W1.0N150 和 W1.0N225 处理残留的硝态氮含量很小,而 W1.0N300 和 W1.0N375 处理的硝态氮累积区出现在植株正下方 70~80 cm 土层,并向下移的

趋势,该趋势随着施氮量的增加表现得更加明显。通过计算各灌水处理下各土层硝态氮累积残留量占总累积残留量的比例可知,0~40 cm 土层硝态氮累积残留量最大,由大到小依次为 W0.6、W0.8、W1.0。随着灌水量的增加,60~100 cm 土层硝态氮累积残留量所占

的比例逐渐增加,该现象随着施氮量的增加表现更加明显。试验结果表明,在沙土地区,低灌水量处理的硝态氮累积残留量主要集中在土壤表层,随着灌水量和施氮量的增加,土壤中的硝态氮会随着水分垂直运动,使更多的硝态氮往深层土壤运动。

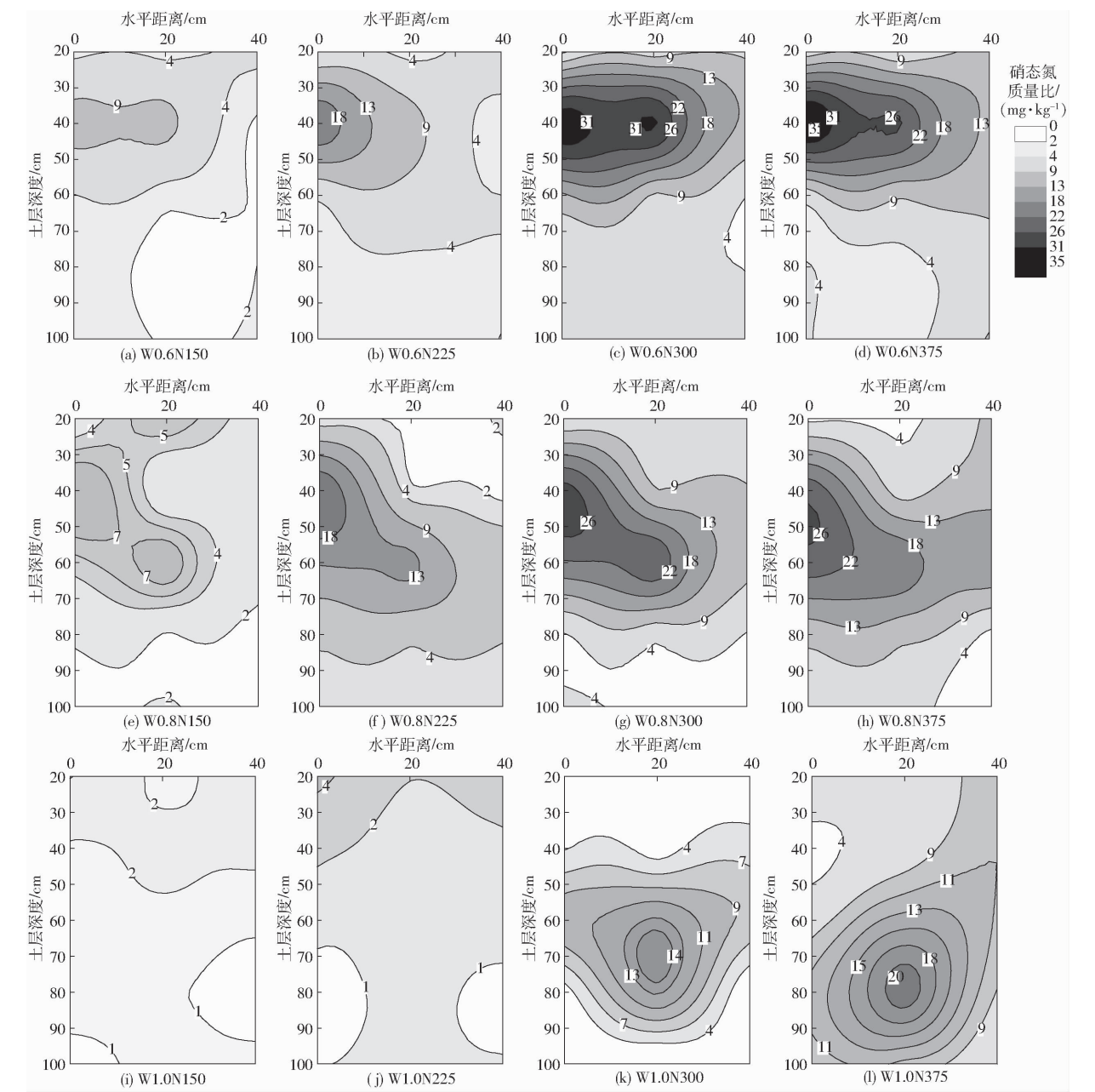


图5 滴灌施氮条件下春玉米收获期根区土壤硝态氮含量分布图

Fig.5 Distributions of soil NO₃⁻-N in harvest period of spring maize root area under nitrogen treatments

3 讨论

前人对棉花^[25]、甜瓜^[26]、番茄^[27]的水肥耦合研究结果表明,适宜的水肥条件下作物产量最高,当水肥供应超过一定阈值时,产量呈下降趋势,本研究结果与之相似:施氮量低于 225 kg/hm² (或 300 kg/hm²), W0.6 (或 W0.8、W1.0) 灌水水平下,增加施氮量对提高作物产量和氮素吸收利用明显,但当施氮量高

于 225 kg/hm² (或 300 kg/hm²) 时,增产效果不显著且造成减产,同时也符合 GHEYSAARI 等^[28] 的最佳施氮量会随灌水量的增加而增加的研究结果。另外本研究表明,相同灌水条件下,大多处理的地上部干物质和氮素累积速率均随施氮量的增加先增加后减小,其中在快增期内,W1.0N300 处理的地上部干物质平均累积速率最大,为 513.71 kg/(hm²·d), W0.8N375 处理的氮素平均累积速率最大,为

2.75 kg/(hm²·d)。在中灌水(W0.8)和高灌水(W1.0)灌水条件下,水分利用效率随着灌水量的增加先增加后减小,并且低灌水(W0.6)条件下,N375处理的WUE也显著低于其他处理($P < 0.05$)。

