

华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响

白珊珊^{1,2} 万书勤¹ 康跃虎^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 针对华北平原地区冬小麦水肥利用效率低且造成一定的面源污染问题,研究了滴灌施肥灌溉对冬小麦生长、产量及其构成要素、耗水量、水分利用效率、灌溉水利用效率和土壤养分分布的影响。结果表明:滴灌施肥灌溉条件下,2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年冬小麦平均产量为 7 120.5 kg/hm²,相比当地产量(6 000 kg/hm²)提高了 18.7%,冬小麦穗粒数和千粒质量表现较好,千粒质量平均提高了 4.3 g。2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年冬小麦全生育期耗水量平均为 387.9 mm。播种期—拔节期降水量占阶段耗水量的比例最大(52%),拔节期—抽穗期灌水量所占比例最大(78%),而抽穗期—收获期土壤储水量的消耗量所占比例最大(54%)。3 年度冬小麦全生育期耗水量各组成所占比例表现为:灌水量所占比例最大,为 49%,其次是土体储水量的消耗量,占总耗水量的 25%,降水量占总耗水量的 24%,地下水补给量占总耗水量的比例最小,仅 2%。冬小麦水分利用效率和灌溉水利用效率分别为 1.8、3.9 kg/m³,相比地面灌溉分别提高了 38%、95%。养分主要分布在根区 0~40 cm 土层内,养分利用率高,养分淋失少。因此,华北平原地区控失肥作为底肥,采用滴灌施肥灌溉进行随水追肥,当施肥量为当地施肥量的 70% 时,可提高冬小麦产量 18.7%,穗粒数和千粒质量表现较好。此外,滴灌施肥灌溉可节水 36%,节肥 30%,提高灌溉水利用效率 95%,提高水分利用效率 38%。

关键词: 冬小麦; 滴灌施肥灌溉; 耗水量; 水分利用效率

中图分类号: S275.6; S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0269-08

Effects of Drip Fertigation on Winter Wheat Growth and Water Use in North China Plain

BAI Shanshan^{1,2} WAN Shuqin¹ KANG Yaohu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of water and fertilizer in winter wheat which caused non-point source pollution in North China Plain, the objective of this experiment was to study the effects of drip fertigation on winter wheat growth, grain yield, water consumption, water use efficiency and nutrient distribution, and provide scientific basis and technical support for the application and extension of drip fertigation. Field experiments were conducted in 2013—2014, 2014—2015 and 2015—2016 three successive winter wheat growing seasons. Under drip fertigation, the fertilizer amount of fertigation was 70% of local fertilizer amount, and the soil matric potential at 0.2 m depth for winter wheat was controlled higher than -40 kPa. Results showed that under drip fertigation in winter wheat growing seasons in North China Plain, the average yield of winter wheat in 2013—2014, 2014—2015 and 2015—2016 was 7 120.5 kg/hm², which was increased by 18.7%. The thousand kernel weight of winter wheat was increased by 4.3 g averagely. The average water consumption was 387.9 mm. Precipitation was the highest proportion of total water consumption, accounting for 52% in sowing to jointing stage, irrigation was the highest proportion (78%) in jointing to heading stage, while the soil water depletion was the highest (54%) in heading to harvest stage. In three winter wheat growing seasons, the percentage of

收稿日期: 2017-06-30 修回日期: 2017-09-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02、2014BAD12B05、2013BAD05B08)

作者简介: 白珊珊(1989—),女,博士生,主要从事农田水肥高效利用研究,E-mail: bss215202465@126.com

通信作者: 万书勤(1978—),女,副研究员,博士,主要从事农田水循环与节水灌溉研究,E-mail: wansq@igsnrr.ac.cn

different water sources in total water consumption showed that irrigation amount was the largest proportion (49%), the soil water consumption and precipitation accounted for 25% and 24%, the groundwater supplementary amount was the lowest, only 2%. Under drip fertigation, water use efficiency and irrigation water use efficiency for winter wheat was 1.8 kg/m^3 and 3.9 kg/m^3 , which were increased by 38% and 95%, respectively compared with surface irrigation. The nutrient mainly distributed in 0 ~ 40 cm layers with high nutrient efficiency and low nutrient leaching. In North China Plain, when the fertilizer amount of fertigation was 70% of local fertilizer amount with loss-control fertilizer as basal fertilizer and drip irrigation, the grain yield was increased by 18.7% with better spike grain number and thousand kernel weight. Meanwhile, drip irrigation can save water by 36% and save fertilizer by 30%, improve irrigation water use efficiency by 95% and increase water use efficiency by 38%.

