

减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响

张嫚¹, 周苏玫¹, 杨习文¹, 周燕¹, 杨蕊¹, 张珂珂², 贺德先¹, 尹钧¹

(¹河南农业大学农学院, 郑州 450002; ²河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要:【目的】针对黄淮冬麦区过量施氮的现象, 研究了适量减氮在不同土壤墒情下硝态氮分布以及冬小麦对氮素吸收利用效率和籽粒产量的变化, 为该地区小麦生产上科学施用氮肥提供理论依据。【方法】于 2014—2015 和 2015—2016 两个小麦生长季, 在大田条件下设置 3 个灌水处理, 自然降水 (W1)、适墒 (W2, 70%±5%)、足墒 (W3, 80%±5%) 和 3 个施氮量处理 (不施氮, N1; 减氮施肥, N2: 195 kg·hm⁻²; 常规高量氮肥, N3: 270 kg·hm⁻²), 测定了 0—100 cm 土层硝态氮含量、冬小麦植株氮素吸收转运量和籽粒产量。【结果】0—60 cm 土层硝态氮 (NO₃-N) 的分布随土层加深而减少, 随施氮量增加而提高, 随土壤墒情的增大而减少; > 60 cm 又出现不同程度的回升, 尤其是足墒 (W3) 加大了 NO₃-N 的淋溶, N2、N3 水平下 80—100 cm 土层 W3 平均比 W1 高出了 3.8 mg·kg⁻¹ 和 4.2 mg·kg⁻¹; 减氮处理 (N2) 促进了 NO₃-N 吸收, 成熟期 0—20 cm 土层 NO₃-N 比开花期平均降幅为 2.3 mg·kg⁻¹, 高氮处理 (N3) 收获后土层中 NO₃-N 却有较多的富集。减氮适墒处理 (W2N2) 显著增加了开花期营养器官氮素积累量 ($P < 0.05$), 并促进氮素向籽粒的有效转运, 尤其表现在叶片中; 花前氮素转移量和对籽粒的贡献率均达最大, 籽粒产量和籽粒中的氮素积累量分别比其他处理平均高出 15.4%、27.3%, 从而极显著提高了氮素吸收率和生产效率 ($P < 0.05$)。【结论】本试验条件下, 施氮量 195 kg·hm⁻², 拔节后土壤相对含水量维持在 70%±5%, 是兼顾产量、氮肥吸收和生产效率的最佳处理。

关键词: 冬小麦; 减氮适墒; 氮素吸收利用; 硝态氮含量; 产量

Effects of Nitrogen-Reducing and Suitable Soil Moisture on Nitrate Nitrogen Distribution in Soil, Nitrogen Absorption and Utilization of Winter Wheat

ZHANG Man¹, ZHOU SuMei¹, YANG XiWen¹, ZHOU Yan¹, YANG Rui¹,
ZHANG KeKe², HE DeXian¹, YIN Jun¹

(¹College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002; ²Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002)

Abstract: 【Objective】The objective of this experiment was to study the effect of reduced nitrogen(N) application under different soil moisture on the nitrate nitrogen (NO₃-N) distribution in soil, N absorption, use efficiency in plant and grain yield of winter wheat. This study will provide a scientific basis for rational N application in Huang-Huai plain.【Method】To determine NO₃-N content in different soil layers of 0-100 cm soil depth, N accumulation, N translocation amount and grain yield of winter wheat, we established a split-plot experiment for two consecutive years (2014-2015 and 2015-2016) in field, i.e. three levels of soil moisture, water deficits to no irrigation (W1), water-saving irrigation to 70%±5% of soil relative moisture after jointing stage (W2) and adequate irrigation to 80%±5% of soil relative moisture after jointing stage (W3); three levels of nitrogen: 0 (N1), 195 kg·hm⁻² (N2) and 270 kg·hm⁻² (N3). 【Result】The content of NO₃-N in 0-60 cm soil layer decreased with the layer's deepening, and soil water content and N application input amount increased; whereas the NO₃-N content in 60-100 cm soil layers increased, especially under

收稿日期: 2017-03-26; 接受日期: 2017-08-29

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目“粮食丰产科技工程”(2011BAD16B07、2013BAD07B07、2015BAD26B01)

联系方式: 张嫚, E-mail: zm9168@163.com. 周苏玫, Tel: 0371-63558122; E-mail: smzhou129@163.com. 张嫚和周苏玫为同等贡献作者。通信作者尹钧, Tel: 13592622283; E-mail: xmzxyj@126.com

W3 treatment. Besides, soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content of 80-100 cm soil layer at N2 and N3 under high supplemental irrigation condition (W3) increased by $3.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $4.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, compared with that under no irrigation (W1). N2 treatment had higher $\text{NO}_3\text{-N}$ content of 0-20 cm soil layer at anthesis, increased by $2.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ than that at maturity; whereas there was more $\text{NO}_3\text{-N}$ residue under high N application (N3) at post-harvest. The results also showed that N translocation amount in vegetative organs ordered by leaf > stem > sheath. In addition, W2 with N2 treatment had the largest N accumulation amount in plant at anthesis, pre-anthesis N translocation amount (N accumulation in vegetative organs at anthesis minus the N accumulation in vegetative organs at maturity, NTA) and the contribution of N remobilized to grain (NTA/ N accumulation in vegetative organs at maturity stage, NRC) from vegetative organs after anthesis. Similarly, the grain yield and N accumulation amount in grain under W2 with N2 treatment were 15.4% and 27.3% higher than that at other treatments, respectively. Those increases would improve N uptake efficiency and N fertilizer productive efficiency under W2 with N2 treatment ($P < 0.05$). **【Conclusion】** Considering the yield, N uptake efficiency, N fertilizer productive efficiency and soil nitrogen balance, reducing N application from 270 to $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ under suitable soil moisture (water-saving) is optimal in Huang-Huai Rivers Valley wheat region.

Key words: winter wheat; nitrogen-reducing and suitable soil moisture; nitrogen absorption and utilization; nitrate nitrogen content; yield

0 引言

【研究意义】黄淮冬麦区是中国重要的小麦生产基地,总产量占全国的76%,该地区常年降雨量为520—900 mm,小麦生育期降水仅有150—300 mm,尤其是北部地区降水量少,不能满足小麦生长发育需要,多依靠超采地下水进行农田灌溉,导致地下水位持续下降,水资源日益匮乏^[1]。灌水技术上又存在足量灌溉或大水漫灌的现象,造成农田土壤养分的淋失。氮素是影响作物生长发育的重要限制因子,合理施氮能促进根系发育,增强作物对土壤水分和氮肥的吸收,提高籽粒产量^[2-3]。而过量施用氮肥,导致氮素残留在土壤或以氨等形式挥发,不仅造成氮肥增产效果下降、土壤板结,还会以硝态氮淋失等途径污染地下水,危害生态环境^[4-5]。因此,适宜土壤墒情下,探讨降低施氮量对麦田土壤中硝态氮的利用,开花前后氮素吸收、转运分配特性的影响,对于小麦的可持续生产具有重要意义。**【前人研究进展】**冬小麦营养器官氮素积累、分配及转运与籽粒的产量和品质紧密相关^[6]。适量灌溉是促进氮肥吸收,提高氮肥利用率的基础,随灌溉量和灌溉次数的增加,小麦开花前后植株对氮素的吸收量显著增加^[7],但灌水不足或过量灌溉均不利于氮素在植株中的积累^[8]。研究表明,增施氮肥能够促进植株对氮素的吸收和开花前后氮素向籽粒中的转运^[2,9],而氮肥用量过多会延缓植株衰老,降低籽粒产量、氮素转移率和氮肥利用率^[10-11]。高宝珍等^[12]研究表明,在限水灌溉条件下,适量施氮($180\text{—}210 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)可增大华北地区冬小麦冠层叶片间氮素垂直分布梯度,提高叶片氮素转移量和对

