

# 不同施氮水平下拔节期灌溉对旱地冬小麦的群体动态、产量及耗水特性的影响

殷修帅<sup>1,3</sup>, 王仕稳<sup>2,3,4</sup>, 邓西平<sup>1,3,4</sup>, 李雨霖<sup>1,3</sup>, 杨文稼<sup>2,3</sup>, 孙海妮<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学

资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 针对目前黄土高原雨养农业区为追求小麦高产而存在的过量施肥现象, 以小麦长旱 58 为材料, 采用大田试验方法, 拟通过补水减肥措施探究不同氮水平下拔节期灌溉对小麦群体、产量和耗水特性的影响。试验设置了水氮二因素, 氮设 4 个水平, 分别施纯氮 0 kg/hm<sup>2</sup> (N<sub>0</sub>), 60 kg/hm<sup>2</sup> (N<sub>60</sub>), 120 kg/hm<sup>2</sup> (N<sub>120</sub>), 180 kg/hm<sup>2</sup> (N<sub>180</sub>), 水分设两个水平, 分别是拔节期灌溉 30 mm 水和全生育期不灌溉 (各氮水平下灌溉处理记为 N<sub>0</sub>W, N<sub>60</sub>W, N<sub>120</sub>W, N<sub>180</sub>W, 不灌溉处理记为 N<sub>0</sub>, N<sub>60</sub>, N<sub>120</sub>, N<sub>180</sub>)。结果表明: 拔节期灌溉显著提高了 120 kg/hm<sup>2</sup> 氮水平下的成熟期的亩穗数、产量和水分利用效率。在施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 时拔节期补灌 30 mm 水产量达到 5 100~6 100 kg/hm<sup>2</sup>, 水分利用效率达到 12~18 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), 较施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 处理分别提高了 19% 和 22%, 和施氮 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理产量无显著差异。当施氮水平提高至 180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 拔节期灌溉对群体、产量和水分利用效率没有显著的增加。同时, 拔节期灌溉导致了 0 kg/hm<sup>2</sup> 氮水平下小麦的早衰, 即 N<sub>0</sub>W 的生物量、产量、水分利用效率在灌溉后显著减小。说明通过少量补灌能够达到减肥增效的目的。综上, 试验认为针对黄土高原地区施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 条件下拔节补灌 30 mm 水是最优处理。

**关键词:** 冬小麦; 施肥; 补灌; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0179-08

## Effect of Irrigation on Population Dynamics, Yield and Water Consumption Characteristics of Winter Wheat at Elongation Stage Under Different Nitrogen Application Levels in Dryland

YIN Xiushuai<sup>1,3</sup>, WANG Shiwen<sup>2,3,4</sup>, DENG Xiping<sup>1,3,4</sup>, LI Yulin<sup>1,3</sup>, YANG Wenjia<sup>2,3</sup>, SUN Haini<sup>2,3</sup>

(1. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Excessive nitrogen (N) fertilizer application widely exists in winter wheat production in dryland area in order to get high yield. A field experiment was conducted to study the effects of nitrogen application levels combined with supplemental irrigation on the population dynamics, dry matter accumulation, yield components and water consumption characteristic of winter wheat during two growth seasons (2015—2017). A split plot experiment with two factors including two irrigation treatments (watering 30 mm at elongating stage and no watering) and four nitrogen fertilization application levels (0 kg/hm<sup>2</sup>, 60 kg/hm<sup>2</sup>, 120 kg/hm<sup>2</sup> and 180 kg/hm<sup>2</sup>) was conducted. The results showed that dry matter accumulation and water consumption significantly increased with nitrogen application rates increasing from 0 to 120 kg/hm<sup>2</sup>, but not increased from 120 to 180 kg/hm<sup>2</sup>; supplemental irrigation at elongation stage increased the yield and spike number under treatment of 120 kg/hm<sup>2</sup>, but it decreased under treatment of 0 kg/hm<sup>2</sup>; compared with no irrigation,

收稿日期: 2018-03-07

修回日期: 2018-03-20

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01); 国家重点基础研究发展计划(2015CB150402); 国家自然科学基金(51479189)

第一作者: 殷修帅(1989—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 研究方向为植物逆境生理。E-mail: 1539593687@qq.com

通信作者: 邓西平(1959—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士, 主要从事旱地农业作物生理生态研究。E-mail: dengxp@ms.iswc.ac.cn

the irrigation increased the water use efficiency by 19% to 22% in the treatment of 180 kg/hm<sup>2</sup>, and the yield have reached up to 5 100 to 6 100 kg/hm<sup>2</sup>. These results indicated that supplemental irrigation at elongation stage could reduce nitrogen application in dryland. In summary, combination of application of 120 kg/hm<sup>2</sup> of nitrogen with irrigation at elongation stage was the best practice.