Key words: winter wheat; drip fertigation; water use; water use efficiency

0 引言

华北平原是我国粮食生产的重点区域,该区小麦总产量占全国的1/3,是我国小麦主产区,在保障我国粮食安全中占有重要地位^[1]。然而,该区小麦耗水总量450 mm左右,生育期内降水量只有50 ~ 150 mm^[2-3],灌溉水需求量大。目前,该地区小麦生产主要是抽取地下水进行地面灌溉。一方面造成了水资源的大量浪费,水分利用效率低,冬小麦的水分利用效率仅为 1.2 kg/m^3 ^[4],远低于世界先进水平(1.8 kg/m^3)^[5]。另一方面,当地农民普遍采用的施肥方式是撒施后大水漫灌,不仅肥料损失量大、利用效率低^[6],而且易造成化肥的深层渗漏,地下水受到污染,造成面源污染^[7]。有研究指出,该区域大部地区氮肥利用率仅有20%,通过挥发、淋溶和反硝化的氮素损失率高达14% ~ 45%^[8]。因此,采用高效节水灌溉方式,适时、适量满足小麦的水肥需求,提高水肥利用效率,实现增产,对保障华北平原农业可持续发展和粮食安全具有重要作用。

滴灌施肥灌溉在灌溉的同时将肥料随水输送到作物根区,可以适时、适量满足作物的水肥需求^[9]。相比传统灌水、施肥方式,滴灌施肥灌溉可显著提高作物的水肥利用效率^[10]和产量^[11-12]。ARAFA等^[13]在埃及进行滴灌和喷灌小麦试验研究,结果表明,滴灌小麦产量比喷灌减少16% ~ 27%,但可节水43% ~ 76%。程裕伟等^[14]在新疆发现,滴灌小麦的产量显著高于漫灌小麦,产量增幅为10.89% ~ 18.63%,千粒质量提高了4.47 ~ 6.47 g。聂紫瑾等^[15]在华北黑龙港地区布置了冬小麦滴灌制度定位试验,结果表明,滴灌量比当地漫灌减少45 ~ 105 mm的条件下,也可达到稳产且水分利用效率显著提高。

滴灌因其投入成本较高,在粮食作物上应用相对较少,小麦滴灌的研究也主要集中在干旱的西北地区,在华北平原应用较少。因此,在华北平原地区,有必要制定简单、实用、可操作性强的小麦滴灌施肥灌溉制度。康跃虎^[16]多年研究发现,滴灌条件

下监控灌水器正下方0.2 m深度土壤水基质势,可以很好地控制大部分作物根系分布层的土壤水分状况,提出了通过监控特征点土壤水基质势的微灌农田水分管理方法。并且发现,对于番茄、黄瓜、马铃薯和萝卜等大部分行栽培经济作物,当灌水器正下方0.2 m深度的土壤基质势控制在-35 ~ -25 kPa范围时,就能获得高产^[17-19]。与传统地面灌溉相比,滴灌由于水分运动特点、施肥方式不同,因而养分在土壤中的分布、流失、不同生育期的营养水平均不相同。作物的需肥规律是由其自身的生物学特点决定的,因此,基于此康跃虎等提出了以地面灌溉施肥量为基准,通过田间试验获得滴灌条件下的施肥比例,以此来制定滴灌施肥灌溉制度的“比例法”。汪然等^[20]利用滴灌施肥灌溉技术在青海地区种植油菜,布置了5个滴灌施肥灌溉比例(分别为当地油菜施肥量的10%、30%、50%、70%、90%),结果表明,当施肥比例为当地施肥量的50%左右时,油菜产量最高,肥料偏生产力也较高。万书勤等^[21]针对柴达木盆地马铃薯农业生产的需求,布置了5个滴灌施肥灌溉比例(分别为当地马铃薯施肥量的10%、30%、50%、70%、90%)的田间试验,研究发现,随着施肥比例的增加,马铃薯的株高、叶面积、地上生物干质量及产量先增加,当施肥比例为70%时达到最大,之后又随着施肥比例的增大而降低。

本研究以控失肥为底肥,采用滴灌进行灌溉,每次灌溉加入肥料进行随水追肥,探索滴灌施肥灌溉对冬小麦生长指标、产量及其构成要素、耗水量、水分利用效率、灌溉水利用效率和土壤养分分布的影响,以期对华北平原小麦滴灌施肥灌溉技术的应用推广提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013—2014、2014—2015和2015—2016年3个年度冬小麦生育期在中国科学院南皮生态农业试验站(38°00'N, 116°40'E, 海拔11 m)进行。该

地区年平均气温 12.3℃,多年平均降水量 480 mm,但季节分配不均,多集中在夏秋季,冬春则比较干旱,即冬小麦生长季内降水较少。冬小麦生育期内地下水位一般在 1.5~3.0 m。

供试土壤基本理化性质详见表 1。试验区土壤 0~60 cm 为砂质壤土,60~140 cm 为粉砂壤土,偏

碱性。土壤硝态氮质量比剖面分布不均匀,土壤有机质质量比和速效磷质量比大致沿剖面从上而下逐渐降低,速效钾质量比较高。0~20 cm 土壤的基本性状为:有机质质量比为 9.6 g/kg,硝态氮质量比为 10.3 mg/kg,速效磷质量比为 6.4 mg/kg,速效钾质量比为 133.2 mg/kg。