本研究结果发现,抽雄期后,茎和叶的氮素吸收累积量随着生育期的递进逐渐减小,籽粒氮素累积量逐渐增加,说明抽雄期后植株营养器官中的氮素向籽粒中发生了转运^[29]。各灌水水平下,施氮量为150 kg/hm²处理的抽雄期后氮素吸收量均较低,可能是因为该施氮量不能有效地满足该地区春玉米后期对氮素的吸收利用。在W0.8灌水水平下的营养器官氮素转运量最大,为41.14 kg/hm²,在低灌水(W0.6)水平下,N375处理的NRE最低,显著低于其他处理($P < 0.05$),说明氮肥施用量过高对营养器官氮素的转运会产生抑制作用。另外,低灌水(W0.6)水平下,N150处理的NUE显著高于其他处理($P < 0.05$);中灌水(W0.8)水平下,N150和N300处理无显著差异($P > 0.05$),但显著高于N375处理,而高灌水(W1.0)水平下N375处理显著高于N150处理($P < 0.05$)。相同灌水条件下,氮素吸收效率和氮肥利用率均与施氮量成反比,与郭金金等^[30]的研究结果相似。

硝态氮作为作物吸收利用的主要形态^[31],其分布情况和残留量受作物氮素的吸收、灌水方法和施氮量的影响^[32],施氮量投入过高会显著增加土壤中硝态氮的残留^[33]。本研究发现,灌水量和施氮量对土壤硝态氮的分布和含量有显著性影响:增加施氮量,硝态氮含量增大;随着灌水量和施氮量的增加,深层土壤中硝态氮含量有逐渐增加的趋势;W0.6和W0.8灌水水平下滴头下方40~60 cm之间出现不同程度的硝态氮累积区,该现象随着施氮量的增加变得越明显,这与李久生等^[34]的研究结论比较相似。BADR等^[6]的研究也表明硝态氮随水分运移向湿润锋附近累积。这是因为硝态氮极易溶于水并随水流运动,根系的向水性使较多的水分在进入土壤后沿水平方向运动,在湿润体的横向边缘产生累积,而滴头的正下方由于含水量较高,阻碍了硝态氮的垂直运动,并且滴头正下方由于长期保持较高的含水量,使得该处通气状况较差,有利于反硝化作用的形成^[35],导致该处硝态氮含量较低。另外研究发现,随着灌水量的增加,60~100 cm土层硝态氮累积残留量所占的比例逐渐增加,而W0.8灌水水平下残留的硝态氮主要分布在0~90 cm土层,能较好地满足春玉米大部分根系对水分及养分的吸收利用^[17]。相比而言,W1.0灌水水平硝态氮的残留累