**Keywords:** winter wheat; fertilization; supplemental irrigation; yield; water use efficiency

黄土高原作为我国典型雨养农业区,水、氮是影响该地区小麦产量的两个主要因素。科研工作者做了大量的水肥耦合试验<sup>[1-6]</sup>,但因地利、种植模式、气候因子等因素影响,不同地区的研究结果也不尽相同。对于底墒较好的地区氮肥效应要大于水分效应<sup>[7-10]</sup>,但有限的灌溉下,配合适当的养分,将使得水分效应大于养分效应<sup>[11-12]</sup>。在 20 世纪 80 年代,有研究认为限制小麦产量的主要因子是肥<sup>[13]</sup>,主要通过增施氮肥提高小麦产量。但随着氮肥的持续高量投入,土壤已经出现了不同程度的污染<sup>[14-15]</sup>,长期过量的肥料施用还会加速土壤水库的耗竭,加剧水分匮乏,影响作物的生长。而目前针对黄土塬区的研究往往采取多次补灌等方式补充土壤水分,总补灌量甚至大于 100 mm<sup>[16-19]</sup>,实际生产中并不利于当地农业生产。为此,针对黄土高原水分紧缺的情况,通过需水关键期少量灌溉研究对小麦的生产则更具有现实意义。有研究指出黄土旱塬区冬小麦最佳施氮量为 140~180 kg/hm<sup>2</sup>,相应的产量是 4 157~4 527 kg/hm<sup>2</sup><sup>[20-21]</sup>。以渭北施氮 140 kg/hm<sup>2</sup>,上下浮动 20 kg/hm<sup>2</sup> 为适中范围,调查发现,渭北约有 64% 调查点施肥过量,施氮合理的仅占 30%。施肥过量造成地下水硝酸盐含量升高、氮肥农学效率显著下降等问题<sup>[22-23]</sup>。有研究表明渭北旱塬有着较大的减肥潜力,基于目前产量可减少约 37% 的氮肥施用量<sup>[24]</sup>。因此,试验设想能否通过需水关键期少量灌溉,在保证产量不降的情况下减少氮肥施用。试验通过设置水氮二因素,采用低灌水量配合减氮处理,研究限量水氮条件下小麦的群体、产量和耗水特性的变化,以期小麦栽培中节水减氮提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验采用大田试验方法,于 2015—2017 年在陕西省长武县中科院水利部水土保持研究所所长武试验站进行。试验站位于黄土高原中南部,陕西省长武县洪家乡。海拔 1 200 m,年日照时数 2 226.5 h,年均气温 9.1℃,年均降水 578.5 mm,7—9 月降水量约占全年降水总量的 54%,地下水深埋 50~80 m,无霜期 171 d,气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,地区是典型旱作农业区。2016 年度降雨是 413.2 mm,

属于旱年。2017 年度降雨 602.0 mm,属丰水年<sup>[25]</sup>。两年的逐月降水量如图 1 所示。

试验地土壤属黑垆土,播前土壤基本养分含量如下:0—20 cm 有机质 10.5 g/kg,全氮 0.8 g/kg,矿质态氮<sup>[26-27]</sup> 4.5 mg/kg(德国 AA3 流动分析仪测定),速效磷 14.0 mg/kg,速效钾 140.0 mg/kg,容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>。

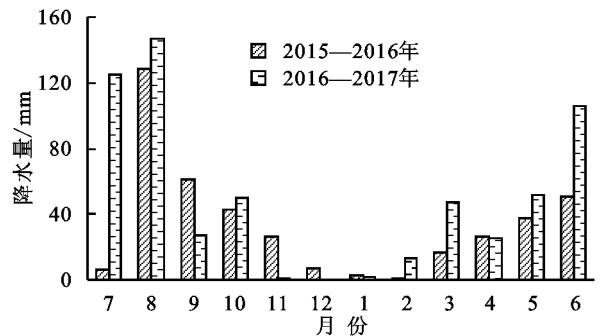


图 1 2015—2017 年逐月降水量

### 1.2 试验设计

试验小区采取裂区设计。水分处理为主区,氮肥处理为副区。小区面积 60 m<sup>2</sup> (5 m×12 m)。试验在施磷(以纯磷计算) 120 kg/hm<sup>2</sup> 的基础上,共设置 4 个氮水平,施氮量(以纯氮计算)分别是 0 kg/hm<sup>2</sup>、60 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>、180 kg/hm<sup>2</sup>。每个氮水平重复三次。水分处理设置 2 个,分为全生育期不灌溉(N<sub>0</sub>, N<sub>60</sub>, N<sub>120</sub>, N<sub>180</sub>)和拔节期灌溉 30 mm 水(N<sub>0</sub>W, N<sub>60</sub>W, N<sub>120</sub>W, N<sub>180</sub>W)两种处理,每处理重复三次。灌溉采用喷灌方法,通过水表读数和时控制灌水量和均匀度。

供试品种选用“长旱 58”,每年 9 月 30 日播种,次年 6 月 30 日收获。小麦播种采用人工播种方式,常规平作。播种量为 150 kg/hm<sup>2</sup>,行距 22 cm。试验肥料:氮肥是尿素(46% N),2/3 作为基肥施入,1/3 作为拔节期追肥。磷肥是过磷酸钙(12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),作为基肥一次性施入,其他管理措施同当地农户习惯管理模式。