表 1 供试土壤基本理化性质
Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil profiles

土壤深度/ cm	土壤质地	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
0~10	砂质壤土	12.3	14.3	0.7	8.7	161.2	8.2
10~20	砂质壤土	7.0	6.2	0.6	4.1	105.1	8.1
20~30	砂质壤土	5.0	2.8	0.5	2.0	102.0	8.0
30~40	砂质壤土	4.8	1.8	0.5	1.6	109.9	8.0
40~60	砂质壤土	5.1	2.6	0.6	1.5	131.9	8.0
60~80	粉砂壤土	6.3	4.2	0.7	1.8	159.1	8.0
80~100	粉砂壤土	6.2	9.0	0.6	1.7	151.5	8.1
100~120	粉砂壤土	4.7	20.0	0.4	1.9	110.3	8.1
120~140	粉砂壤土	4.0	26.9	0.4	1.7	98.0	8.2

1.2 试验设计

(1)灌溉制度设计

考虑到华北地区水资源匮乏,并且冬小麦在轻度干旱时根系趋于下扎,可以更有效地吸收和利用深层土壤中的水分。本试验设计对于冬小麦,当灌水器正下方 0.2 m 深度土壤基质势降低到 -40 kPa 时,进行滴灌灌溉。每次灌水量 8 mm,灌完 8 mm 水后,如果该点土壤基质势升高到 -10 kPa,则停止灌溉,如果仍低于 -10 kPa,再灌溉一次(灌水 8 mm)。

(2)施肥制度设计

参照当地冬小麦的施肥量和施肥方案:底肥磷酸二铵 375 kg/hm²,尿素 300 kg/hm²,在返青-拔节期追施尿素 300 kg/hm²,即总施肥量为 N 344 kg/hm²、P(P₂O₅)173 kg/hm²。基于研究团队的试验结果,本试验设计为当地施肥量 70%,即 N 235 kg/hm²、P(P₂O₅)118 kg/hm²。其中 60% N 和 100% P₂O₅底施控失型磷酸二铵(16-45-0)和尿素,拔节期到收获前 20 d 采用滴灌施肥灌溉追施尿素(40% N),每次灌溉前都把按天累计计算好的尿素加入施肥罐中进行施肥灌溉。

1.3 试验布置

供试冬小麦品种为小偃 81,平均行距 0.15 m,播种量 200~225 kg/hm²,机械播种,播种时间为 10 月 12 日左右,6 月上中旬机械收获。每个小区面积为 5.4 m×10 m=54 m²,每个小区 9 条滴灌带,滴灌带铺设间距为 0.6 m(4 行小麦),长度为 10 m,重复 3 次,每个试验处理(包括 3 个重复)为一个滴灌控制

单元,在滴灌控制单元入口安装有闸阀、水表、压力表、网式过滤器和压差式施肥罐。滴灌带的滴头间距 0.2 m,滴头流量为 1.38 L/h,工作压力控制在 0.1 MPa。每个滴灌控制单元的灌溉面积为 162 m²。

1.4 试验观测与方法

冬小麦生长指标:从返青期到收获期,每个小区测定 10 株,每 10 d 取样测量冬小麦生长指标,包括株高、干物质积累和叶面积指数。

冬小麦产量指标:冬小麦成熟收获时,每个小区随机选择 25 株考种,包括株高、穗长、结实小穗数、穗粒数和千粒质量等。另分别选取 4 个 1 m×1 m 的样方脱粒后进行测产,每个处理的小麦产量均以 3 次重复的平均值代表实际产量。

冬小麦耗水量利用农田水量平衡方程^[22]来计算

$$ET=I+P\pm\Delta S-D-R$$
 (1)

其中
$$D=-k_{\theta}\left(\frac{\psi_{m2}-\psi_{m1}}{z_2-z_1}+1\right)\Delta t$$
 (2)

式中 ψ_{m1} ——土层深度 120 cm 处的土壤水基质势,cm
 ψ_{m2} ——土层深度 140 cm 处的土壤水基质势,cm
 z_1 ——土层深度,取 120 cm
 z_2 ——土层深度,取 140 cm
 k_{θ} ——非饱和土壤导水率,cm/d
 Δt ——时间步长,d
 ET ——冬小麦生育期内的耗水量,mm
 I ——灌水量,mm P ——降水量,mm

ΔS ——0 ~ 140 cm 土体内土壤储水量的变化值,mm
 R ——地表径流,滴灌没有地表径流,所以 R 忽略不计
 D ——冬小麦生育期内,通过地下 130 cm 断面上的水量

D 值为正,说明水分从断面 130 cm 向下运动,为深层渗漏;当 D 值为负,说明水分向上运动,为地下水补给。

试验布置:在第 2 个重复小区上,选择比较平坦的地方安装负压计。负压计水平方向在距离滴头 0、15、30 cm 的位置上,安装深度分别为 120 cm 和 140 cm;每天 08:00 观测负压计读数,并每隔 15 d 取土样测定 120 cm 和 140 cm 土层负压计埋设点位的土壤含水率。最后利用式(2)计算 130 cm 土层深度的土壤渗漏量 D 。