籽粒的贡献率,获得较高的氮素利用率。王小燕等^[13]研究指出,在一定灌溉条件下,施氮量由 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,各营养器官中氮素的积累量增加,但开花后营养器官氮素向籽粒的转移率降低,最终不利于提高籽粒蛋白质含量。郭天财等^[14]认为,高产麦田中,随施氮量($0\text{—}360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的增加,植株地上部氮积累量提高,同时氮表观损失量和土壤残留量也逐渐增多。硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)是植物根系吸收利用的主要无机氮,灌水过多或长期大量施氮都会导致硝态氮在小麦根区以下土层积累,生物有效性降低,而硝态氮淋失是农田氮素损失的主要途径^[15-16]。**【本研究切入点】**黄淮南部小麦高产生中氮素的使用量大都在 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,如何优化氮肥管理,提高氮肥利用率,降低硝态氮在深层土壤的残留,保护生态环境,充分发挥氮素肥效,维持小麦可持续生产,成为生产上亟待解决的问题,而这方面的研究报道尚少。**【拟解决的关键问题】**本试验在大田常规高量施肥的基础上适当减少施氮量,结合适宜补墒灌溉处理,研究土壤中有效氮的动态分布和植株对氮素的有效利用规律,旨在为黄淮高产麦区提高氮肥吸收利用率和小麦高效高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2014—2016年在河南省郑州市河南农业大学科教示范园区($113^{\circ}39'\text{E}$, $34^{\circ}43'\text{N}$)进行,地处北温带大陆半湿润性季风气候区域,平均海拔46.5 m,年平均日照时数1869.7 h,年平均气温 15.6°C ,无霜

期 209 d, 一年两熟, 年平均降雨量 542.2 mm。2014—2015 和 2015—2016 年小麦生育期间总降水量为 216.8 mm 和 239.0 mm, 其中播种到拔节期分别为 46.8 mm 和 154.9 mm, 拔节到成熟期分别为 170.0 mm 和 84.1 mm, 具体分布见图 1。试验区降水量少且分

布不均, 为保证冬小麦的高产生长发育, 必需补充灌溉。试验材料为河南省主推高产品种周麦 22。试验田地势平坦, 地力均匀, 前茬作物为玉米, 供试土壤为潮土, 土壤容重为 $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间最大持水量为 24.2%。土壤基础肥力情况如表 1 所示。

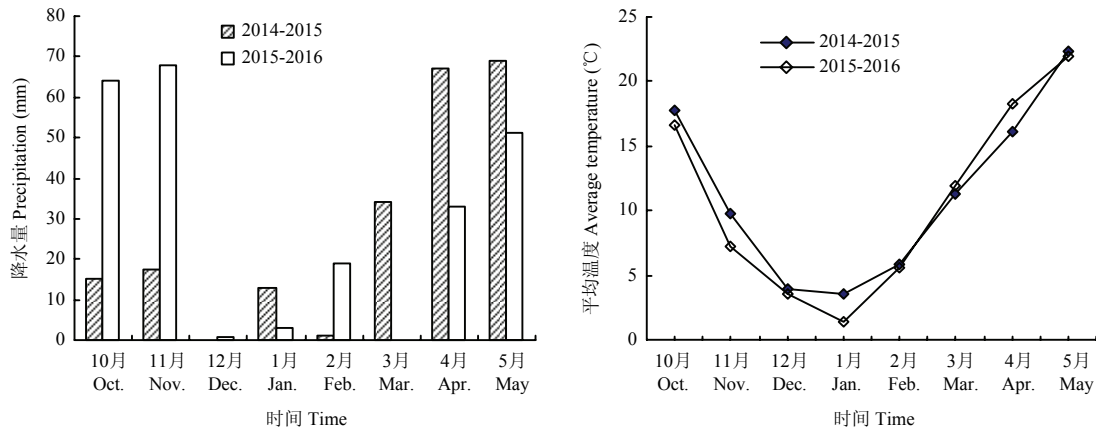


图 1 两个小麦生长季的降水量和平均温度分布

Fig. 1 Precipitation and average temperature in two growth seasons of winter wheat

表 1 试验土壤的基础肥力状况

Table 1 The soil fertility status of the tested soil

年份 Year	土壤层次 Soil layer (cm)	有机质 OM ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 AN ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 AP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 AK ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2014-2015	0-20	15.0	0.9	60.0	28.8	130.0
2015-2016	0-20	14.8	1.0	58.4	27.4	127.6

OM: 有机质; TN: 全氮; AN: 碱解氮; AP: 速效磷; AK: 速效钾

OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; AN: Available nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium

试验设 3 个水分处理: (1) 自然降水 (W1, 不灌溉); (2) 适墒处理 (W2, 拔节后土壤相对含水量维持在 $70\%\pm 5\%$); (3) 足墒处理 (W3, 拔节后土壤相对含水量维持在 $80\%\pm 5\%$), 不同灌水处理小区间设置 1 m 隔离带。3 个施氮处理: (1) N1 (不施氮肥); (2) N2 (减氮施肥处理, 施纯氮 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); (3) N3 (常规高量氮肥处理, 施纯氮 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。本试验为多年定点定位水肥试验, 采用二因素裂区设计, 主区为水分处理, 副区为施氮处理, 共 9 个处理, 重复 3 次, 共 27 个小区。小区面积 21 m^2 ($7 \text{ m}\times 3 \text{ m}$), 每小区 12 行, 行距 20 cm。小麦播种之前施入基肥, 其中磷肥 (过磷酸钙) $97.5 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾肥 (硫酸钾) $150 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 同时施入 40% 氮肥 (尿素); 拔节期追施剩余 60% 氮肥。

两年均在 10 月 14 日播种, 基本苗为 $237.5 \text{ 万株}/\text{hm}^2$, 3 叶期确定一米双行进行追踪观察。小麦开花时在各小区中间区域选择同期开花、穗型整齐、株高一致的单茎进行挂牌标记。于 5 月 25 日至 6 月 3 日按成熟先后以小区为单位分次收获。其他管理措施同大田高产栽培。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 补灌方法与土壤相对含水量的计算 小麦拔节后, 每隔 10 d 测一次土壤墒情, 按公式 $SI = 10 \times \gamma_{bd} \times D_h \times (\theta_t - \theta_n)$ 计算灌水量。式中, SI (mm) 为灌水量, γ_{bd} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 为计划湿润层的土壤容重, D_h (cm) 为计划湿润层的土壤深度 (本试验中为 60 cm), θ_t (%) 为目标含水量, θ_n (%) 为灌溉前土壤含水量。用水表计量实际灌水量, 保证各处理土壤含水量控制在试

验要求的范围。

采用直径 4 cm 土钻取 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤, 装入铝盒称鲜质量, 105℃烘干至恒量, 称干质量, 计算土壤质量含水量和土壤相对含水量。

1.2.2 土壤硝态氮含量测定 在小麦开花期和成熟期, 用土钻取 0—100 cm 土层土样, 每 20 cm 为一层, 土样剔除作物根系后混匀立即装入自封袋, 于-20℃条件保存。采用 KCl 浸提法, 在 220 nm 和 275 nm 波长下测定硝态氮含量^[17]。

1.2.3 植株氮素含量测定及氮素积累、运转的计算方法 各处理在开花期和成熟期取田间标记过的单茎 10 株, 进行器官分离, 在 80℃条件下烘至恒重, 粉碎后用于植株氮素含量测定。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、半微量凯氏定氮仪测定植株的含氮量。各器官氮素积累、运转及氮素利用的计算公式^[11,18-19]如下:

各器官氮素积累量=氮素含量(%)×干物质质量;

花前氮素转移量=开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量;

花前氮素转移率=花前氮素转移量/开花期氮素积累量×100%;

花前氮素对籽粒氮素的贡献率=花前氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量×100%;

花后氮素积累量=成熟期植株氮素积累量-开花期植株氮素积累量;