### 1.3 测定指标

1.3.1 群体调查 在各小区选取长势均匀的 1 m 双行样段,在小麦返青、拔节、灌浆、成熟期定点调查群体茎蘖数。

1.3.2 地上生物量 在小麦返青、拔节、灌浆、成熟期每小区不同行选取两个 30 cm 长势均匀样段,连根拔出,记录株数后去根,80℃烘干称地上生物量。

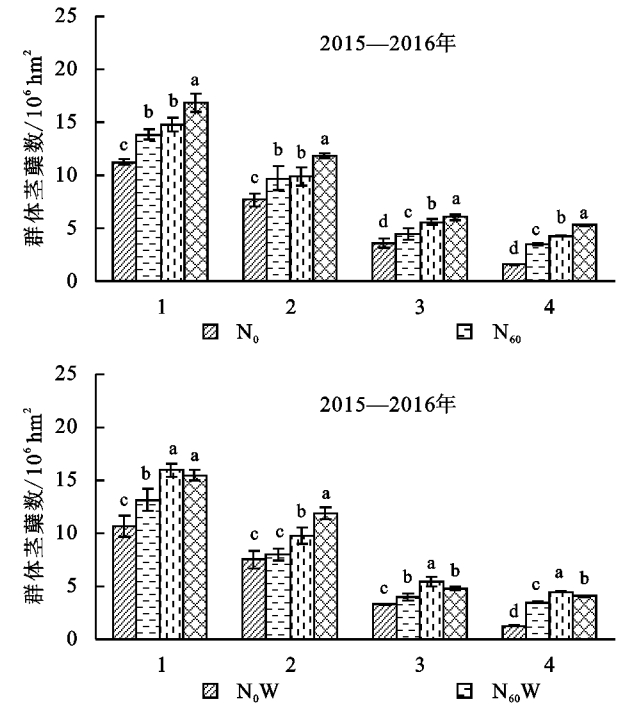
1.3.3 产量及产量构成要素 小麦成熟时每小区收

割代表性测产区块 6 m<sup>2</sup>,记录穗数,风干后称重测产,从测产籽粒中取样测定千粒重。各小区选取 30 个麦穗进行考种。

1.3.4 土壤储水及耗水量 采用土钻法测定土壤含水率。分别在播前、返青、拔节、灌浆、灌浆末期、成熟期采集 0~2 m 土样,采集方法是 0~1 m 深度土样每 10 cm 取一样本,1~2 m 深度土样每 20 cm 取一样本,采用烘干法计算土壤含水量。土壤含水量、土壤储水量、生育期耗水量、水分利用效率及变异系数计算公式如下:

$$\text{土壤质量含水量} = (\text{土壤鲜重} - \text{土壤干重}) / \text{土壤干重} \times 100\%$$
$$\text{土壤储水量 } E = C \times \rho \times H \times 10, \text{ 其中 } E \text{ 是储水量 (mm); } C \text{ 是土壤水分质量分数 (g/g); } \rho \text{ 是土壤容重 (g/cm}^3\text{); } H \text{ 是土层深度 (mm).}$$

生育期耗水量  $ET = P + U - R - F - \Delta W$ ,式中:ET 是耗水量(mm);P 为降水量(mm);R 为径流量(mm);U 为地下水补给量(mm);F 为深层渗漏量(mm); $\Delta W$  为生育时期末土壤贮水量与生育时期初土壤贮水量之差(mm)。试验地区为黑垆土,疏松多孔,再加上试验地平整,地表径流小,地下水深埋在 40 m 以下,不易上移补给。在有作物生长的农田,多年份降水入渗深度不超过 2 m,所以 F,U,R 可忽



注:小写字母代表各生育期内不同氮水平之间的差异( $p < 0.05$ )。横坐标轴 1,2,3,4 分别代表返青期—拔节期,拔节期—开花期,开花期—灌浆期,灌浆期—成熟期。

图 2 不同处理下冬小麦各生育期群体茎蘖动态

2.2 不同施氮水平下小麦茎蘖成穗率

不同处理下两年平均成穗率如表 1 所示,各处理

略不计<sup>[28]</sup>。因此该公式可化简为: $ET = P - \Delta W$ 。

水分利用效率  $WUE = Y/ET$ ,其中 WUE 是土壤水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup> · mm)];Y 是籽粒产量(kg);ET 是农田耗水量(mm)<sup>[29]</sup>。

变异系数  $C.V = (SD/MN) \times 100\%$ ,其中 C.V 是变异系数,SD 是标准差,MN 是平均值。

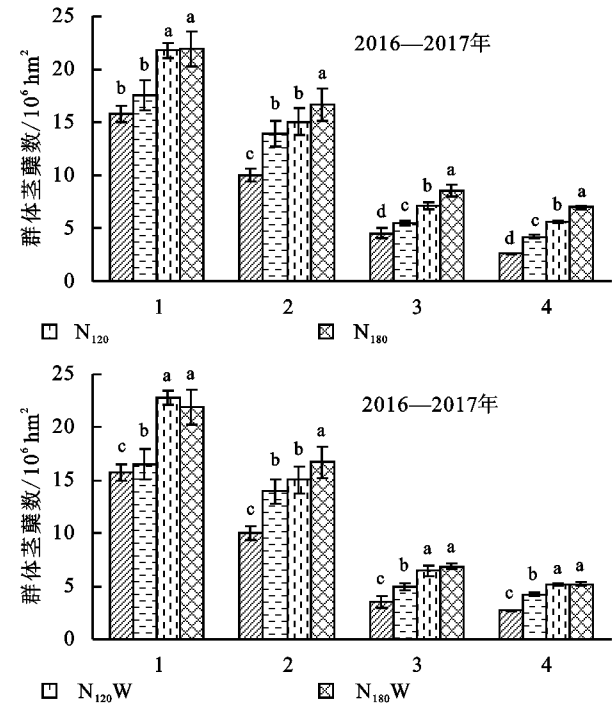
1.4 数据处理

试验中所得数据均采用 Microsoft Excel 2007 和 IBM SPSS Statistics 20.0 进行处理,采用 Duncan 法进行显著性检验( $p < 0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下灌溉对小麦群体茎蘖动态的影响

如图 2 所示,全生育期群体茎蘖数随施氮量增加呈增加趋势,群体茎蘖数均在返青—拔节期达到最大,此后逐渐下降。2015—2017 年分别是干旱年和丰水年,相较于 N<sub>120</sub> 处理,成熟期 N<sub>120</sub> W 的群体茎蘖数分别增加了 9.8%和 13.0%。同时,补灌降低了 0 kg/hm<sup>2</sup> 氮水平下的群体茎蘖数,两年度成熟期群体茎蘖数分别下降 20.2%和 4.6%。表明合适氮水平下拔节补灌能够显著提高小麦的群体茎蘖数,而在不施氮情况下,补灌则显著降低了群体茎蘖数。而且干旱年拔节补灌对群体茎蘖数的影响要大于丰水年补灌效果。