水分利用效率^[23]为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{3}$$

式中 WUE ——水分利用效率,kg/m³

Y ——产量,kg/hm²

灌溉水利用效率为

$$I_{WUE} = \frac{Y}{I} \tag{4}$$

土壤养分测定:土壤硝态氮含量^[24]采用氯化钾溶液浸提,紫外分光光度法测定。

1.5 统计分析

采用 Excel 2010 软件对数据进行记录分类,示意图用 OriginPro 9.0 和 Excel 2010 进行绘制。方差分析采用 SAS 软件 ANOVA 过程处理,并采用 Duncan method 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 降水与灌溉

2013—2016 年 3 年度冬小麦生育期内的降水量如图 1 所示,灌水量详见表 2。2013—2014 年冬小麦生育期内,累计降水量达 103 mm,但降水量分布极不均匀,冬小麦返青-抽穗期降水量较少,仅为 13.9 mm,最大的一次降水量(32.1 mm)发生在 5 月中旬,此时冬小麦已经进入灌浆后期。2013—2014 年冬小麦生育期内灌水 272 mm。2014—2015 年冬小麦生育期内,累计降水量仅 68 mm,降水量分布极不均匀,播种-返青期降水量仅有 3 mm,拔节-抽穗期降水量较多,为 56 mm,占总降水量的 82%。最大的一次降水量(19.7 mm)发生在拔节前期,总生育期内灌水 161 mm。2015—2016 年冬小麦生育期内

累计降水量 108.6 mm,播种-返青期降水量较多(75.6 mm),占总降水量的 70%,返青期-拔节期间无降水量,起身期至灌浆盛期降水 33 mm,仅占降水量的 30%。2016 年灌水始于冬小麦拔节期,结束于灌溉期,共灌水 144 mm。参考河北省冬小麦生长季多年平均降水量(139.01 ± 24.61) mm^[25],可知 2013—2014 年和 2015—2016 年冬小麦生长季的总降水量偏少,而 2014—2015 年的过少。

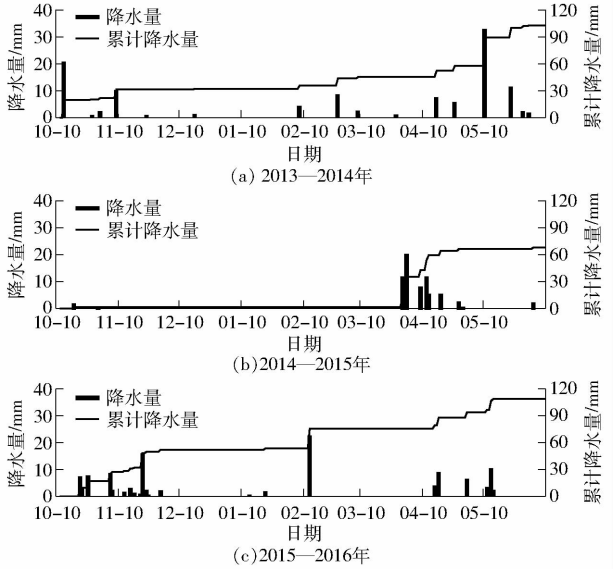


图 1 2013—2016 年 3 年度小麦生育期内降水量

Fig.1 Precipitation during winter wheat growing periods in 2013—2014, 2014—2015 and 2015—2016

表 2 2013—2016 年 3 年度小麦生育期内灌水量

Tab.2 Irrigation amounts during winter wheat growing periods in three growing periods

年份	灌水量/mm	灌水次数
2013—2014	272.0	11
2014—2015	161.0	8
2015—2016	144.0	7

2.2 冬小麦生长指标

图 2 ~ 4 分别描述了 2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉条件下冬小麦株高、干物质量和叶面积指数的变化状况。冬小麦株高的变化也主要发生在拔节期-抽穗开花期,在开花期达到最大,之后趋于稳定。2013—2014 年冬小麦的最大株高为 77 cm 左右,而 2014—2015 年和 2015—2016 年冬小麦最大株高均在 72 cm 左右。滴灌施肥灌溉条件下,冬小麦地上部分干物质量随生育期变化的规律表现为:拔节期前,冬小麦干物质量积累缓慢,而拔节-收获期冬小麦干物质量积累较快。干物质量整个生育期内都处于上升趋势。2013—2014 年冬小麦收获时单株干物质量达到 2.7 g/株,群体生物量 23 943.8 kg/hm²,2014—2015 年