花后氮素对籽粒氮素的贡献率=花后氮素积累量/成熟期籽粒氮素积累量×100%;

氮素吸收效率=成熟期植株地上部氮素积累量/施氮量;

氮素利用效率=籽粒产量/成熟期植株地上部氮素积累量;

氮肥生产效率=籽粒产量/施氮量;

氮素收获指数=籽粒氮素积累量/成熟期植株地上部氮素积累量。

1.2.4 籽粒产量及其构成因素的测定 小麦成熟时, 收获一米双行, 统计穗数、穗粒数、千粒重。每小区实收 4.8 m² (1.6 m×3 m), 脱粒晒干后计算籽粒产量, 籽粒含水量为 12.5%, 3 次重复。

1.3 数据统计分析

用 Microsoft Excel 2010 整理数据和作图, SPSS 19.0 软件进行方差分析和多重比较 (LSD 法)。除图 3 为 2015—2016 年数据外, 其他为 2014—2016 两年数据。

2 结果

2.1 冬小麦生育期内 0—40 cm 土层含水量的动态变化

小麦生育期间, 不同水分处理土壤耕层 (0—40 cm) 的相对含水量动态变化如图 2 所示。可以看出, 两个小麦生长季 0—40 cm 土层相对含水量受灌溉的影响, 表现为 W3>W2>W1, 0—20 cm 土层 W1、W2 和 W3 处理在越冬至灌浆期相对含水量的变幅分别是 39.3%—59.6%、65.5%—73.3%和 74.6%—81.1%, 平均含水量为 48.3%、70.0%和 77.3%, 变异系数为 15.9%、4.1%和 3.4%, 20—40 cm 土层 W1、W2 和 W3 水分处理在越冬至灌浆期水分的变幅分别是 33.7%—64.2%、67.8%—76.7%和 76.7%—82.6%, 平均含水量为 49.0%、72.1%和 80.7%, 变异系数为 23.6%、4.7%和 3.0%。由此可见, 可根据不同生育阶段的降雨量和土壤墒情的变化, 进行测墒补灌, 保证了土壤中要求的含水量, 从而调控氮肥的吸收和利用。同时, 自然降水条件下, 生育期含水量均较低, 变异系数较大, 限制了氮素的吸收和运动。

2.2 0—100 cm 土层中硝态氮和土壤含水量的分布

0—100 cm 土层中硝态氮和土壤含水量分布如图 3 所示。由图 3-A 可以看出, 土壤硝态氮 (NO₃-N) 的含量在 0—60 cm 随土层加深逐渐减少, 大于 60 cm 又有不同程度的回升。随施氮量的增加, 各土层中硝态氮含量显著提高, N1、N2 和 N3 水平下 0—100 cm 土层平均含量在开花期依次为 4.7、11.5 和 12.8 mg·kg⁻¹, 成熟期依次为 3.9、10.7 和 13.40 mg·kg⁻¹, 其中硝态氮在 0—20 cm 土层含量最高, 大于 20 cm 土层含量明显降低。N1 和 N2 水平下, 开花期 0—80 cm 各土层平均硝态氮含量均高于成熟期, 尤其是 N2 处理 0—20 cm 土层相差最大, 平均降幅为 2.3 mg·kg⁻¹; N3 水平下, 开花期 0—100 cm 各土层平均硝态氮含量低于成熟期, 其中 80—100 cm 土层增幅最大, 为 1.8 mg·kg⁻¹。由此可见, 适量施氮 (N2) 增加了土壤硝态氮含量, 维持植株生长的需要, 有利于花后对硝态氮的吸收利用, 收获后硝态氮含量明显下降; 而高氮处理 (N3), 开花期含量较高, 收获后土层中的硝态氮仍有较多的富集。

由图 3-B 还可看出, 不同的灌溉量明显影响了 0—100 cm 土层中的土壤含水量, 在 0—80 cm 随土层加深逐渐减少, 60—80 cm 出现低谷, 80—100 cm 又有回升, 其中以 W3 回升最明显, 从而改变了土层中

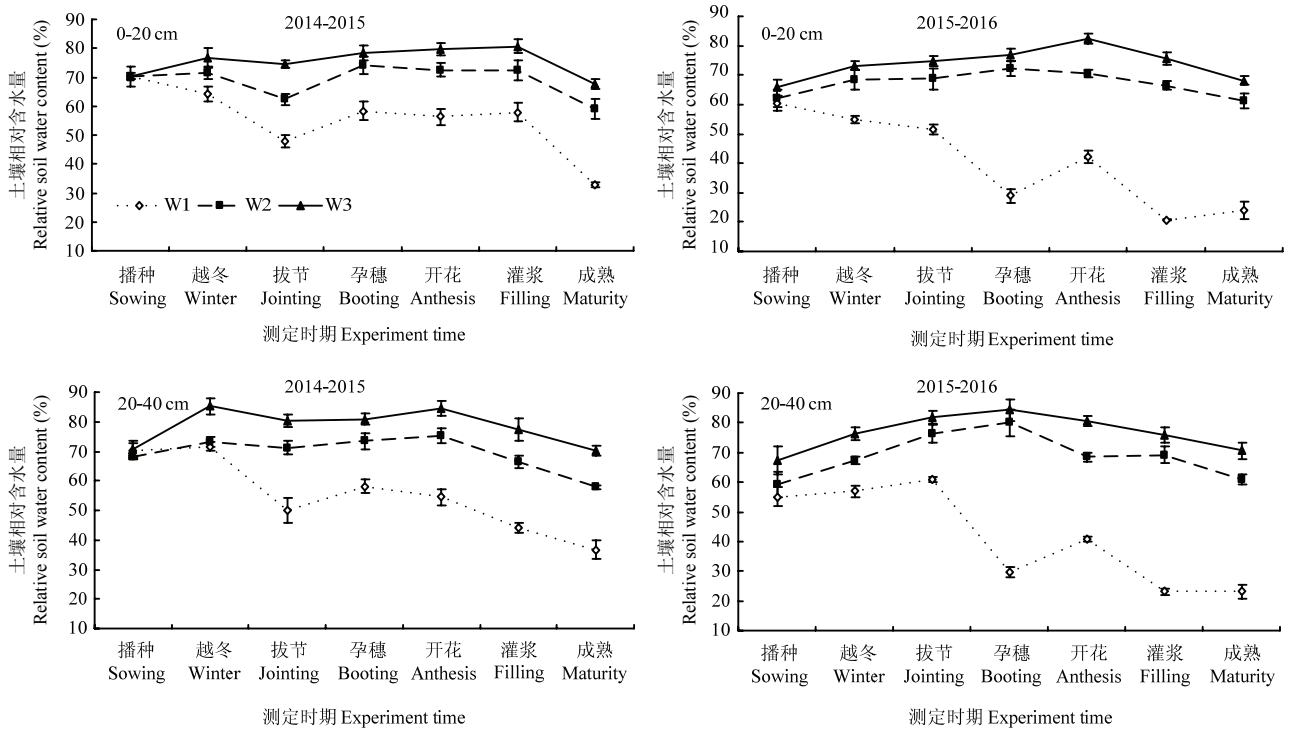


图 2 两个小麦生长季内 0—40 cm 土壤相对含水量

Fig. 2 Soil relative water content in 0-40 cm layers in two growth seasons of winter wheat