的茎蘖数均是随着施氮量的增加而增加。在返青—拔节期 N<sub>120</sub> 和 N<sub>180</sub> 茎蘖数最大且无显著差异。成穗

率  $N_{60}$ ,  $N_{120}$  和  $N_{180}$  间无差异但均显著大于  $N_0$ 。补灌处理成熟期茎蘖数随施氮量增加而增加,  $N_{120}W$  和  $N_{180}W$  无显著差异。相较于  $N_{120}$  处理, 补灌显著提高了  $N_{120}W$  成熟期有效穗数和成穗率。同时, 相较于  $N_0$  处理, 补灌降低了  $N_0W$  成熟期茎蘖数和成穗率, 但  $N_0W$  和  $N_0$  差异不显著。说明拔节期补灌能够增加  $120\text{ kg/hm}^2$  氮水平下的成熟期茎蘖数和成穗率, 因  $N_{120}W$  和  $N_{180}W$  无显著差异, 所以补灌可以在保证产量的同时减少氮肥施用量。

表 1 不同处理下 2015—2017 冬小麦茎蘖成穗率

生育期	处理	平均值	标准差	变异系数
返青—拔节期 最大分蘖数/ (万·hm <sup>-2</sup> )	$N_0$	1711.60 Ab	379.52	22.17
	$N_{60}$	1840.52 Aab	376.60	20.46
	$N_{120}$	2271.87 Aa	718.73	31.64
	$N_{180}$	2228.60 Aa	670.19	30.07
	$N_0W$	1660.27 Ab	448.47	27.01
	$N_{60}W$	1773.20 Ab	454.12	25.61
	$N_{120}W$	2323.20 Aa	661.98	28.49
	$N_{180}W$	2209.24 Aa	687.92	31.14
	$N_0$	182.32 Ac	40.17	22.03
	$N_{60}$	369.33 Ab	46.49	12.58
成熟期有效 穗数/ (万·hm <sup>-2</sup> )	$N_{120}$	419.49 Ba	30.97	7.38
	$N_{180}$	445.79 Aa	37.19	8.34
	$N_0W$	164.21 Ac	65.22	39.72
	$N_{60}W$	368.95 Ab	36.74	9.96
	$N_{120}W$	464.49 Aa	38.20	8.22
	$N_{180}W$	441.63 Aa	59.80	13.54
茎蘖 成穗率/%	$N_0$	10.65 Ab	1.35	11.64
	$N_{60}$	20.07 Aa	2.98	14.61
	$N_{120}$	18.46 Ba	5.33	27.00
	$N_{180}$	20.00 Aa	5.31	24.99
	$N_0W$	9.89 Ab	1.86	17.38
	$N_{60}W$	20.81 Aa	4.83	21.75
	$N_{120}W$	19.99 Aa	5.20	24.58
	$N_{180}W$	19.99 Aa	4.05	19.53

注: 表中小写字母代表各生育期内不同氮水平之间的差异 ( $p<0.05$ ); 大写字母代表同一氮梯度下浇水与不浇水间差异 ( $p<0.05$ )。

2.3 不同施氮水平下灌溉对小麦地上部生物量的影响

干物质积累是产量形成的基础, 干物质积累量的多少及转运效率的高低直接影响产量的形成。如图 3 所示, 各处理地上部生物量均呈缓慢、迅速、再缓慢增加的趋势。返青期—拔节期是缓慢增加阶段, 各氮处理间差异不大, 但均显著大于  $0\text{ kg/hm}^2$  氮水平处理。拔节期—灌浆期是迅速增加阶段, 地上部生物量除  $0\text{ kg/hm}^2$  氮水平处理, 其他各氮水平间无显著差异。灌浆期—成熟期是缓慢增长阶段, 2015—2016 年成熟期地上生物量随施氮量的增加而增加。拔节期灌溉的各施氮水平下, 成熟期  $N_{120}W$  地上生物量最大, 较  $N_{120}$  处理提高了  $13.0\%$ ;  $N_0W$  地上生物量最小, 较  $N_0$  处理下降了  $35.6\%$ 。2016—2017 年因

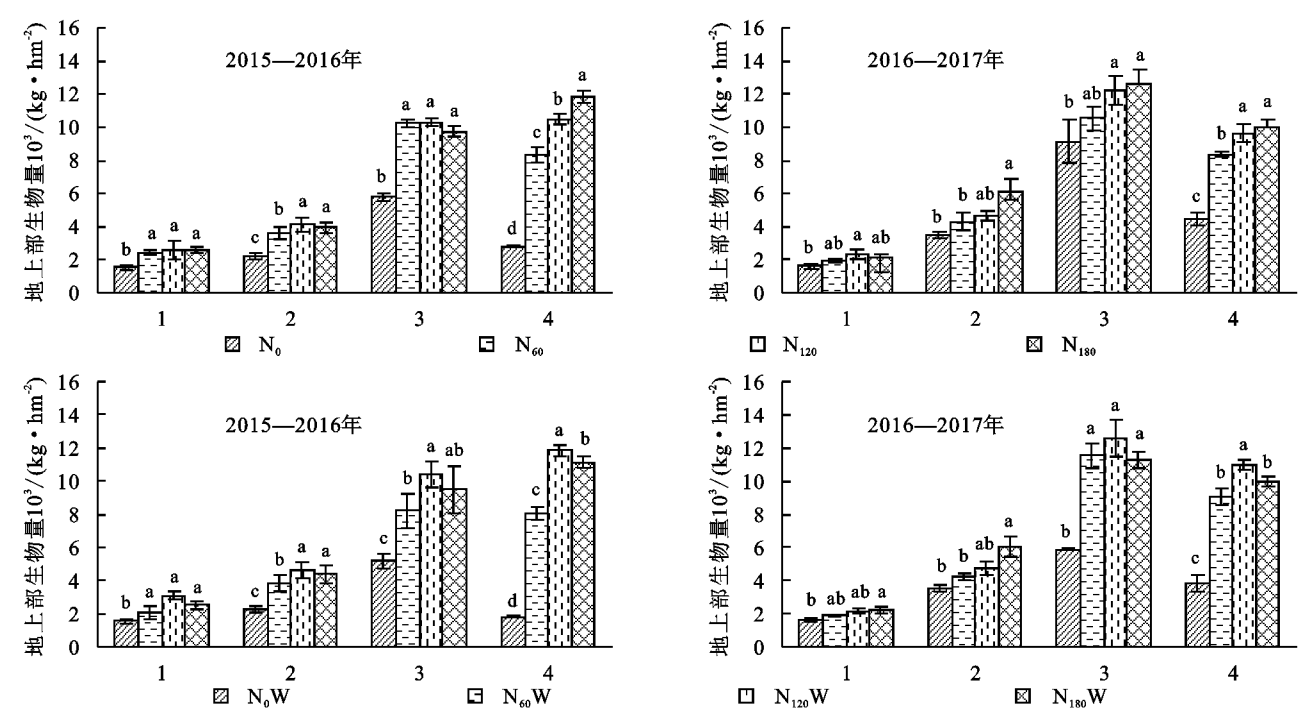
为成熟期降雨较集中等原因, 成熟期各处理地上生物量较灌浆期略有减小。不灌溉各处理从返青到灌浆期与上一年度相同, 成熟期  $N_{120}$  与  $N_{180}$  地上生物量无显著差异。拔节期补灌的各氮水平下, 成熟期  $N_{120}W$  地上生物量最大, 较  $N_{120}$  提高了  $14.6\%$ ,  $N_0W$  地上生物量较  $N_0$  减少了  $14.1\%$ 。说明拔节期少量补灌一定程度上增加了  $120\text{ kg/hm}^2$  氮水平下的地上生物量, 施氮量继续增加至  $180\text{ kg/hm}^2$  时, 补灌对地上生物量的增加幅度不显著。