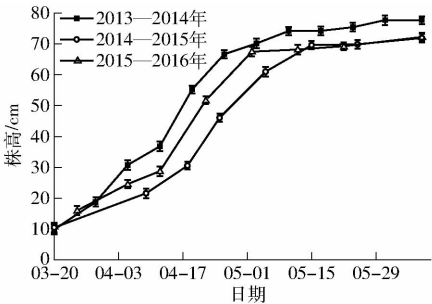


图 2 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦株高变化情况

Fig. 2 Dynamics of plant height of winter wheat in three growing periods

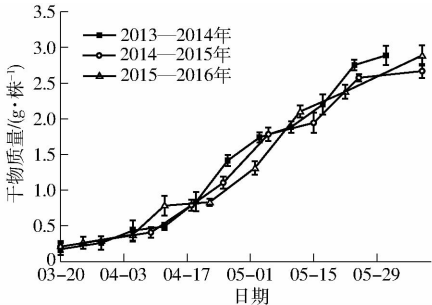


图 3 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦生物量积累情况

Fig. 3 Dynamics of biomass accumulation in three winter wheat growing periods

冬小麦单株干物质量达到 2.4 g/株,群体生物量达到 16 189.4 kg/hm²,2015—2016 年冬小麦单株干物质量达到 2.9 g/株,群体生物量达到 20 505.1 kg/hm²。

2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年 3 年度的叶面积指数均表现为从返青期到拔节后期,叶面积指数逐渐增大,此后随着底部叶片开始出现枯萎,无效分蘖逐渐死亡,叶面积指数逐渐减小。2013—

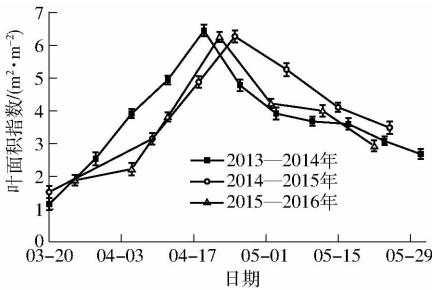


图 4 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦叶面积指数变化情况

Fig. 4 Dynamics of leaf area index in three winter wheat growing periods

2014 年从返青期到拔节后期,冬小麦叶面积指数从开始的 1.2 m²/m²增长到 6.5 m²/m²,此时达到最大,此后叶面积指数逐渐减小,到 2014 年 5 月 31 日仅 2.7 m²/m²。2014—2015 和 2015—2016 年冬小麦叶面积指数最大值分别为 6.9、6.3 m²/m²。

2.3 冬小麦产量及产量构成要素

2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉条件下冬小麦产量及产量构成要素详见表 3。3 年度冬小麦平均产量 7 120.5 kg/hm²,表现为 2013—2014 年产量较高,2014—2015 年产量次之,2015—2016 年产量最低。相比当地地面灌溉冬小麦产量(6 000 kg/hm²),在滴灌施肥灌溉条件下,施肥量为当地施肥量的 70% 时,3 年平均冬小麦产量相比当地冬小麦产量提高了 18.7%。滴灌施肥灌溉条件下,冬小麦的平均穗粒数为 33.3 个,千粒质量平均 40.5 g,相比地面灌溉条件下穗粒数(30.7 个)和千粒质量(36.2 g)有较好的表现,千粒质量平均提高了 4.3 g。

表 3 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦产量及产量构成要素

Tab. 3 Grain yields and yield components of winter wheat in three growing periods

年份	穗长/cm	结实小穗数	不孕小穗数	穗粒数	千粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2013—2014	5.8 ± 0.7 ^b	12.7 ± 0.7 ^b	1.5 ± 0.6 ^a	33.1 ± 4.8 ^a	40.7 ± 0.2 ^a	7 619.0 ± 171.5 ^a
2014—2015	6.8 ± 0.5 ^a	16.0 ± 1.1 ^a	1.8 ± 0.7 ^a	33.9 ± 4.4 ^a	40.6 ± 1.1 ^a	6 908.7 ± 190.9 ^b
2015—2016	6.3 ± 0.6 ^{ab}	13.0 ± 1.7 ^b	2.1 ± 0.6 ^a	33.0 ± 4.6 ^a	40.3 ± 0.7 ^a	6 833.9 ± 190.7 ^b
平均	6.3 ± 1.1	13.9 ± 2.1	1.8 ± 0.8	33.3 ± 5.5	40.5 ± 1.4	7 120.5 ± 221.3

注:每列不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平时差异显著,下同。

2.4 冬小麦耗水量

2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年 3 年滴灌施肥灌溉条件下冬小麦各生育期耗水量、全生育期耗水量及其各组成比例详见表 4~6。2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年各生育期耗水量均表现为抽穗期-收获期耗水量最多,平均为 181.6 mm,占总耗水量的比例也最大,平均为 45%;拔节期-抽穗期耗水量次之,平均为 109.0 mm,占总

耗水量的 28%;播种期-拔节期耗水量平均 102.2 mm,占总耗水量的 27%。通过分析各生育期耗水各水分来源所占比例,发现播种期-拔节期降水量所占比例最大(52%),拔节期-抽穗期灌水量所占比例最大(78%),而抽穗期-收获期土壤储水量的消耗量所占比例最大(54%)。纵观 2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年各生育期的耗水量变化,播种期-拔节期为小麦幼苗期,耗水量占总