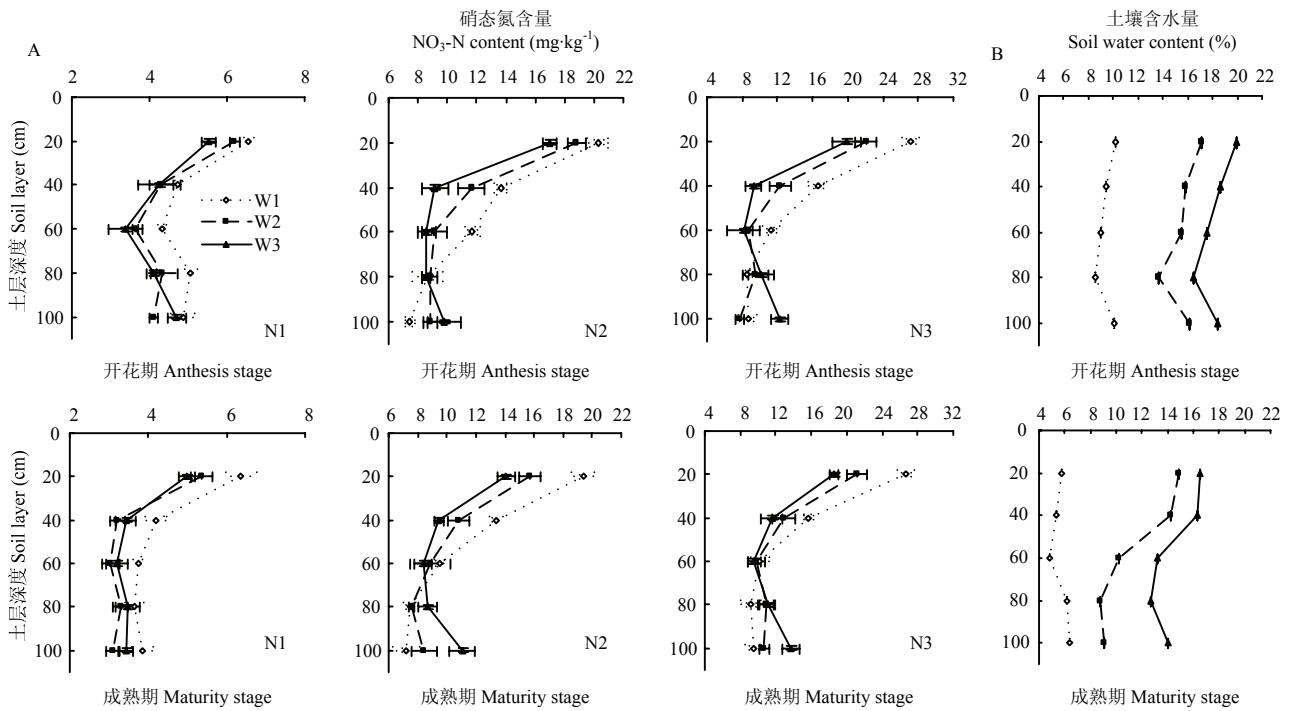


图 3 0—100 cm 土层土壤 NO₃-N 含量(A)和土壤含水量(B)分布 (2015—2016)

Fig. 3 NO₃-N content and soil water content at anthesis and maturity in the 0-100 cm soil layers (2015-2016)

硝态氮的分布。同一施氮水平下, 0—40 cm 土层硝态氮含量随灌水量的增加而降低, 表现为 $W3 < W2 < W1$, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$) (图 3-A); 随着土层的加深, 灌水处理之间的差异减少, 开花期 60—80 cm、收获后 40—60 cm 土层不同水分处理之间的差异不明显; 土层进一步加深, 水分处理间差异又变大, 尤其在成熟期 80—100 cm 土层硝态氮含量随灌水量的增加而显著升高, N2 和 N3 水平下, 均为 $W3 > W2 > W1$ (除开花期 N3 水平下 $W3 > W1 > W2$) ($P < 0.05$), 其中在 N2 条件下, W3、W2 平均分别比 W1 高 $3.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, N3 条件下 W3、W2 平均分别比 W1 高 $4.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明灌溉加速 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向土壤深层的淋失, 随着施氮量的增多, 淋失量增大。

2.3 减氮适墒对冬小麦氮素积累与分配的影响

表 2 为小麦开花和成熟期不同水氮处理下营养器官和籽粒中氮素的积累情况, 结果表明灌水和施肥均明显提高了植株氮素的积累量。2014—2015 年度, 在 W2 和 W3 条件下, 开花期氮素积累量在茎+鞘和穗中表现为 $N3 > N2 > N1$, 在叶中表现为 $N2 > N3 > N1$; 成熟期各器官中氮素积累量随施氮量的增加表现基本一致, 为 $N2 > N3 > N1$, 但营养器官中氮素积累量在 N3 和 N2 间无显著差异。2015—2016 年度, 在适墒处理 W2 下, 开花期和成熟期各营养器官的氮素积累量表现为 N2、N3 显著高于 N1 ($P < 0.05$), N3 与 N2 差异不大; 在足墒 W3 处理下, 各营养器官和籽粒中的氮素积累量随施氮量的增加逐渐增加, 表现出 $N3 > N2 > N1$ (除开花期穗中以 N2 处理较高)。

表 2 不同处理对小麦开花期和成熟期氮素积累的影响

Table 2 Effects of different treatments on N distribution in different organs at anthesis and maturity in wheat ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

年份 Year	处理 Treatment	开花期氮素积累量 Nitrogen accumulation amount at anthesis					成熟期氮素积累量 Nitrogen accumulation amount at maturity					
		茎+鞘 Stem+ Sheath	叶 Leaf	营养体 VO	穗 Spike	穗/营养体 Spike/VO	茎+鞘 Stem+ Sheath	叶 Leaf	颖壳+穗轴 Spike axis+Husk	营养体 VO	籽粒 Kernel	籽粒/营养 体 Kernel/VO
2014- 2015	W1N1	43.5g	63.0g	106.5e	16.5e	0.2cd	7.2e	5.2f	9.4e	21.9e	158.2e	7.2a
	W1N2	59.1de	82.8d	141.9d	24.7c	0.2b	12.1d	14.0a	12.4d	38.6c	199.9b	5.2b
	W1N3	60.3cd	76.2e	136.5e	15.1e	0.1f	13.8c	12.4bc	15.0c	41.2bc	174.7d	4.2ef
	W2N1	55.0ef	71.8f	126.8f	21.7d	0.2b	15.2bc	9.7d	10.8de	35.7d	162.4e	4.6cde
	W2N2	78.2a	108.8a	187.0a	24.1c	0.1e	11.7d	14.1a	15.2bc	41.0bc	212.1a	5.2b
	W2N3	80.9a	101.1b	182.0b	27.5ab	0.2d	10.7d	13.7ab	18.2a	42.7b	199.6b	4.7cd
	W3N1	53.4f	76.9e	130.3f	24.8c	0.2a	16.3ab	7.8e	11.5d	35.5d	173.0d	4.9bc
	W3N2	64.3c	103.9b	168.1c	25.8bc	0.2d	17.2a	12.0c	17.6a	46.8a	202.5b	4.3def
	W3N3	71.4b	100.4c	171.8c	28.8a	0.2bc	16.3ab	13.1abc	16.8ab	46.2a	185.7c	4.0f
2015- 2016	W1N1	47.8e	37.8e	117.5e	32.0e	0.4b	10.6d	6.6e	11.1e	28.3f	163.8de	5.8a
	W1N2	62.9d	58.8d	154.2d	32.4e	0.3d	19.3bc	9.3cd	11.4e	40.0d	195.9bc	4.9b
	W1N3	59.4d	54.4d	144.9d	31.1e	0.3cd	18.3bc	7.3de	16.4d	39.6d	173.2cd	4.4bcd
	W2N1	48.0e	31.6f	118.4e	38.8d	0.5a	17.3c	6.5e	8.2f	31.9e	130.8ef	4.1cde
	W2N2	102.5a	92.1a	252.4a	57.8a	0.3c	29.5a	15.5b	20.4bc	65.4b	263.6a	4.0de
	W2N3	102.5a	81.5b	234.8b	50.8bc	0.3cd	27.6a	11.5c	23.5a	62.7b	258.9a	4.1cde
	W3N1	46.0e	33.9ef	117.8e	37.9d	0.5a	12.6d	7.5de	9.7ef	29.8ef	143.0ef	4.8bc
	W3N2	85.9c	64.7c	205.4c	54.8ab	0.4b	21.2b	14.2b	18.8c	54.3c	218.0b	4.0de
	W3N3	94.3b	85.1b	229.1b	49.7c	0.3cd	28.4a	18.7a	22.5ab	69.5a	251.0a	3.6c

