

不同产量水平下稻茬小麦的氮素营养指标特征

杜宇笑, 李鑫格, 张羽, 程涛, 刘小军, 田永超, 朱艳, 曹卫星, 曹强*

(南京农业大学国家信息农业工程技术中心/农业农村部农作物系统分析与决策重点实验室/
智慧农业教育部工程研究中心/江苏省信息农业重点实验室, 江苏南京 210095)

摘要:【目的】明确长江中下游地区不同产量水平稻茬小麦氮营养指标变化规律, 为小麦氮素营养状况实时诊断提供理论依据。【方法】本研究通过江苏省多年多点田间不同氮肥、播期、密度和品种试验, 构建不同产量水平小麦大数据, 分析不同产量水平小麦在不同生育时期的干物质积累量、植株氮积累量和植株氮浓度的变化规律, 并通过计算小麦临界氮浓度, 得到累积氮亏缺和氮营养指数的动态变化规律, 进而明确高产稻茬小麦氮素营养指标特征。【结果】干物质积累量和植株氮积累量的变化趋势一致, 随着小麦生育进程的推进均逐渐增加, 植株氮浓度逐渐减小, 累积氮亏缺和氮营养指数会出现波动。整个生育期内, 干物质积累量和植株氮积累量在高产小麦和中产小麦之间的差异不显著, 但二者植株氮积累量均显著高于中低产小麦, 中低产小麦又显著高于低产小麦。在抽穗期、开花期和灌浆期, 高产和中产小麦干物质积累量显著高于中低产小麦, 中低产小麦又显著高于低产小麦。依据累积氮亏缺值判断氮素营养状况, 高产和中产小麦的累积氮亏缺变化趋势一致, 在起身—孕穗期, 高产小麦的累积氮亏缺值由 0.3 kg/hm² 降低为 -23.0 kg/hm², 中产小麦由 7.0 kg/hm² 降低为 -14.6 kg/hm², 孕穗—抽穗期又呈升高趋势, 高产小麦由 -23.0 kg/hm² 升高为 -11.4 kg/hm², 中产小麦由 -14.6 kg/hm² 升高为 2.4 kg/hm², 开花—灌浆期的波动较小。表明高产小麦氮营养除起身期之外均为过剩, 中产小麦在拔节—孕穗期的累积氮亏缺小于 0, 其余时期累积氮亏缺均大于 0, 但该水平的累积氮亏缺值一直在适宜范围内波动。中低产小麦在起身—拔节期, 累积氮亏缺值由 14.2 kg/hm² 降低为 9.5 kg/hm², 之后逐渐升高, 灌浆期达到最大为 43.9 kg/hm²; 低产小麦在起身期到灌浆期, 累积氮亏缺值由 17.3 kg/hm² 升高为 71.1 kg/hm²。表明中低产和低产的小麦氮营养水平在整个生育期内逐渐降低, 且整个生育期均处于亏缺状态(累积氮亏缺值 > 0)。在拔节期、孕穗期、抽穗期和灌浆期, 高产水平的小麦植株实际氮浓度高于植株临界氮浓度, 中产小麦在孕穗期的植株实际氮浓度高于临界氮浓度, 而中低产和低产的小麦在整个生育期植株实际氮浓度低于植株临界氮浓度。高产和中产的小麦氮营养指数在 1 附近波动, 其中高产小麦的氮营养指数在起身—孕穗期由 0.9 升高为 1.1, 在抽穗—灌浆期, 氮营养指数呈现先降低后升高趋势, 其值分别为 1.0、0.9 和 1.0, 中产小麦与高产小麦的变化趋势一致, 起身—孕穗期的氮营养指数由 0.8 升高为 1.0, 之后逐渐下降, 其值均小于 1, 抽穗—灌浆期分别为 0.9、0.9 和 0.9。中低产和低产的小麦氮营养指数始终低于 1, 中低产小麦在起身—拔节期氮营养指数由 0.7 升高为 0.8, 之后则逐渐下降, 低产小麦从起身—开花期均逐渐下降, 而这两个产量水平的氮营养指数在灌浆期会呈现略微上升趋势。【结论】随着产量水平的提高, 小麦植株干物质和氮积累量、植株氮浓度、氮营养指数等都相应增加, 累积氮亏缺相应下降。较高的干物质积累量和植株氮积累量是提高小麦产量的主要原因, 在小麦生长过程中氮营养指数和累积氮亏缺均能准确诊断小麦氮营养状况, 可为小麦氮肥精准管理提供理论支持。