2.4 不同施氮水平下灌溉对冬小麦产量及产量三要素的影响

如表 2 所示, 从产量及其三要素分析, 除 2016—2017 年因为成熟期降雨较多, 导致  $120\text{ kg/hm}^2$  和  $180\text{ kg/hm}^2$  氮水平的千粒重下降之外, 各处理随施氮量的增加, 产量、穗数、穗粒数、千粒重均呈增加趋势。灌溉提高了  $120\text{ kg/hm}^2$  氮水平下的产量, 同时降低了  $0\text{ kg/hm}^2$  氮水平的产量。比较  $N_{120}W$  和  $N_{120}$  及  $N_0W$  和  $N_0$  处理发现, 灌溉主要通过影响成熟期穗数进而影响产量。从不同年份分析, 2015—2017 两年分别是干旱年和丰水年, 灌溉处理  $N_{120}W$  较  $N_{120}$  产量分别提高了  $18.9\%$  和  $17.6\%$ ,  $N_0W$  较  $N_0$  产量分别降低了  $42.4\%$  和  $25.9\%$ 。结果表明在干旱年拔节补灌对产量的影响大于丰水年份。从施氮和灌水单因素方面分析, 在同一灌溉条件下产量随施氮量增加而增加, 当施氮量大于  $120\text{ kg/hm}^2$  时, 产量不再增加。在同一施氮不同灌水处理下, 施氮  $120\text{ kg/hm}^2$  时增产幅度最大, 产量与施氮  $180\text{ kg/hm}^2$  时无显著差异。综合水氮单因子和交互作用分析, 施氮  $120\text{ kg/hm}^2$  水平下拔节补灌  $30\text{ mm}$  水是最优处理。

2.5 不同施氮水平下灌溉对土壤储水量的影响

小麦各生育期土壤储水的变化如图 4 所示。从播前到成熟土壤储水呈下降趋势, 成熟期土壤储水量最低。2015—2016 年播前到返青阶段降雨较为集中, 各处理土壤储水量略有增加且无显著差异。返青到灌浆期是作物需水关键期, 土壤储水量随施氮量增加下降幅度增大, 土壤储水  $N_{180}=N_{120}<N_{60}<N_0$ , 而补灌的各施氮水平下,  $N_{120}W$  土壤储水下降幅度最大。2016—2017 年度降雨较充分, 土壤储水量总体较大。不灌溉各施氮处理从播前到灌浆土壤储水除  $N_0$  外差异不显著, 灌浆开始到灌浆末期,  $N_0$  储水下降幅度显著小于其他处理,  $N_{120}$  储水降幅最大。灌溉处理从播前到成熟整体与不灌溉处理趋势一致, 从播前到灌浆  $N_{120}W$  土壤储水均较低, 灌浆到成熟期由于降雨等因素土壤储水略有升高, 成熟期  $N_{120}W$  与  $N_{180}W$  无显著差异。