VO: 营养器官; 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

VO: Vegetative organ; Values followed by different letters within the same column mean significantly different ($P < 0.05$). The same as below

2014—2015 年度开花期穗/营养体以 W2N2 处理最低 (0.1), 2015—2016 年度以 W3N3 处理较低, 而成熟期籽粒/营养体在两个生长季均以 W3N3 处理表现最低 (4.0 和 3.6, $P < 0.05$), 表明足墒下施氮过多导致成熟期营养器官中的氮素残留量增加, 不利于向籽粒中转运, 造成氮素收获指数降低。而减氮适墒 (W2N2) 处理下, 开花期营养器官和成熟期籽粒中氮素积累量最高, 其中籽粒氮素积累量平均达 $237.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比其他处理高出 27.3%。

2.4 减氮适墒对冬小麦氮素吸收、转运的影响

由表 3 可见, 开花后各器官氮素向籽粒中的转移量表现为叶片 > 茎+鞘 > 穗, 表明叶片是籽粒积

累氮素的最大供给器官。2014—2015 年度, 随灌溉水平的增加, 茎+鞘氮素转移量表现为 $W2 > W3 > W1$, 叶片和穗中表现为 $W3 > W2 > W1$; 在 W2 和 W3 处理下, 随施氮量的增加, 茎+鞘氮素转移量为 $N3 > N2 > N1$, 叶中为 $N2 > N3 > N1$, 而在穗中为 $N1 > N3 > N2$ 。2015—2016 年度, 不同灌水处理间比较, 各器官氮素向籽粒的转移量表现为 $W2 > W3 > W1$, 在灌溉处理 W2、W3 下, 各营养器官氮素转移量随施氮量的增加变化与 2014—2015 年度基本一致。

灌溉显著增加了两年度冬小麦花前氮素向籽粒的转移总量及贡献率, 为 $W2 > W3 > W1$; 在适墒 W2

表 3 不同处理条件下冬小麦植株氮素的吸收与转移

Table 3 Assimilation and translocation to grains of N accumulated under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	开花-成熟氮素转移量 AS-MS NTA ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			花前氮素 转移量 Pre-anthesis NTA ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花前氮素 转移率 Pre-anthesis NTR (%)	花前氮素对籽粒 氮的贡献率 Pre-anthesis NRC (%)	花后氮素积累量 Post-anthesis NAA ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花后氮素对籽粒 氮的贡献率 Post-anthesis NRC (%)
		茎+鞘	叶	穗					
		Stem+ Sheath	Leaf	Spike					
2014- 2015	W1N1	36.3d	57.8e	7.1d	101.2g	82.2a	64.0e	57.0bc	36.0ab
	W1N2	47.0c	68.8c	12.3ab	128.1d	76.9c	64.1e	71.8a	35.9ab
	W1N3	46.5c	63.8d	1.4e	110.4f	72.8d	63.2e	64.4ab	36.8a
	W2N1	39.9d	62.1d	10.9bc	112.9f	76.0c	69.5d	49.6cd	30.5c
	W2N2	66.5a	94.7a	8.9cd	170.1a	80.5ab	80.2b	42.0de	19.8d
	W2N3	70.2a	87.3b	9.3cd	166.8a	79.6b	83.6a	32.8e	16.4d
	W3N1	37.1d	69.2c	13.3a	119.6e	77.1c	69.1d	53.4bcd	30.9bc
	W3N2	47.1c	91.9a	8.2d	147.2c	75.9c	72.8c	55.3bc	27.2c
	W3N3	55.1b	87.3b	12.0ab	154.4b	77.0c	83.2a	31.3e	16.8d
2015- 2016	W1N1	37.2def	31.3d	20.8c	89.3e	75.8a	55.7d	74.5bc	44.3a
	W1N2	43.7d	49.5c	21.0c	114.2d	74.0ab	58.4cd	81.7ab	41.6ab
	W1N3	41.1de	47.7c	14.7d	105.3d	72.7b	60.8bcd	67.9c	39.2abc
	W2N1	30.7f	25.1e	30.6b	86.4e	73.0b	66.1abc	44.3d	33.9cde
	W2N2	72.9ab	76.6a	37.4a	187.0a	74.1ab	71.2a	76.6bc	28.8e
	W2N3	74.9a	70.0b	27.3b	172.2b	73.3ab	66.8abc	86.7ab	33.2cde
	W3N1	33.3ef	26.5e	28.2b	88.0e	74.8ab	62.3abcd	55.0d	37.7bc
	W3N2	64.6c	50.5c	36.0a	151.1c	73.6ab	69.3ab	66.9c	30.7de
	W3N3	65.9bc	66.4b	27.2b	159.6c	69.7c	63.6abcd	91.4a	36.4bcd

AS: 开花期; MS: 成熟期; NTA: 氮素转移量; NTR: 氮素转移率; NRC: 氮素对籽粒氮的贡献率; NAA: 氮素积累量

AS: Anthesis stage; MS: Maturity stage; NTA: N transportation amount; NTR: N transportation rate; NRC: Contribution of N remobilized to grain; NAA: Nitrogen accumulation amount

条件下,花前氮素转移量随施氮量的增加表现为 $N_2 > N_3 > N_1$, 足墒 W_3 条件下, 表现为 $N_3 > N_2 > N_1$, 两年均在 W_2N_2 处理下最大, 这与各器官氮素向籽粒的转移情况相吻合, 表明减氮适墒处理有效促进氮素向籽粒中的转移。在 W_2 和 W_3 处理下, 不同施氮量间比较, 花前氮素对籽粒氮的贡献率在 2014—2015 年度为 $N_3 > N_2 > N_1$, 2015—2016 年度为 $N_2 > N_3 > N_1$ 。两年度小麦花前氮素向籽粒的转移率在灌溉间表现为 $W_2 > W_3$, 在 W_2 水平下, 施氮处理间表现为 $N_2、N_3 > N_1$, 但在 W_3 水平下, 表现为 $N_1 > N_2、N_3$, N_2 与 N_3 间差异不显著, 且两年氮素转移率在 W_2N_2 处理有较高值, 表明足墒条件下, 大量施氮对营养器官氮素向籽粒的转移有抑制效应。

两年度冬小麦花后氮素积累量及对籽粒氮的贡献率随灌溉水平增加, 表现为 $W_1 > W_3 > W_2$, 同一灌溉条件下, 花后氮素积累量在 2014—2015 年度表现为 $N_2 > N_3$, 2015—2016 年度在 $W_2、W_3$ 水平下为 $N_3 > N_2$, 两年均在 W_1N_2 处理下有较高值。两年度冬小麦花后氮素积累量对籽粒氮的贡献率在 W_2 和 W_3 下,

随施氮量增加表现为 $N_1 > N_3、N_2$, 各施氮间无显著差异, 表明灌溉条件下施氮降低了花后氮素积累对籽粒氮的贡献。

2.5 减氮适墒对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

由表 4 可知, 适墒和减量施氮明显影响了两年籽粒产量及其构成因素。灌水处理间比较, 两年度的穗数、穗粒数和千粒重的变化趋势基本一致, $W_3、W_2$ 显著高于 W_1 ($P < 0.05$), $W_3 > W_2$, 差异不大; 同一灌溉水平下, 随施氮量的增加均表现为 $N_2 > N_3 > N_1$ 。自然降水条件下 (W_1), N_2 和 N_3 处理穗粒数和千粒重差异不显著, 施氮效应不明显; W_2 条件下, 穗粒数和籽粒产量在不同施氮处理间差异显著, 2014—2015 年度穗粒数和千粒重及 2015—2016 年度穗数均以 W_2N_2 处理最高, 显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。 W_3 水平下, 穗数和产量在 N_2 和 N_3 间差异显著, 穗粒数以 N_2 处理最高。两年籽粒产量范围为 7 238—9 704 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 6 313—8 899 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 均在 W_2N_2 达到较高, 平均比其他处理高出 15.4%。