关键词: 小麦; 产量水平; 氮素营养; 临界氮浓度; 氮营养指数; 累积氮亏缺

Variation in nitrogen status indicators with grain yield level for winter wheat after rice

DU Yu-xiao, LI Xin-ge, ZHANG Yu, CHENG Tao, LIU Xiao-jun, TIAN Yong-chao,
ZHU Yan, CAO Wei-xing, CAO Qiang*

收稿日期: 2019-12-13 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601222); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(KJQN201725); 江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS〔2019〕433, JATS〔2019〕141)。

联系方式: 杜宇笑 E-mail: 2018801186@njau.edu.cn; * 通信作者 曹强 E-mail: qiangcao@njau.edu.cn

(National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory for Crop System Analysis and Decision Making, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Engineering Research Center of Smart Agriculture, Ministry of Education/Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing 210095)

Abstract: [Objectives] To identify the variation in N status indicators with different yield levels for winter wheat after rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and provide a theoretical basis for the real-time diagnosis of N status in field. **[Methods]** In this study, the big data of wheat with different yield levels were collected based on the field experiments of different N rates, sowing dates, densities and varieties in Jiangsu Province during past years. The dynamic changes of dry matter accumulation (DMA), plant N accumulation (PNA), and plant N concentration (PNC) of wheat with different yield levels at different growth stages were analyzed. The plant critical N concentration, the accumulated N deficit (N_{and}) and N nutrition index (NNI) were calculated, and then the characteristics of N status indicators of high-yield wheat were clarified. **[Results]** With the development of wheat growth, the trends of DMA and PNA were consistent, which showed gradually increasing trends. The PNC decreased gradually while the N_{and} and NNI were fluctuated. During the whole growth stages, there was no significant difference in DMA and PNA between high and middle yield wheat. The high yield and middle yield wheat had significantly higher PNA than the low-middle yield wheat, and the low-middle yield wheat had significantly higher PNA than the low yield wheat. The high yield and middle yield wheat had significantly higher DMA than the low-middle yield wheat, while the low-middle yield wheat had significantly higher DMA than the low yield wheat. Judging the N nutrition status based on the N_{and} , the N_{and} trend of high and middle yield wheat was consistent. During the rising stage, the N_{and} of high yield wheat decreased from 0.3 kg/hm² to -23.0 kg/hm², and the middle yield wheat decreased from 7.0 kg/hm² to -14.6 kg/hm², and the booting-heading stage showed a increase trend again, the high yield wheat increased from -23.0 kg/hm² to -11.4 kg/hm², and the middle yield wheat increased from -14.6 kg/hm² to 2.4 kg/hm², and the fluctuation was small during the flowering-filling stage. It was showed that the N nutrition of high yield wheat was surplus except the rising stage, and the N nutrition of middle yield wheat at the jointing-booting stage was less than 0, which was greater than 0 at the rest stages, but the N_{and} of this yield level wheat had always been within the appropriate range fluctuation. During the rising-jointing stage, the N_{and} of low-middle yield level wheat decreased from 14.2 kg/hm² to 9.5 kg/hm², and then gradually increased, and the highest value was 43.9 kg/hm² in filling stage. The N_{and} of low yield level wheat increased from 17.3 kg/hm² to 71.1 kg/hm² in the rising-filling stage. It showed that the nitrogen nutrition of low-middle and low yield level wheat gradually decreased and it was in a deficit state throughout the whole growth stage ($N_{\text{and}} > 0$). In the jointing, booting, heading and filling stages, the actual PNC of high yield level wheat was higher than the critical PNC, and the actual PNC of middle yield at the booting stage was higher than the critical PNC, while the actual PNC of low-middle and low yield levels wheat was lower than the critical PNC throughout the whole growth stage. The NNI of high yield and middle yield wheat fluctuated around 1. Among them, the NNI of high yield increased from 0.9 to 1.1 during the rising-booting stage. In heading-filling stage, the NNI decreased first and then increased, and the values were 1.0, 0.9 and 1.0, respectively. The change trend of the middle yield and high yield wheat was consistent. The NNI at the rising-booting stage increased from 0.8 to 1.0, and then gradually decreased. The values were both less than 1, and in the heading-filling stage were 0.9, 0.9 and 0.9, respectively. The NNI of low-middle and low yield wheat was always lower than 1, and among them, the NNI of low-middle yield wheat was increased from 0.7 to 0.8 during the rising-jointing stage, and then gradually decreased. The NNI of low yield wheat was gradually decreased from the rising-flowering stage, and the NNI of the two yield level wheat showed a slight upward trend during the filling stage. **[Conclusions]** With the increase of yield level, DMA, PNA, PNC, NNI increase correspondingly, while the N_{and} decreases. Higher DMA and PNA are the main reasons for the increase of wheat yield. In the process of wheat growth, both NNI and N_{and}

can be used for diagnosing N status accurately, which can provide theoretical support for precision N management in fields.