积区有下移的趋势,说明灌水量过多会产生重力水下渗,使得硝态氮向深层土壤淋失,增加地下水污染的几率^[36]。因此,合理的灌水量和施氮量,能够减缓硝态氮往深层土壤的运移,从而降低了地下水污染的风险。

综合考虑产量、氮素利用效率和土壤硝态氮残留累积量及分布规律,W0.8N300处理的产量最高,并且氮素吸收累积量与最高氮素吸收累积量W1.0N300处理无显著性差异;N150处理的氮素吸收利用效率虽然获得最大值,但严重影响产量,不符合实际高产目标。高灌水(W1.0)处理增加了土壤硝态氮向深层渗漏的几率,而中灌水(W0.8)处理的土壤硝态氮分布在0~90 cm土层,较好地满足了春玉米根系对水分及养分的吸收利用。另外,考虑到试验区年际降雨量分布不均,具体的灌水量应以实际降雨量为参考进行调整。因此,灌水量与有效降雨量之和为532 mm、施氮量为300 kg/hm²是宁夏沙土地区适宜的滴灌灌水施氮组合。

4 结论

(1)相同灌水条件下,春玉米地上部干物质累积速率和氮素累积速率(W0.8灌水水平除外)均随施氮量的增加先增加后减小。在快增期内,W1.0N300处理的春玉米地上部干物质平均累积速率和W0.8N375处理的氮素平均累积速率最大,分别为513.71、2.75 kg/(hm²·d)。

(2)春玉米地上部干物质累积量(W0.8N375处理除外)和产量随施氮量的增加先增加后减小,W0.6灌水水平的最佳施氮量明显低于W0.8和W1.0灌水水平。W0.8N300处理的产量最大,为16 387 kg/hm²。

(3)W0.6和W1.0灌水水平下,植株氮素吸收量均随施氮量的增加先增加后减小;而W0.8灌水水平下,除W0.8N150处理,其余处理无显著性差异。另外,W0.8N300的营养器官氮素转运量最大,为41.14 kg/hm²。

(4)0~100 cm土层中的硝态氮累积量与施氮量成正比,与灌水量成反比。W0.6灌水水平下,土壤残留的硝态氮主要聚集在0~60 cm土层中,W0.8灌水水平下,土壤残留的硝态氮主要聚集在0~90 cm土层中,W1.0灌水水平的硝态氮有下移的趋势。