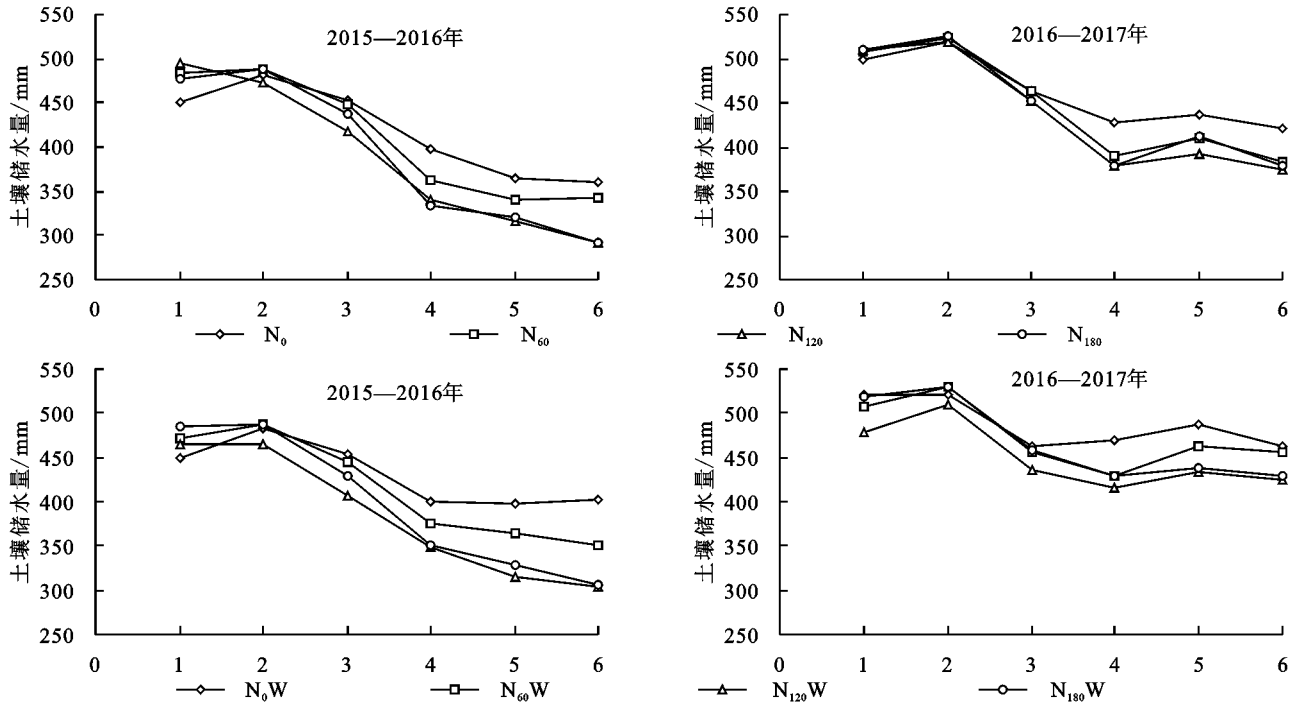
注:小写字母代表各生育期内不同氮水平之间的差异( $p<0.05$ )。横坐标轴 1,2,3,4 分别代表返青期—拔节期,拔节期—开花期,开花期—灌浆期,灌浆期—成熟期。

图 3 不同处理下冬小麦各生育期地上部生物量

表 2 冬小麦产量及产量三要素

年份	处理	籽粒产量/ ( $kg \cdot hm^{-2}$ )	穗数/ ( $万 \cdot hm^{-2}$ )	穗粒数	千粒重/ g
2015—2016	$N_0$	1375.44Ad	159.98Ac	29.30Ac	43.86Ab
	$N_{60}$	3786.20Ac	346.47Ab	40.54Ab	45.05Ab
	$N_{120}$	5182.65Bb	405.81Ba	44.70Aa	46.77Ba
	$N_{180}$	5969.15Aa	430.49Aa	45.04Ba	47.22Aa
	$N_0W$	792.00Bc	127.60Bd	26.55Bd	40.10Bd
	$N_{60}W$	3606.35Ab	348.58Ac	41.12Ac	44.56Ac
	$N_{120}W$	6164.40Aa	445.66Aa	45.54Ab	47.62Aa
	$N_{180}W$	5660.05Aa	406.01Bb	50.24Aa	45.91Bb
2016—2017	$N_0$	1810.60Ac	244.57Ac	27.89Ab	42.25Ab
	$N_{60}$	3772.27Ab	396.00Ab	33.50Aa	43.97Aa
	$N_{120}$	4348.67Ba	435.45Ba	33.93Ba	42.24Ab
	$N_{180}$	4728.00Aa	470.27Aa	33.90Ba	39.33Ac
	$N_0W$	1342.55Bc	255.75Ac	22.33Bc	42.29Ab
	$N_{60}W$	4056.80Ab	399.52Ab	35.65Ab	43.97Aa
	$N_{120}W$	5114.27Aa	490.86Aa	37.80Aab	39.86Bc
	$N_{180}W$	4532.00Aa	489.13Aa	39.25Aa	34.53Bd
平均值					
2015—2017	灌水处理(IRR)				
	W	3871.62	361.13	36.10	43.84
	$N_0$	3908.55	370.39	37.31	42.36
	$N_{60}$	1330.15	197.00	26.52	42.13
施氮处理(NR)	$N_{60}$	3805.41	372.64	37.70	44.39
	$N_{120}$	5202.50	444.45	40.49	44.12
	$N_{180}$	5222.30	449.00	42.11	41.75
F 检验(P)					
2015—2017	灌水处理(IRR)	**	**	**	**
	施氮处理(NR)	NS	NS	**	**
	IRR×NR	**	NS	**	**

注:表中小写字母代表各生育期内不同氮水平之间的差异( $p<0.05$ );大写字母代表同一氮梯度下浇水与不浇水间差异( $p<0.05$ );NS表示在 0.05 水平下差异不显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。



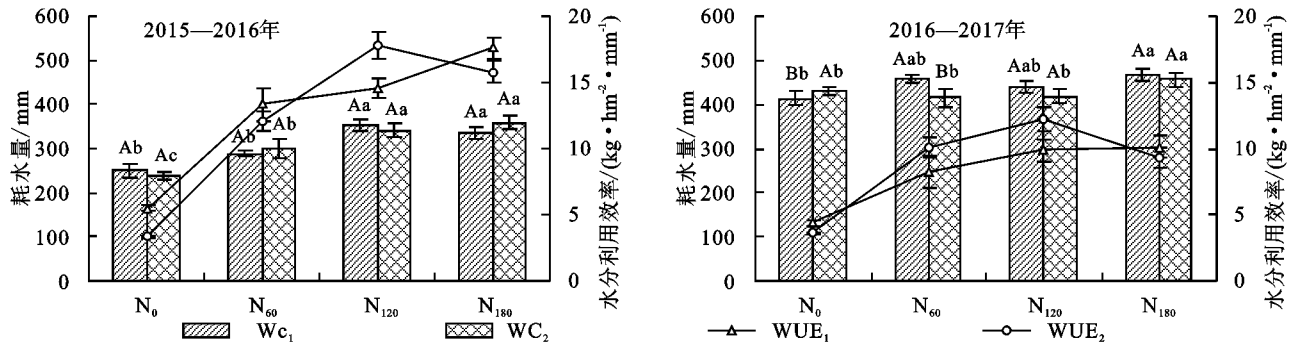
注：横坐标轴 1,2,3,4,5,6 分别代表播前,返青期,拔节期,灌浆期,灌浆末期,成熟期。