Key words: wheat; yield level; nitrogen nutrition; critical nitrogen concentration; nitrogen nutrition index; accumulated nitrogen deficiency

小麦是我国重要的粮食作物之一, 提高小麦产量对保证我国粮食安全具有重要意义^[1-2]。氮素是小麦生长所必需的大量营养元素, 对小麦产量及品质的形成有重要作用^[3]。然而, 我国小麦农田氮肥施用现状并不合理, 大量氮肥施用到田间却不能被作物完全吸收利用, 造成了氮肥资源的浪费, 并引起了一系列环境问题^[4]。前人研究表明, 不同生育时期小麦对养分的需求具有阶段性, 不同生育时期追施氮肥对小麦产量有不同程度的影响, 拔节期追施氮肥对小麦的增产效果显著高于返青期和孕穗期^[5], 但 Ravier 等^[6]认为小麦早期缺氮有利于提高小麦产量和品质, 因此确定小麦氮肥施用时期和施用量对保证产量品质具有重要意义。前人对小麦的干物质积累量、氮积累量、氮浓度和氮营养指数的研究较多, 增加施氮量能显著提高干物质积累量和氮积累量, 进而提高产量^[7-8], 并且不同管理措施也会引起氮浓度、氮亏缺等氮营养指标的变化, 进而影响小麦氮营养状况^[9-10]。因此通过对不同生育时期氮营养指标的研究可以诊断不同生育时期的氮营养状况, 对确定小麦施肥时期及施肥量有重要作用。前人针对如何快速、准确诊断田间氮素状况进行了大量研究, 临界氮浓度最早是由 Greenwood 等^[11]提出, 是指达到最大地上部生物量所需的最小氮浓度, 临界氮浓度稀释曲线是指植株氮浓度与地上部干物质积累量之间的关系, 即 $N_c = a \times DM^{-b}$ (a 、 b 均为此方程参数), 在此基础上 Lemaire 等^[12]提出了氮营养指数的概念, 定义为实际氮浓度与临界氮浓度的比值, 氮亏缺指临界氮积累量与实际氮积累量之差。多数研究表明这两个指标能较好的诊断出田间氮素状况, 有利于解决田间氮肥管理问题^[9-13]。

前人对不同施氮水平下小麦氮素营养状况及群体指标变化规律的研究较多, 但对于不同产量水平小麦的氮营养指标变化及差异研究较少, 通过对不同产量水平的氮素营养指标的分析, 可以得出小麦在特定时期的氮素营养状况, 为田间氮肥管理提供理论依据。本研究综合了 2010—2019 年江苏省多个试验点的试验数据, 将其分为 4 个产量水平, 探究不同产量水平小麦生长指标变化特征, 明确氮素营

养诊断指标的差异及变化规律, 为高产小麦进行氮肥施用时期的精确管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据均为本团队于 2010—2019 年在江苏省不同地点开展的小麦田间试验, 共有 265 个数据。所收集的大数据包括氮水平试验、密度试验和品种试验, 其中氮肥基追比为 5 : 5, 追肥时期为拔节期, 钾肥和磷肥作为基肥在播种前全部施用, 其余栽培管理同一般高产田。表 1 为所用数据试验的年份、地点、品种、试验处理和产量范围; 表 2 为各试验点的土壤性质及降雨量数据。

1.2 样品处理与指标分析

小麦植株干物质积累量: 在小麦起身期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期进行破坏性取样, 在每小区取代表性小麦 20 株, 去除根, 将茎、叶、穗器官分开装袋, 于 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘至恒重后称重, 计算出单位土地面积的地上部干物质积累量。