表 4 不同处理对小麦产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of different treatments on yield and yield components of wheat

处理 Treatment	2014-2015				2015-2016			
	穗数 SN($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 GNS	千粒重 TGW (g)	籽粒产量 GY ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	穗数 SN($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 GNS	千粒重 TGW (g)	籽粒产量 GY ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
W1N1	503.6g	32.0g	46.7f	7237g	740.0f	35.6f	45.6e	6313f
W1N2	575.3f	35.2e	47.9de	8259de	863.3de	39.5d	48.3cd	7333c
W1N3	566.1f	32.6g	47.2ef	8042e	787.5ef	37.9e	48.6cd	6813de
W2N1	592.8e	34.3f	48.5d	7815f	768.3ef	39.5d	49.4c	6047g
W2N2	627.0c	39.9a	53.2a	9703a	1143.3a	43.1b	52.3a	8240b
W2N3	656.2b	39.0b	50.3c	9402b	1063.3ab	40.7c	51.2ab	8899a
W3N1	607.8d	36.2d	50.0c	8359d	930.0cd	40.5c	49.2c	6615e
W3N2	646.1b	37.9c	52.2b	8844c	991.7bc	44.6a	51.1b	7000d
W3N3	675.3a	38.3bc	51.5b	9192b	1118.3a	43.3b	47.9d	8208b

SN: 穗数; GNS: 穗粒数; TGW: 千粒重; GY: 籽粒产量

SN: Spike number; GNS: Grain number per spike; TGW: 1000-grain weight; GY: Grain yield

2.6 减氮适墒对冬小麦氮素生产与利用效率的影响

由表 5 可知, 2014—2015 年度, 小麦氮素吸收效率和氮肥生产效率不同灌溉处理间表现为 $W_2 > W_3 > W_1$, 差异显著; 同一灌溉水平下, 氮素吸收效率和氮

肥生产效率随施氮量的增加表现为 $N_2 > N_3$ 。2015—2016 年度, 氮素吸收效率和氮肥生产效率变化趋势与 2014—2015 年度一致, 均以 W_2N_2 处理最高, 两年度二者平均比 W_2N_3 分别提高 0.5 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 12.2 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表明在适墒 W2 条件下, 减量施氮至 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 更有效提高植株中氮素积累量和籽粒产量。

2014—2015 年度, 灌溉处理间比较, 氮素利用效率表现为 $W2 > W3 > W1$, 氮素收获指数表现为 $W1 > W2 > W3$; 同一灌溉处理下, 氮素利用效率随施氮量的增加表现为 $N1 > N3 > N2$, 各施氮间无显著差异,

其中 W3N3 在理间表现较高; 收获指数在 W2 条件下表现为 $N2 > N3 > N1$, 在 W3 条件下表现为 $N1 > N2 > N3$, 以 W2N2 处理较高。与 2014—2015 年度相比, 2015—2016 年度各处理氮素利用效率和收获指数较低, 变化趋势与 2014—2015 年度基本一致, 且收获指数均在 W3N3 处理表现最低 ($P < 0.05$)。

表 5 不同处理对小麦氮素吸收和利用效率的影响

Table 5 Effects of different treatments on N uptake efficiency and use efficiency of wheat

年份	处理	氮素吸收效率	氮素利用效率	氮肥生产效率	氮素收获指数
Year	Treatment	N uptake efficiency ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	N use efficiency ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	N productive efficiency ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	N harvest index (%)
2014-2015	W1N1	—	40.2a	—	87.9a
	W1N2	1.2b	34.7d	42.4c	83.8b
	W1N3	0.8d	37.2bc	29.8f	80.9de
	W2N1	—	39.5ab	—	82.0cd
	W2N2	1.3a	38.3ab	49.8a	83.8b
	W2N3	0.9c	38.8ab	34.8d	82.4c
	W3N1	—	40.1a	—	83.0bc
	W3N2	1.3a	35.5cd	45.4b	81.2d
	W3N3	0.9c	39.7a	34.0e	80.1e
2015-2016	W1N1	—	33.7ab	—	85.0a
	W1N2	1.2c	31.1bc	37.6b	83.1ab
	W1N3	0.8d	32.0bc	25.2f	81.4bc
	W2N1	—	37.2a	—	80.4cd
	W2N2	1.7a	25.1d	42.3a	80.1cd
	W2N3	1.2c	27.7cd	33.0d	80.4cd
	W3N1	—	38.7a	—	82.7b
	W3N2	1.4b	25.7d	35.9c	80.1cd
	W3N3	1.2c	25.6d	30.4e	78.3d

3 讨论

3.1 减氮适墒对土壤硝态氮含量的影响

土壤硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 是作物直接吸收利用的氮素形态, 主要集中在 0—40 cm 土层, 且含量随着小麦生育时期的推进, 呈下降趋势^[20]。前人研究表明, 施氮提高了各土层硝态氮含量, 低氮水平下施氮不会显著增加土壤中硝态氮的积累量, 而高于最佳氮肥量时, 氮肥施入会造成硝态氮向下层移动并在深层中累积, 同时增大氮素淋失量^[21-22]。戴健等^[17]研究表明, 硝态氮发生淋失的土层深度和淋失量与氮肥量呈显著的抛

物线关系 ($r=0.9889$ 和 0.9940), 在施氮量 $160 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上, 每增加 $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮肥量, 硝态氮淋失深度和淋失量的增加量分别高于 27 cm 和 $80.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本试验结果表明, 减氮施肥处理 (N2) 促进了小麦在花后对土壤表层硝态氮的吸收利用, 开花期 0—80 cm 各土层硝态氮含量均高于成熟期, 0—20 cm 土层含量相差最大, 平均降幅为 $2.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而高施氮 (N3) 条件下, 收获后土壤硝态氮在 0—100 cm 各土层均有不同程度的积累, 80—100 cm 土层比开花期增加了 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

灌水量过多是促进硝态氮向深层土壤运移, 造

成氮素损失的另一主要原因。当施氮量从 0 增加到 $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 高频灌溉和低频灌溉处理的硝态氮淋失量分别增加了 10 倍和 6 倍^[23]; 也有研究表明, 施氮 $210 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平下, 在灌溉底墒水+拔节水的基础上增加开花水和开花水+灌浆水, 硝态氮向 100 cm 以下土层的淋溶量增加; 施氮量达 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 随灌水量的增加硝态氮在深层土壤的积累量均明显增多^[16], 而小麦的根系 90% 左右集中在 100 cm 以上土层^[3], 硝态氮下移至深层不利于根系的吸收利用。本试验结果表明, 施氮条件下补充灌溉增加了硝态氮在 60—100 cm 土层的积累, 尤其是 W3 处理; 收获后 80—100 cm 土层, W3 处理硝态氮含量在 N2 和 N3 水平下分别比 W1 处理增加了 $3.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。减氮水平 (N2) 下, W2 与 W3 处理相比, 促进成熟植株对 0—60 cm 土层硝态氮的吸收利用, 可减少硝态氮向 60 cm 以下土层的淋溶, 是小麦氮素吸收效率较高的原因。