图 4 不同处理下冬小麦各生育期 0~2 m 土壤储水量

### 2.6 不同施氮水平灌溉对冬小麦耗水量与水分利用效率的影响

小麦生育期内的总耗水量和水分利用效率如图 5 所示。两年度总耗水量随施氮量的增加而增加,同一氮水平下补灌处理耗水量增加不显著,而水分利用效率呈先增加后降低的趋势。比较 2015—2016 年干

早年和 2016—2017 年丰水年总耗水量和水分利用效率发现,丰水年各氮水平的耗水量显著增加,而水分利用效率显著减小。说明施氮量和总供水量的增加促进了耗水量的增加。水分利用效率随总供水量的增加而减小,随施氮量的增加先增加后降低。一定范围内增施氮肥,能够提高水分利用效率。



注：表中小写字母代表各生育期内不同氮水平之间的差异 ( $p < 0.05$ )；大写字母代表同一氮梯度下浇水与不浇水间差异 ( $p < 0.05$ )；WC<sub>1</sub>, WC<sub>2</sub>, WUE<sub>1</sub>, WUE<sub>2</sub> 分别代表不灌溉处理的耗水量、灌溉处理的耗水量、不灌溉处理的水分利用效率、灌溉处理的水分利用效率。

图 5 冬小麦耗水量与水分利用效率

## 3 讨论

小麦分蘖数是决定产量的重要因素,在生育前期(越冬—返青)保持较优的群体茎蘖数量,生育中期(拔节—孕穗)保持较高的成穗率,是高产的重要基础之一<sup>[30]</sup>。在小麦需水敏感期缺水将显著影响群体茎蘖数、穗数、穗粒数、千粒重等。拔节期是小麦需水的高峰期,拔节期灌溉是小麦获得较高穗数的基础<sup>[31]</sup>。

有研究指出拔节不灌水处理比灌水处理穗数降低 14.6%<sup>[32]</sup>。本研究发现,各处理的群体茎蘖数在返青—拔节期后逐渐下降,拔节期以后迅速降低。灌溉的各处理群体茎蘖数也随施氮量的增加而增加。灌溉对不同的氮水平下群体茎蘖数影响不同,两年试验结果均表明灌溉能够显著增加 N<sub>120</sub> W 的群体茎蘖数,提高了 N<sub>120</sub> W 在成熟期的有效穗数,两年度分别增加了 9.8% 和 13.0%。同时,灌溉会显著降低成熟

期  $N_0W$  的群体茎蘖数,降低幅度达到 20.2%。说明在黄土高原旱区拔节灌溉 30 mm 的前提下,施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 更有助于小麦高产。

关于施氮水平对小麦地上部形态构建,干物质积累和产量构成的影响前人已经做了大量研究<sup>[33-35]</sup>。增施氮肥能够促进植株对氮素的吸收,保持较高的成穗率,从而保证产量的提高。小麦地上部生物量随着施氮量的增加而增加。本试验发现,地上生物量随着施氮水平的提高而增加,当施氮大于 120 kg/hm<sup>2</sup> 时地上生物量增加不显著。拔节灌溉对不同的施氮处理影响不同,本试验拔节期灌溉显著增加了  $N_{120}W$  的地上生物量,但降低了  $N_0W$  的地上生物量。这可能是由于  $N_0W$  养分供应不足,根系下扎深度较小,拔节后根系衰退较多,灌溉对表层根系有抑制作用,导致地上生物量降低<sup>[36-37]</sup>。施氮量大于 120 kg/hm<sup>2</sup> 时,继续施氮对小麦增产幅度变小,造成资源的浪费,本试验中施氮 120 kg/hm<sup>2</sup>,拔节灌溉 30 mm 水时显著增加了地上生物量,提高了水氮利用效率,说明这一灌溉施肥方案具有可持续性。

通过对两年的小麦产量和产量三要素的分析发现,小麦籽粒产量及穗数、穗粒数和千粒重等随着施氮量的增加而增加,施氮量大于 120 kg/hm<sup>2</sup> 时产量增加不显著。研究发现,拔节灌溉主要促进了穗数和千粒重的增加,从而促进籽粒产量的增加,尤其在干旱年份灌溉导致的差异更显著。2016—2017 年小麦千粒重没有随施氮量增加,甚至随施氮量增加而减小,可能是因为在灌浆末期到籽粒成熟期阶段,降雨过多及光强减弱导致已衰老的小麦根系在氧气稀少的土壤中根系活力迅速下降,小麦提前成熟,加之气温较高,灌浆期缩短,导致千粒重和产量下降<sup>[38-39]</sup>。

黄土高原地区地下水深埋 40 m 以下,0~2 m 的土壤储水变化一定程度反映作物的水分消耗情况。本研究结果表明,土壤储水量随施氮水平增加下降幅度增大,超过 120 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤储水下降不明显,同时,通过对各处理耗水量和水分利用效率分析发现,灌溉后  $N_{120}W$  的耗水量没有显著增加,但显著提高了其水分利用效率,同时灌溉导致了  $N_0W$  的水分利用效率显著下降。以上结果表明,在合适的氮水平下拔节补灌才能够提高水分利用效率,合适的氮水平更有利于对水分的利用,这与前人的研究结论是一致的<sup>[40]</sup>。本试验研究认为在施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 时拔节期补充灌溉为最优处理。因此,在黄土高原少量的补