耗水量 27% ,拔节期-收获期为小麦的生长盛期,耗水量占总耗水量的 73% 。

2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年冬小麦全生育期耗水量平均为 392.8 mm ,其中 2013—2014 年总耗水量最多,为 443.0 mm。2013—2014 年由于灌水较多,130 cm 土层出现明显的深层渗漏,深层渗漏量为 9.3 mm。2014—2015 年总耗水量最少,为 365.6 mm,130 cm 土层出现地下水补给,补给量为 28.8 mm。2015—2016 年总耗水量 369.8 mm,130 cm 土层也出现了地下水补给,补给量为 6.7 mm。与当地多年冬小麦耗水量(450 mm)相比,3 年冬小麦平均耗水量减少了 57.2 mm。纵观这 3 年度冬小麦生育期内总耗

水量,2014—2015 年冬小麦生长季降水量过少,冬小麦耗水量中地下水的补给量最大,且土体储水量的消耗量也较大。2013—2014 年和 2015—2016 年冬小麦生长季的总降水量相差不大,由于 2013—2014 年灌水较多,产生深层渗漏,造成水分流失;而 2015—2016 年土体储水量的消耗量、降水量和灌水量所占比例分别为 30%、29% 和 39% ,地下水补给量仅占 2% 。

3 年度冬小麦全生育期耗水量各水分来源所占比例表现为:灌水量所占比例最大,为 49% ,其次是土体储水量的消耗量,占总耗水量的 25% ,降水量占总耗水量的 24% ,地下水补给量占总耗水量的比例最小,仅 2% 。

表 4 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦各生育期耗水量
Tab.4 Water consumption of winter wheat at different growth stages in three growing periods

年份	生育期	$\Delta S/\text{mm}$	P/mm	I/mm	D/mm	ET/mm	耗水模系数/%
2013—2014	播种期-拔节期	58.1	45.7	96.0	0	83.6	19
	拔节期-抽穗期	18.1	11.8	96.0	1.2	88.5	20
	抽穗期-收获期	-153.5	45.5	80.0	8.1	270.9	61
2014—2015	播种期-拔节期	-23.5	35.0	57.0	0	115.5	32
	拔节期-抽穗期	-10.6	31.2	56.0	-15.1	112.9	31
	抽穗期-收获期	-73.7	1.8	48.0	-13.7	137.2	38
2015—2016	播种期-拔节期	-31.8	75.6	0	0	107.4	29
	拔节期-抽穗期	-8.3	18.0	96.0	-3.2	125.6	34
	抽穗期-收获期	-70.3	15.0	48.0	-3.5	136.8	37

表 5 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦全生育期耗水量

Tab.5 Total water consumption of winter wheat during whole growth periods in three growing seasons

年份	$\Delta S/\text{mm}$	P/mm	I/mm	D/mm	ET/mm
2013—2014	-77.3	103.0	272.0	9.3	443.0
2014—2015	-107.8	68.0	161.0	-28.8	365.6
2015—2016	-110.5	108.6	144.0	-6.7	369.8
平均	-98.5	93.2	192.3	-8.7	392.8

表 6 2013—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉冬小麦全生育期耗水量各组成比例

Tab.6 Percentage of different water sources in total water consumption of winter wheat during whole growth periods in three growing seasons %

年份	$\Delta S/ET$	P/ET	I/ET	D/ET
2013—2014	18	23	61	-2
2014—2015	29	19	44	8
2015—2016	30	29	39	2
平均	25	24	49	2

2.5 冬小麦水分利用效率和灌溉水利用效率

2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年 3 年度滴灌施肥灌溉条件下冬小麦水分利用效率和灌溉

水利用效率如图 5 所示。滴灌施肥灌溉条件下,3 年度冬小麦水分利用效率表现为:2014—2015 年水分利用效率最高,为 2.0 kg/m³,其次是 2015—2016 年,为 1.8 kg/m³,2013—2014 年水分利用效率最低,仅 1.7 kg/m³。3 年度冬小麦水分利用效率平均为 1.8 kg/m³,相比地面灌溉冬小麦水分利用效率(1.3 kg/m³)提高了 38% 。

滴灌施肥灌溉条件下,3 年度冬小麦灌溉水利用效率表现为:2015—2016 年灌溉水利用效率最高,达 4.7 kg/m³,其次是 2014—2015 年,为 4.3 kg/m³,2013—2014 年灌溉水利用效率最低,仅 2.8 kg/m³。3 年度冬小麦灌溉水利用效率平均为 3.9 kg/m³,比当地地面灌溉的灌溉水利用效率(2.0 kg/m³)提高了 95% 。