3.2 减氮适墒对小麦氮素积累及转运的影响

灌溉与施氮量是调控小麦花后氮素的积累、转运及分配, 提高氮素利用效率的有效措施。形成小麦籽粒的氮素主要有两部分, 花前营养器官氮素的转移和花后氮素积累, 因气候和栽培措施的不同, 前者是后者的 2.6—6.0 倍^[24]。有研究指出^[25], 土壤干旱提高了花前营养器官氮素向籽粒的转移率, 但因植株总氮素积累量较少, 籽粒中的氮素积累也并未得到提高; 但多数研究表明, 灌水不足或过多均会导致花前营养器官的氮素转移量降低, 适宜灌溉是提高小麦开花前营养器官氮素向籽粒的转运量和花后吸氮量, 提高籽粒产量和氮素利用效率的基础^[7, 26-27]。本试验结果表明, 各营养器官氮素积累量及向籽粒的转移量, 花前氮素向籽粒的转移总量及贡献率均以 W2 处理较高, 花前氮素向籽粒的转移率亦有较高水平, 使得籽粒中氮素积累量最高, 而花后氮素积累量及对籽粒的贡献率以 W1 最高, 与前人结果基本一致。足墒处理 W3 延缓了小麦植株衰老, 导致氮素在成熟期营养器官中的残留量增大, 不利于向籽粒中转移, 两年度的收获指数在 W3N3 处理表现最低。

前人研究表明, 当施氮量较低时, 在一定的施氮范围内小麦开花、成熟期氮素吸收量和籽粒氮素积累量随施氮量的增加表现增加的趋势, 但当超出了这个施氮范围, 再增施氮肥会造成营养器官中氮素的残留

量增加, 不利氮素向籽粒的转移^[9, 13, 28]。熊淑萍等^[29]研究也表明, 施氮量从 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 减少至 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 漯麦 18 和豫麦 49-198 的花前氮素转移量下降但降幅较小, 而开花后氮素的吸收量及对籽粒的贡献率增高。本试验结果表明, 在 W2 水平下, N2 处理有效促进了叶片中积累的氮素向籽粒中转移, 从而提高了花前营养器官对籽粒的氮素转移量及贡献率, 两年度籽粒氮素积累量平均比其他处理高出 27.3%, 转移率亦达较高水平, 这与前人研究结果基本一致, 表明适墒条件下 (W2), 适量减少氮肥的施入有利于植株营养器官中氮素向籽粒的转移。

3.3 减氮适墒对小麦籽粒产量及氮素利用的影响

适宜补灌能提高群体氮素吸收量, 充分发挥肥效, 提高氮素利用效率和再分配效率, 从而实现小麦高产^[30-31]。张永丽等^[25]研究表明, 在小麦生育期间降水量为 196.1 mm 的情况下, 灌水 240 mm 相比 180 mm 和 300 mm 可显著提高济麦 20 的氮素利用效率和生产效率, 从而提高籽粒产量, 试验中适宜灌水量为 180—240 mm。本研究结果显示, 两年度小麦生育期降水量为 216.8 mm 和 239.0 mm 的情况下, 适宜灌溉结合减施氮肥 (W2N2) 可显著提高籽粒产量及其构成因素, 产量平均较其他处理高出 15.4%。VAN SANFORD 等^[32]指出, 氮素收获指数范围为 0.7—0.8, 高施氮条件下氮素收获指数的降低会导致氮素利用效率的下降。赵俊晔等^[11]研究表明, 高产条件下, 随施氮量 ($150—195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的增加, 植株氮素积累量增加不显著, 但施氮量由 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高到 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 小麦的氮素吸收利用效率、氮肥生产效率和收获指数均趋于降低。也有研究表明, 施氮 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 籽粒含氮量达最大, 氮肥生产效率却从施氮 $80 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的 $70.0 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降至 $27.7 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 降低幅度达 60%^[18]。本试验结果表明, W2 条件下, 施氮量 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 在 2015—2016 年获得 $8240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 籽粒产量, 虽低于产量最大值 (N3, $8899 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 但该处理在两年度的氮素吸收效率和氮肥生产效率均为最高, 相比 N3 分别提高了 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $12.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2014—2015 年籽粒产量及两年的产量构成因素均以 W2N2 处理较高, 从资源利用效率考虑, 以拔节后土壤相对含水量维持在 $70\%\pm 5\%$, 施氮量减少至 $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 较为适宜, 有利于实现小麦产量和氮素吸收利用的同步提高。

4 结论

本试验条件下, 水肥一体化对小麦植株营养器官氮素积累量、转移量和籽粒产量的影响存在互作效应。过量施氮增加了土壤中氮素的累积, 足量灌水可导致硝态氮向深层土壤(80—100 cm)的淋溶。河南省小麦生产中氮肥施用量一般在 270 kg·hm⁻² 以上, 施氮量减少 25%—30%, 即减至 195 kg·hm⁻² 时, 通过对 0—60 cm 的土壤墒情监控, 并及时补灌, 使拔节后土壤相对含水量维持在 70%±5%, 小麦开花期植株氮素积累量、花前氮素向籽粒中转移量及对籽粒的贡献率均明显增加, 氮素吸收效率和氮肥生产效率也显著提高, 因此, 减氮适墒处理是兼顾籽粒产量和氮肥的施用效率的最佳处理, 可在本地区推广应用。

References

- [1] FANG Q X, MA L, GREEN T R, YU Q, WANG T D, AHUJA L R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1102-1116.
- [2] 王月福, 于振文, 李尚霞, 余松烈. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及籽粒产量和蛋白质含量的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1868-1872.
WANG Y F, YU Z W, LI S X, YU S L. Effects of soil fertility and nitrogen application rate on nitrogen absorption and translocation, grain yield, and grain protein content of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1868-1872. (in Chinese)
- [3] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽, 朱云集, 郭天财. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响. *西北农业学报*, 2012, 21(1): 53-58.
QIU X Y, WANG C Y, WANG Y L, ZHU Y J, GUO T C. Effects of nitrogen application rate on root system distribution and grain yield of winter wheat cultivars. *Acta Agriculture Boreali-Occidentis Sinica*, 2012, 21(1): 53-58. (in Chinese)
- [4] 刘小明, 雍太文, 刘文钰, 苏本营, 宋春, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 减量施氮对玉米-大豆套作体系土壤氮素残留和氮肥损失的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2267-2274.
LIU X M, YONG T W, LIU W Y, SONG B Y, SONG C, YANG F, WANG X C, YANG W Y. Effect of reduced N application on soil N residue and N loss in maize-soybean relay strip intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2267-2274. (in Chinese)
- [5] SUI J, WANG J D, GONG S H, XU D, ZHANG Y Q. Effect of nitrogen and irrigation application on water movement and nitrogen transport for a wheat crop under drip irrigation in the North China Plain. *Water*, 2015, 7(11): 6651-6672.
- [6] PASK A J D, SYLVESTER-BRADLEY R, JAMIESON P D, FOULKES M J. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. *Field Crops Research*, 2012, 126: 104-118.
- [7] 李世娟, 周殿玺, 诸叶平, 李建民, 兰林旺. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响. *华北农学报*, 2002, 17(1): 69-75.
LI S J, ZHOU D X, ZHU Y P, LI J M, LAN L W. Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(1): 69-75. (in Chinese)
- [8] XU Z Z, YU Z W, WANG D, ZHANG Y L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. *Agronomy and Crop Science*, 2005, 191(6): 439-449.
- [9] 段文学, 于振文, 张永丽, 王东, 石玉. 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. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3040-3048
DUAN W X, YU Z W, ZHANG Y L, WANG D, SHI Y. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3040-3048. (in Chinese)
- [10] 同延安, 赵营, 赵护兵, 樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 64-69.
TONG Y A, ZHAO Y, ZHAO H B, FAN H Z. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 64-69. (in Chinese)
- [11] 赵俊晔, 于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响. *作物学报*, 2006, 32(4): 484-490.
ZHAO J Y, YU Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 484-490. (in Chinese)
- [12] 蒿宝珍, 姜丽娜, 方保停, 张英华, 张菡, 李春喜, 王志敏. 限水灌溉冬小麦冠层氮分布与转运特征及其对供氮的响应. *生态学报*, 2011, 31(17): 4945-4951.
HAO B Z, JIANG L N, FANG B T, ZHANG Y H, ZHANG H, LI C X, WANG Z M. Effect of different nitrogen supply on the temporal and spatial distribution and remobilization of canopy nitrogen in winter wheat under limited irrigation condition. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,