植株氮浓度: 用万分之一天平称取磨碎后的小麦样品 0.1500 g, 经消煮后, 采用凯氏定氮法测定小麦茎、叶、穗的氮素含量。

小麦临界氮浓度根据赵犇等^[13]提出的公式计算:

$$N_c = 4.33 \times DM^{-0.45}$$

式中: N_c 代表临界氮浓度; DM 代表地上部干重。当 $DM > 1.5 \text{ t/hm}^2$ 时, 临界氮浓度稀释曲线可以很好地指示氮素营养; $DM < 1.5 \text{ t/hm}^2$ 时, 临界氮浓度为定值, 即 $N_c = 4.33\%$ 。

氮亏缺值根据 Ata-Ul-Karim 等^[10]提出的公式计算:

$$AND = N_{cna} - N_{na}$$

式中: N_{cna} 指临界氮浓度条件下的氮积累量; N_{na} 指实际氮积累量。若 $AND = 0$, 表明植株氮营养处于最佳状态; $AND > 0$ 代表氮营养供应不足, $AND < 0$ 代表氮营养供应过量。

氮营养指数根据 Lemaire 等^[12]提出的公式计算:

表 1 数据来源
Table 1 Date sources

地点 Location	试验年份 Experimental year	品种 Cultivar	播期 Sowing date (month/day)	养分施用量 Nutrient application rate (kg/hm ²)			密度 Density (× 10 ⁴ /hm ²)	小区面积 Plot area (m ²)	重复 Repetition	产量范围 Yield rang (t/hm ²)
				N	P	K				
仪征市 Yizheng	2010—2011	扬麦 16 Yangmai16	10/15、10/25、 11/14、11/24	225	120	135	135、180、 270、315	24	2	5.1~8.3
仪征市 Yizheng	2010—2011	扬麦 16 Yangmai16	10/15、10/25、 11/4、11/14、 11/24	225	120	135	210	24	3	6.7~8.3
如皋市 Rugao	2012—2013	宁麦 13、徐麦 30 Ningmai13, Xumai30	10/28	0、75、150、 225、300	115	135	225	30	3	2.9~9.1
如皋市 Rugao	2013—2014	宁麦 13、徐麦 30 Ningmai13, Xumai30	10/26	0、90、180、 225、300	120	120	225	30	3	3.2~9.1
淮安市 Huai'an	2014—2015	宁麦 13、扬辐 麦 4、淮麦 20 Ningmai13, Yangfumai4, Huaimai20	10/27	0、120、225、 300	105	135	225	30	3	2.7~7.7
泗洪县 Sihong	2015—2016	徐麦 30、淮麦 20 Xumai30, Huaimai20	10/23	0、90、180、 270、360	105	135	225	42	3	3.0~8.9
泗洪县 Sihong	2016—2017	徐麦 30、淮麦 20 Xumai30, Huaimai20	11/17	0、90、180、 270、360	105	135	225	40	3	1.9~9.3
兴化市 Xinghua	2018—2019	镇麦 12、宁 麦 13、扬麦 23 Zhenmai12, Ningmai13, Yangmai23	11/1	0、90、180、 270、360	105	120	225	18	3	2.8~7.4
兴化市 Xinghua	2018—2019	扬麦 23 Yangmai23	11/4、11/24	0、180、240、 300	105	120	180、270、 360	30	3	2.9~8.5

表 2 试验年份小麦生育期降雨量和土壤基础化学性质

Table 2 Rainfall during wheat growth stage and chemical properties of soil from 2010 to 2019

地点 Location	试验年份 Experimental year	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	有机质 Organic matter (g/kg)	降水量 Rainfall (mm)
仪征市 Yizheng	2010—2011	1.27	112.48	45.63	89.39	20.50	786.30
如皋市 Rugao	2012—2013	1.87	150.41	57.84	96.32	24.60	1291.20
如皋市 Rugao	2013—2014	2.49	170.48	52.63	93.48	30.50	1203.80
淮安市 Huai'an	2014—2015	2.07	158.62	56.45	94.66	26.80	718.10
泗洪县 Sihong	2015—2016	2.07	159.45	52.54	93.66	26.50	1051.50
泗洪县 Sihong	2016—2017	2.07	120.14	52.45	93.66	26.50	1471.00
兴化市 Xinghua	2018—2019	1.37	102.86	28.89	120.59	18.68	1795.40

$$NNI = N_a/N_c$$

式中: N_a 为实际氮浓度, 若 $NNI = 1$, 代表氮营养处

于最佳状态; $NNI < 1$, 表明氮营养供应不足; $NNI > 1$, 表明氮营养供应充足。

籽粒产量：成熟期每个小区收获 1 m² 测产，自然风干后脱粒称重并按标准含水量 (13%) 换算。

1.3 数据处理

本研究的样本数据分为 4 个产量水平：低产水平 < 4.5 t/hm²，中低产水平 4.5~6.0 t/hm²，中产水平 6.0~7.5 t/hm²，高产水平 > 7.5 t/hm²。用 Origin 2018 进行数据分析和作图，用 IBM SPSS Statistic 25 统计软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 数据分布