纵观 3 年度冬小麦水分利用效率和灌溉水利用效率,冬小麦生育期内采用滴灌施肥灌溉,提高灌溉水利用效率 95%,并可将水分利用效率提高到 1.7~2.0 kg/m³,提高水分利用效率 38% 。

2.6 土壤养分分布

土壤硝态氮极易溶于水,很少吸附在土壤颗粒上,移动性强,主要随灌溉水在土壤中运动^[26-27]。

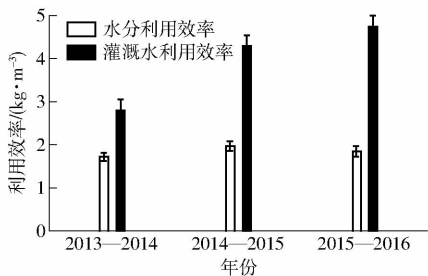


图5 2013—2016年3年度滴灌施肥灌溉冬小麦水分利用效率和灌溉水利用效率

Fig.5 Water use efficiency and irrigation water use efficiency forwinter wheat with drip fertigation in three growing periods

本文主要分析土壤剖面上硝态氮的分布状况,来评价滴灌施肥灌溉条件下土壤养分的分布。2014、2015和2016年冬小麦收获时土壤剖面硝态氮分布状况如图6所示。2013年冬小麦播种前,土壤硝态氮含量表现为0~20 cm 较高,平均为10.3 mg/kg,而20~100 cm 较低,100~140 cm 较高,平均23.4 mg/kg,说明当地地面灌溉的情况下,土壤硝态氮在100~140 cm 土层内出现了一定的养分淋失。滴灌施肥灌溉条件下,2014、2015和2016年冬小麦收获时,土壤硝态氮主要分布在0~40 cm 土层内,60~140 cm 土层的

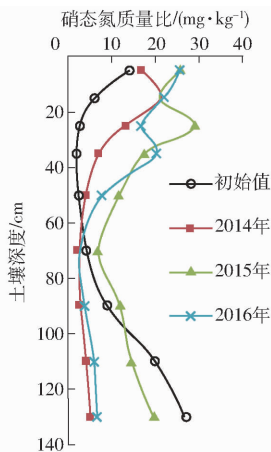


图6 2013—2016年3年度滴灌施肥灌溉冬小麦收获时土壤硝态氮含量分布状况

Fig.6 Distribution of soil nitrate nitrogen for winter wheat with drip fertigation in three growing periods

硝态氮含量降低,2016年冬小麦收获时100~140 cm 土壤硝态氮含量平均仅为6.3 mg/kg,相比2013年冬小麦播种前降低了73%。可见,滴灌施肥灌溉条件下,养分主要分布在根区,养分利用率高,养分淋失少。

3 结论

(1)滴灌施肥灌溉条件下,当施肥量为当地施肥量的70%时,2013—2014、2014—2015和2015—2016年冬小麦平均产量为7 120.5 kg/hm²,相比当地产量(6 000 kg/hm²)提高了18.7%;滴灌施肥灌溉条件下,冬小麦穗粒数和千粒质量表现较好。

(2)滴灌施肥灌溉条件下,2013—2014、2014—2015和2015—2016年冬小麦全生育期耗水量平均为392.8 mm。播种-拔节期为小麦幼苗期,耗水量占总耗水量27%,其中降水量所占比例最大(52%);拔节-收获期为小麦的生长盛期,耗水量占总耗水量的73%,其中拔节期-抽穗期灌水量所占比例最大(78%),而抽穗期-收获期土壤储水量的消耗量所占比例最大(54%)。与当地多年冬小麦耗水量(450 mm)相比,3年冬小麦平均耗水量减少了57.2 mm。3年度冬小麦全生育期耗水量各组成所占比例表现为:灌水量所占比例最大,为49%,其次是土体储水量的消耗量,占总耗水量的25%,降水量占总耗水量的24%,地下水补给量占总耗水量的比例最小,仅2%。冬小麦生育期内采用滴灌施肥灌溉,3年冬小麦灌溉水利用效率平均3.9 kg/m³,比当地地面灌溉的灌溉水利用效率(2.0 kg/m³)提高了95%。3年冬小麦水分利用效率平均为1.8 kg/m³,比当地地面灌溉下水分利用效率(1.3 kg/m³)提高了38%。

(3)滴灌施肥灌溉条件下,养分主要分布在根区0~40 cm 土层内,60~140 cm 土层的硝态氮含量降低,2016年冬小麦收获时100~140 cm 土壤硝态氮含量相比2013年冬小麦播种前降低了73%,养分利用率高,养分淋失少。

参 考 文 献

1 李振声,欧阳竹,刘小京,等. 建设“渤海粮仓”的科学依据——需求、潜力和途径[J]. 中国科学院院刊,2011,26(4):371-374.
LI Zhensheng,OUYANG Zhu,LIU Xiaojing, et al. Scientific basis for constructing the “Bohai Sea Granary”—demands, potential and approaches[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2011,26(4):371-374. (in Chinese)

2 LIU Changming, ZHANG Xiyiing, ZHANG Yongqiang. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2002, 111(2):109-120.