- 31(17): 4945-4951. (in Chinese)
- [13] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3015-3024.
- WANG X Y, YU Z W. Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3015-3024. (in Chinese)
- [14] 郭天财, 宋晓, 冯伟, 马冬云, 谢迎新, 王永华. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量. *作物学报*, 2008, 34(5): 886-892.
- GUO T C, SONG X, FENG W, MA D Y, XIE Y X, WANG Y H. Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 886-892. (in Chinese)
- [15] 郑成岩, 于振文, 王西芝, 武同华. 灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1324-1332.
- ZHENG C Y, YU Z W, WANG X Z, WU T H. Effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO₃-N content in high-yield wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1324-1332. (in Chinese)
- [16] 马兴华, 王东, 于振文, 王西芝, 许振柱. 不同施氮量下灌水量对小麦耗水特性和氮素分配的影响. *生态学报*, 2010, 30(8): 1955-1965.
- MA X H, WANG D, YU Z W, WANG X Z, XU Z Z. Effect of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen distribution in wheat at different nitrogen applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 1955-1965. (in Chinese)
- [17] 戴健, 王朝辉, 李强, 李孟华, 李富翠. 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. *土壤学报*, 2013, 50(5): 956-965.
- DAI J, WANG Z H, LI Q, LI M H, LI F C. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 956-965. (in Chinese)
- [18] PRZULJ N, MOMCILOVIC V. Genetic variation for dry matter and nitrogen assimilation and translocation in two-rowed spring barley II. nitrogen translocation. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15(4): 255-265.
- [19] KOUTROUBAS S D, FOTIADIS S, DAMALAS C A. Biomass and nitrogen accumulation and translocation in spelt (*Triticum spelta*) grown in a Mediterranean area. *Field Crops Research*, 2012, 127(1): 1-8.
- [20] 蒋会利, 温晓霞, 廖允成. 施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 237-241.
- JIANG H L, WEN X X, LIAO Y C. Effects of nitrogen application on winter wheat yield and translation of soil NO₃-N. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 237-241. (in Chinese)
- [21] WANG Q, LI F R, ZHAO L, ZHANG E H, SHI S L, ZHAO W Z, SONG W X, VANCE M M. Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2): 325-339.
- [22] LENKA S, SINGH A K, LENKA N K. Soil water and nitrogen interaction effect on residual soil nitrate and crop nitrogen recovery under maize-wheat cropping system in the semi-arid region of northern India. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 179(5): 108-115.
- [23] GHOLAMHOSEINI M, AGHAALIKHANI M, SANAVY S A M M, MIRLATIFI S M. Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching. *Agricultural Water Management*, 2013, 126: 9-18.
- [24] MASONI A, ERCOLI L, MARIOTTI M, ARDUINI I. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 179-186.
- [25] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收, 分配, 利用及产量与品质的影响. *作物学报*, 2008, 34(5): 870-878.
- ZHANG Y L, YU Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 870-878. (in Chinese)
- [26] 马新明, 李琳, 赵鹏, 熊淑萍, 郭飞. 土壤水分对强筋小麦‘豫麦34’氮素同化酶活性和籽粒品质的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 48-53.
- MA X M, LI L, ZHAO P, XIONG S P, GUO F. Effect of water control on activities of nitrogen assimilation enzymes and grain quality in winter wheat. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2005, 29(1): 48-53. (in Chinese)
- [27] 赵广才, 何中虎, 刘利华, 杨玉双, 张艳, 李振华, 张文彪. 肥水调控对强筋小麦中优 9507 品质与产量协同提高的研究. *中国农业科学*, 2004, 37(3): 351-356.
- ZHAO G C, HE Z H, LIU L H, YANG Y S, ZHANG Y, LI Z H, ZHANG W B. Study on the co-enhancing regulating effect of

- fertilization and watering on the main quality and yield in Zhongyou 9507 high gluten wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(3): 351-356. (in Chinese)
- [28] 王美, 赵广才, 石书兵, 常旭虹, 王德梅, 杨玉双, 郭明明, 亓振, 王雨, 刘孝成. 施氮及花后土壤相对含水量对黑粒小麦灌浆期氮素吸收转运及分配的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(7): 864-873.
- WANG M, ZHAO G C, SHI S B, CHANG X H, WANG D M, YANG Y S, GUO M M, QI Z, WANG Y, LIU X C. Effect of nitrogen fertilization and soil relative water content after anthesis on nitrogen absorption and translocation of black wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7): 864-873. (in Chinese)
- [29] 熊淑萍, 吴延鹏, 王小纯, 马新明, 杜盼, 吴懿鑫. 减氮处理对不同小麦品种干物质积累及氮素转运特性的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35(8): 1134-1140.
- XIONG S P, WU Y P, WANG X C, MA X M, DU P, WU Y X. Effect of lower nitrogen application on dry matter accumulation and nitrogen translocation of different wheat varieties. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8): 1134-1140. (in Chinese)
- [30] 张洪程, 许轲, 戴其根, 霍中洋, 董明辉. 超高产小麦吸氮特性与氮肥运筹的初步研究. *作物学报*, 1998, 24(6):935-940.
- ZHANG H C, XU K, DAI Q G, HUO Z Y, DONG M H. Preliminary study on the traits of nitrogen absorption and nitrogen fertilizer applying in super-high-yielding winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6): 935-940. (in Chinese)
- [31] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(8):1339-1343.
- WANG Z H, WANG B, LI S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339-1343. (in Chinese)
- [32] VAN-SANFORD D A, MACKOWN C T. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Science*, 1987, 27(2): 295-300.

(责任编辑 杨鑫浩)

欢迎订阅 2018 年《林产化学与工业》

《林产化学与工业》(双月刊, 1981 年创刊), 由中国林业科学研究院林产化学工业研究所、中国林学会林产化学化工分会共同主办, 为全国林产化工行业的学术类期刊。报道范围是可再生的木质和非木质生物质资源的化学加工与利用, 研究领域为生物质能源、生物质化学品、生物质新材料、生物质天然活性成分和制浆造纸等, 主要包括松脂化学、生物质能源化学、生物质炭材料、生物基功能高分子材料、胶黏剂化学、森林植物资源提取物化学利用、环境保护工程、木材制浆造纸为主的林纸一体化和林产化学工程设备研究设计等方面的最新研究成果。

本刊现被美国《化学文摘》(CA 核心)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国“乌利希国际期刊指南”、英国《英联邦农业和生物科学文摘》(CAB Abstracts)、英国《全球健康》、英国《皇家化学学会系列文摘》(RSC)、俄罗斯《文摘杂志》(PK) 等国外数据库收录; 被“中国科学引文数据库 (CSCD)” 核心库、“中文核心期刊”、“中国科技核心期刊”、“RCCSE 中国核心学术期刊 (A)”、“中国农业核心期刊”、“中国期刊全文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“万方数据——数字化期刊群”、“中文科技期刊数据库”、“中国核心期刊 (遴选) 数据库”、“中国学术期刊文摘”等国内 10 多种大型刊库收录。

本刊为双月刊, 刊号: ISSN 0253-2417, CN 32-1149/S, 逢双月月末出版, 大 16 开, 定价: 国内 ¥15.00 元/期, 全年 90.00 元; 国外 \$15.00 美元/期, 全年 \$90.00 美元。国内外公开发行, 国内邮发代号: 28-59; 国外发行代号: Q5941。地址: 210042 江苏省南京市锁金五村 16 号 林化所内; 电话: (025) 85482493; 传真: (025) 85482493; E-mail: cifp@vip.163.com; 网址: <http://www.cifp.ac.cn>。