灌条件下,配合适当的氮用量,呈现水分效应大于氮肥效应,能够达到通过少量补灌减少氮肥投入,以提高小麦产量的目的。

## 4 结论

本试验在不同施氮水平下分析了拔节期少量补灌对小麦群体动态、地上生物量、产量及水分利用效率的影响。施氮 120 kg/hm<sup>2</sup> 条件下拔节期补灌 30 mm 水群体茎蘖数增幅最大, $N_{120}W$  处理的群体茎蘖数与  $N_{180}$ 、 $N_{180}W$  处理无显著差异且显著大于  $N_{120}$  处理。在不施氮条件下补灌则会显著降低群体茎蘖数。补灌效果在干旱年对群体茎蘖数的影响大于丰水年。

各处理地上生物量随生育期的推进逐渐增大,成熟期  $N_{120}W$  处理地上生物量最大。继续增加施氮量,补灌对生物量的增加不显著。同时,补灌会导致不施氮处理的地上生物量显著降低。从产量方面分析,干旱年拔节补灌对产量的影响大于丰水年份。在补灌条件下当施氮量大于 120 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量不再增加。在同一施氮水平下, $N_{120}W$  增产幅度最大,产量与  $N_{180}$  和  $N_{180}W$  处理无显著差异。两年耗水量和水分利用效率表明,耗水量随施氮量增加略有增加,补灌对生育期总耗水量影响不显著,但丰水年各处理的耗水量显著增加。两年水分利用效率均是随施氮量增大先增加后减小, $N_{120}W$  水分效率最大。综合水氮单因子和交互作用以及黄土高原地区产量形成和土壤水利用情况,本试验在保持产量的条件下  $N_{120}W$  是最佳的减氮节水处理。

### 参考文献:

- [1] 魏孝荣,郝明德,张春霞.旱地长期施肥对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):95-97.
- [2] 何晓雁,郝明德,李慧成,等.黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1333-1340.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [4] 王树丽,贺明荣,代兴龙,等.种植密度对冬小麦氮素吸收利用和分配的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1276-1281.
- [5] 赵士诚,裴雪霞,何萍,等.氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):492-497.
- [6] 陈祥,同延安,亢欢虎,等.氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):450-455.
- [7] 吕殿青,张文孝,谷杰,等.渭北东部旱塬氮磷水三因素

- 交互作用与耦合模型研究[J]. 西北农业学报, 1994, 3(3): 27-32.
- [8] 山仑, 张岁岐. 节水农业及其生物学基础[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 2-6.
- [9] 胡凯军, 赵桂琴, 吴昌顺, 等. 麦类作物水肥耦合研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 7-12.
- [10] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱地农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220-224.
- [11] 胡凯军, 赵桂琴, 吴昌顺, 等. 麦类作物水肥耦合研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 7-12.
- [12] 苗果园. 旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 263-270.
- [13] 李玉山, 张孝中. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报, 1990(1): 1-7.
- [14] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [15] Liu Y N, Li Y C, Peng Z P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N<sub>2</sub>O emissions from wheat ifields in North China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(6): 1184-1191.
- [16] 高亚军, 李生秀. 黄土高原地区农田水氮效应[J]. 植物营养与肥科学报, 2003, 9(1): 14-18.
- [17] 张益望, 刘文兆. 补充灌溉及氮磷配施对黄土塬区冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 76-81.
- [18] 李超, 刘文兆, 林文, 等. 黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3549-3560.
- [19] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1965-1970.
- [20] 戴健, 王朝晖, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956-965.
- [21] 慕芳, 殷振江, 段长林, 等. 长武小麦对氮磷钾肥的利用效果及推荐施肥量的研究[J]. 陕西农业科学, 2010, 56(6): 6-9.
- [22] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245-253.
- [23] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 552-558.
- [24] 曹寒冰, 王朝辉, 赵护兵, 等. 基于产量的渭北旱地小麦施肥评价及减肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2758-2768.
- [25] Hao M D, Dang T H. High yield and dry-resistant techniques of winter wheat in different hydrological year[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(6): 2-5.
- [26] 栾慧, 刘红, 高一娜, 等. 土壤速效氮测定方法的改进[J]. 湖南农业科学, 2017(3): 88-89.
- [27] 李立平, 张佳宝, 邢维芹, 等. 土壤速效氮磷钾测定进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 483-488.
- [28] 王石言, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区盛果期苹果园的蒸散特征[J]. 林业科学, 2016, 52(1): 128-135.
- [29] 邓振镛, 张强, 王强, 等. 黄土高原旱作区土壤贮水力和农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3672-3678.
- [30] 崔亚坤. 分蘖和拔节期土壤干旱对小麦产量形成的影响及其生理机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [31] 张永丽, 于振文, 郑成岩, 等. 不同灌水处理对强筋小麦济麦 20 耗水特性和籽粒淀粉组分积累的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4218-4227.
- [32] 崔帅, 刘慧婷, 王红光, 等. 限水减氮对小麦旗叶光合特性和群体干物质积累与分配的影响[J]. 河北农业大学学报, 2016, 39(5): 1-7.
- [33] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3040-3048.
- [34] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128.
- [35] 张绪成, 郭天文, 谭雪莲, 等. 氮素水平对小麦根—冠生长及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3): 97-102.
- [36] 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 697-703.
- [37] 狄楠. 灌水深度对冬小麦根系形态分布及根系活力的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [38] 孙本普, 王勇, 李秀云, 等. 气候条件对冬小麦千粒重的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 52-56.
- [39] 史忠良, 马爱萍, 仇松英, 等. 光照强度对小麦不同品种结实率及千粒重的影响[J]. 山西农业科学, 1998, 26(4): 16-18.
- [40] 彭珂珊, 邓西平, 徐学选. 黄土高原农业高效调水技术[J]. 甘肃农业大学学报, 1999, 34(4): 413-420.