3 SUN Hongyong, LIU Changming, ZHANG Xiyiing, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1-2):211-218.

4 张喜英,刘小京,陈素英,等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(8):995-1004.
ZHANG Xiying, LIU Xiaojing, CHEN Suying, et al. Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(8):995-1004. (in Chinese)

5 ZWART S J, BASTIAANSEN W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat ,rice, cotton and

- maize[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(2):115–133
- 6 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. *中国农业科学*,2002,35(12):1493–1499.
JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZOU Guoyuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002,35(12):1493–1499. (in Chinese)
- 7 张玉铭,张佳宝,胡春胜,等. 水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J]. *中国生态农业学报*,2011,19(3):532–539.
ZHANG Yuming, ZHANG Jiabao, HU Chunsheng, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011,19(3): 532–539. (in Chinese)
- 8 LIU Xuejun, JU Xiaotang, ZHANG Fusuo, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*,2003,83(2):111–124.
- 9 BAR-YOSEF B. Advances in fertigation [J]. *Advances in Agronomy*,1999,6(5):1–77.
- 10 KAFKAFI U, TARCHITZKY J. Fertigation, A tool for efficient fertilizer[R]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, 2011.
- 11 WANG Jiandong, GONG Shihong, XU Di. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1025–1037.
- 12 杜文勇,何雄奎,胡振方,等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2011, 29(2):170–174.
DU Wenyong, HE Xiongkui, HU Zhenfang, et al. Effects of different irrigation technology on production of winter wheat[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(2):170–174. (in Chinese)
- 13 ARAFA Y E, WASIFE A, MEHAWED H E. Maximizing water use efficiency in wheat yields based on drip irrigation systems[J]. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 2009,3(2):790–796.
- 14 程裕伟,任辉,马富裕,等. 北疆地区滴灌春小麦干物质积累、分配与转运特征研究[J]. *石河子大学学报:自然科学版*, 2014, 29(2): 133–139.
CHENG Yuwei, REN Hui, MA Fuyu, et al. Characteristics of accumulation, allocation and transaction of dry matter in spring wheat under drip irrigation in Northern Xinjiang[J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2014, 29(2): 133–139. (in Chinese)
- 15 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等. 黑龙江流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J]. *作物学报*,2013, 39(9): 1687–1692.
NIE Zijin, CHEN Yuanquan, ZHANG Jiansheng, et al. Effects of drip irrigation patterns on wheat yield and water use efficiency in Heilonggang Region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(9): 1687–1692. (in Chinese)
- 16 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. *节水灌溉*,2004(3):11–12,15.
KANG Yaohu. Applied method for drip irrigation scheduling[J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(3):11–12,15. (in Chinese)
- 17 KANG Yaohu, WANG Fengxin, LIU Haijun, et al. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes [J]. *Irrigation Science*, 2004,23(3): 133–143.
- 18 KANG Yaohu, WAN Shuqin. Effect of soil water potential on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use under drip irrigation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2005,106(3): 275–292.
- 19 YUAN Baozhong, NISHIYAMA S, KANG Yaohu. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 63(3): 153–167.
- 20 汪然,万书勤,康跃虎,等. 滴灌水盐调控施肥灌溉对青海油菜产量及水肥利用的影响[J]. *节水灌溉*, 2016(4):18–23.
WANG Ran, WAN Shuqin, KANG Yaohu, et al. Effects of water-fertilizer-salt regulation under drip fertigation on rapeseed yield and the water and fertilizer efficiency in Qinghai Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(4):18–23. (in Chinese)
- 21 万书勤,汪然,康跃虎,等. 微咸水滴灌施肥灌溉对马铃薯生长和水肥利用的影响[J]. *灌溉排水学报*,2016,35(7):1–7,15.
WAN Shuqin, WANG Ran, KANG Yaohu, et al. Effects of drip fertigation with saline water on potato growth and water and fertilizer use efficiencies[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016,35(7):1–7,15. (in Chinese)
- 22 OWEIS T Y, FARAHANI H J, HACHUM A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*,2011,98(8): 1239–1248.
- 23 HE J. Best management practice development with the Ceres – Maize model for sweet corn production in North Florida[D]. Gainesville,FL: University of Florida,2008.
- 24 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- 25 王占彪,王猛,尹小刚,等. 近 50 年华北平原冬小麦主要生育期水热时空变化特征分析[J]. *中国农业大学学报*,2015, 20(5):16–23.
WANG Zhanbiao, WANG Meng, YIN Xiaogang, et al. Spatiotemporal change characteristics of heat and rainfall during the growth period of winter wheat in North China Plain from 1961 to 2010[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015,20(5): 16–23. (in Chinese)
- 26 SANTOS D V, SOUSA P L, SMITH R E. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 32(3): 293–306.
- 27 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150214&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014.
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. (in Chinese)