本研究中，分析 8 个试验的 256 个数据发现，冬小麦的产量变化范围为 1.9~9.3 t/hm²，平均 6.3 t/hm² (表 3)。该平均产量比我国冬小麦 2017 年的平均产量 5.5 t/hm² 高 15.0%，比世界小麦 2017 年的平均产量 3.5 t/hm² 高 78.4%^[4]。

2.2 不同产量水平小麦干物质积累量变化特征

整个生育期内，4 个产量水平的小麦干物质积累量随着生育进程的变化趋势见图 1。随着产量水平的升高，小麦干物质积累量增幅加大。通过方差分析可知，在整个生育期内高产和中产的小麦干物质积累量无显著差异；与中低产和低产小麦的差异主要集中在生长后期 (抽穗期、开花期和灌浆期)。高产、中产、中低产和低产在灌浆期的干物质积累量分别为 14.6、13.6、11.4 和 9.0 t/hm²，随着生育进程的推进，各产量水平的干物质积累量的差值逐渐增大，表明在生长后期小麦有较强的干物质积累能力，这也决定着小麦的产量。

2.3 不同产量水平小麦植株氮积累量

随着生育进程的推进，小麦植株氮积累量逐渐升高 (图 2)。各生育期高产和中产的小麦植株氮积累

量间无显著差异，但均显著高于中低产和低产的小麦植株氮积累量 ($P < 5\%$)。拔节期之前氮积累量的增幅最大，在生长中期增长幅度趋于平缓，开花期之后又有明显增长。在播种—拔节期和拔节—开花期的植株氮积累中，中产和高产小麦之间无显著差异，但均高于低产和中低产小麦，而在开花—灌浆期氮素积累量 4 个产量水平小麦间无显著差异。表明 4 个产量水平的小麦均在播种—拔节期阶段植株氮积累增量最大，而阶段积累量差异主要表现在拔节—开花期，此时，中产和高产小麦的氮素积累量显著高于中低产小麦，而中低产小麦又显著高于低产小麦。

2.4 不同产量水平小麦氮素亏缺变化特征

随着小麦产量水平的升高，累积氮亏缺值逐渐降低，并且随着生育进程的推进，4 个产量水平的小麦累积氮亏缺差异逐渐明显 (图 3)。对于中产和高产小麦，累积氮亏缺在生育进程中会出现负值，根据方差分析可知，在起身期低产和中低产的小麦累积氮亏缺差异不显著，但均显著高于高产和中产小麦；拔节期和孕穗期低产小麦显著高于中低产小麦的累积氮亏缺，中产和高产小麦之间差异不明显，从抽穗期开始，4 个产量水平小麦间的差异逐渐增大，且相互间差异明显。低产、中低产和中产的小麦累积氮亏缺在灌浆期达到最大，分别为 71.1、43.9、8.8 kg/hm²；高产小麦在起身期达最大为 0.3 kg/hm²。并且除低产水平小麦外，另 3 个产量水平的小麦累积氮亏缺都有显著波动，中低产水平小麦在拔节期的累积氮亏缺最低为 9.5 kg/hm²，中产和高产小麦的最低累积氮亏缺均在孕穗期，分别为 -14.6、-23.0 kg/hm²，之后累积氮亏缺逐渐上升。

2.5 不同产量水平小麦植株实际氮浓度与临界氮浓度

不同产量水平的小麦植株氮浓度与干物质积累量的关系均呈幂函数曲线关系，并且随着产量水平

表 3 不同产量水平小麦样本统计性描述

Table 3 Statistical description of winter wheat with different yield levels

产量范围 Yield range (t/hm ²)	样本数 Sample size	产量 Yield (t/hm ²)						
		平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	25% 分位 25% Quarter	中间值 Median	75% 分位 75% Quarter	最大值 Max.
< 4.5	43	3.4	0.6	1.9	2.9	3.5	3.9	4.5
4.5~6.0	52	5.3	0.4	4.5	4.9	5.3	5.7	6.0
6.0~7.5	96	6.8	0.4	6.0	6.5	6.8	7.2	7.5
> 7.5	74	8.1	0.5	7.5	7.7	8.0	8.5	9.3
总计 Total	265	6.3	1.7	1.9	5.2	6.7	7.6	9.3