(5)考虑试验区年降雨量分配不均,本研究选取灌水量与有效降雨量之和为532 mm、施氮量300 kg/hm²为宁夏沙土地区适宜的滴灌灌水施肥制度。

参 考 文 献

- [1] FAN J L, WU L F, ZHANG F C, et al. Evaluation of drip fertigation uniformity affected by injector type, pressure difference and lateral layout[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(4):520–529.
- [2] 李云开,冯吉,宋鹏,等.低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(6):83–92.
LI Yunkai, FENG Ji, SONG Peng, et al. Developing situation and system construction of low-carbon environment friendly drip irrigation technology[J/OL]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):83–92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160611&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.011. (in Chinese)
- [3] 田富强,温洁,胡宏昌,等.滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. *水利学报*,2018,49(1):126–135.
TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1):126–135. (in Chinese)
- [4] SUI J, WANG J D, GONG S H, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215:132–139.
- [5] TANG L S, LI Y, ZHANG J H. Partial root zone irrigation increases water use efficiency, maintains yield and enhances economic profit of cotton in arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10):1527–1533.
- [6] BADR M A, HUSSEIN S D A, ELTOHAMY W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2010, 62(1):11–19.
- [7] MAN J G, YU J S, WHITE P J, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161:26–37.
- [8] 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 irrigation and fertilization strategies on nitrogen balance and soil nitrate movement of high-yield cotton system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5):946–955. (in Chinese)
- [9] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216:225–233.
- [10] CHILUNDO M, JOEL A, WESSTROM I, et al. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil[J]. *Field Crops Research*, 2017, 200:143–162.
- [11] GHEYSAARI M, MIRLATIFI S M, HOMAEE M, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6):946–954.
- [12] 刘洋,栗岩峰,李久生,等.东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J/OL]. *农业机械学报*,2015,46(10):93–104.
LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):93–104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014. (in Chinese)
- [13] 王建东,龚时宏,高占义,等.滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*,2009,25(11):68–73.
WANG Jiandong, GONG Shihong, GAO Zhanyi, et al. Effects of drip irrigation mode on spatial distribution of soil water and nitrogen and winter wheat yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11):68–73. (in Chinese)
- [14] 韦彦,孙丽萍,王树忠,等.灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. *农业工程学报*,2010,26(8):67–72.
WEI Yan, SUN Liping, WANG Shuzhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8):67–72. (in Chinese)
- [15] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. *应用生态学报*,2015,26(12):3679–3686.
GUO Bingyu, GAO Hui, TANG Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12):3679–3686. (in Chinese)
- [16] RICHARD G, ALLEN L S P, DIRK R, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [17] 邹海洋,张富仓,张雨新,等.适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*,2017,33(21):145–155.
ZOU Haiyang, ZHANG Fucang, ZHANG Yuxin, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21):145–155. (in Chinese)
- [18] 范军亮,张富仓,吴立峰,等.滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. *农业工程学报*,2016,32(12):96–101.
FAN Junliang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12):96–101. (in Chinese)
- [19] 周昌明,李援农,谷晓博,等.降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(2):133–142,112.
ZHOU Changming, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):133–142, 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160218&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.018. (in Chinese)
- [20] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAADIS, ZAND-PARSA S. Logistic model application for prediction of maize yield under

- water and nitrogen management[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1):51–57.
- [21] 魏廷邦,胡发龙,赵财,等.氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(15):2916–2927.
WEI Tingbang, HU Falong, ZHAO Cai, et al. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing application in oasis irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15):2916–2927. (in Chinese)
- [22] 魏廷邦,柴强,王伟民,等.水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(3):428–444.
WEI Tingbang, CHAI Qiang, WANG Weimin, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(3):428–444. (in Chinese)
- [23] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22):111–120.
ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigated spring maize in Ningxia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22):111–120. (in Chinese)
- [24] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. *Agronomy Journal*, 1962, 74(3):562–564.
- [25] WANG H D, WU L F, CHENG M H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in Northern Xinjiang, China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 219:169–179.
- [26] 岳文俊,张富仓,李志军,等.水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):88–96, 119.
YUE Wenjun, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):88–96, 119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150214&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014. (in Chinese)
- [27] 邢英英,张富仓,吴立峰,等.基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊1):110–121.
XING Yingying, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Sup.1):110–121. (in Chinese)
- [28] GHEYSAARI M, MIRLATIFI S M, BANNAYAN M, et al. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(5):809–821.
- [29] 周翔,陈上,何川,等.覆膜和控/缓释肥互作对春玉米生长与氮素利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8):321–330.
ZHOU Xiang, CHEN Shang, HE Chuan, et al. Influences of interactions of plastic film mulching and controlled/slow release fertilizer on growth and nitrogen utilization of spring maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):321–330. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190835&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.035. (in Chinese)
- [30] 郭金金,张富仓,王海东,等.不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20):3930–3943.
GUO Jinjin, ZHANG Fucang, WANG Haidong, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20):3930–3943. (in Chinese)
- [31] SUN Y, HU K, ZHANG K, et al. Simulation of nitrogen fate for greenhouse cucumber grown under different water and fertilizer management using the EU-Rotate_N model[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112:21–32.
- [32] 王振华,权丽双,郑旭荣,等.水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10):91–100.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10):91–100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161013&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013. (in Chinese)
- [33] 银敏华,李援农,李昊,等.氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6):129–138.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen surplus and nitrogen use efficiency of summer maize[J/OL]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):129–138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160617&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017. (in Chinese)
- [34] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌系统运行方式对砂壤土水氮分布影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2004, 35(9):31–37.
LI Jiusheng, ZHANG Jianjun, RAO Minjie. Effect of drip irrigation system operation on water and nitrate distribution in soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(9):31–37. (in Chinese)
- [35] WEIER K L, MACRAE I C, MYERS R J K. Denitrification in a clay soil under pasture and annual crop: estimation of potential losses using intact soil cores[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(8):991–997.
- [36] LIANG B C, MACKENZIE A F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2):235–240.