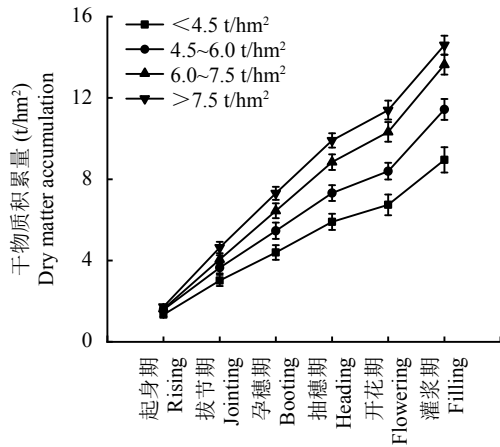


图 1 不同产量水平冬小麦的干物质积累量的动态变化变化
Fig. 1 Changes of dry matter accumulation of winter wheat with different yield levels

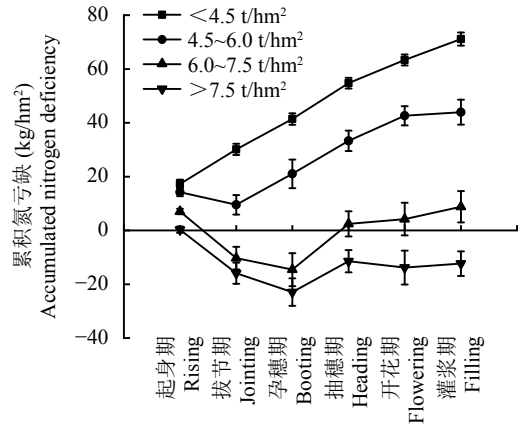


图 3 不同产量水平冬小麦累积氮亏缺变化趋势
Fig. 3 Variation trend of accumulated nitrogen deficiency of winter wheat with different yield levels

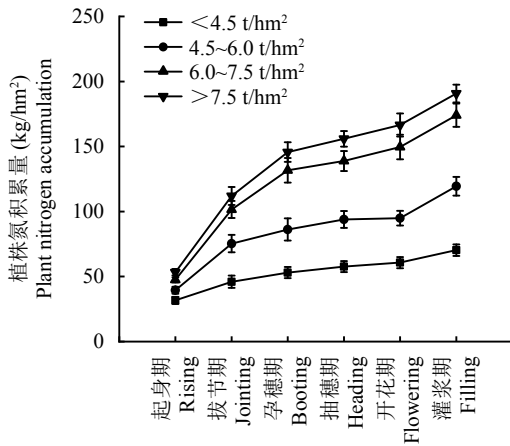


图 2 不同产量水平小麦植株氮积累量
Fig. 2 Nitrogen accumulation of winter wheat with different yield levels

的提高, 小麦植株氮浓度逐渐提高, 但随着生育进程的推进, 植株氮浓度逐渐降低。低产、中低产和中产的小麦植株实际氮浓度始终低于临界氮浓度, 且随着产量的升高差距逐渐减小, 高产小麦的植株实际氮浓度在生长过程中会高于植株临界氮浓度 (图 4-A)。起身期至抽穗期的植株氮浓度下降较快, 抽穗期至灌浆期的植株氮浓度下降较为缓慢, 这主要与植株干物质积累量的增加有关。通过方差分析可知, 高产和中产的小麦植株氮浓度之间无显著差异, 除起身期外, 中低产的小麦植株氮浓度均显著高于低产小麦。

2.6 不同产量水平小麦氮素营养指数变化

随着产量水平的升高小麦氮营养指数逐渐升高, 并且在整个生育期内氮营养指数会有波动 (图 5)。

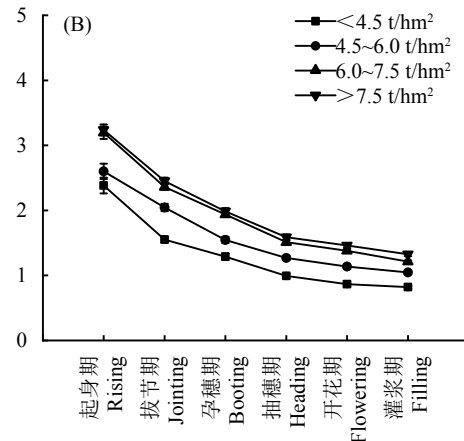
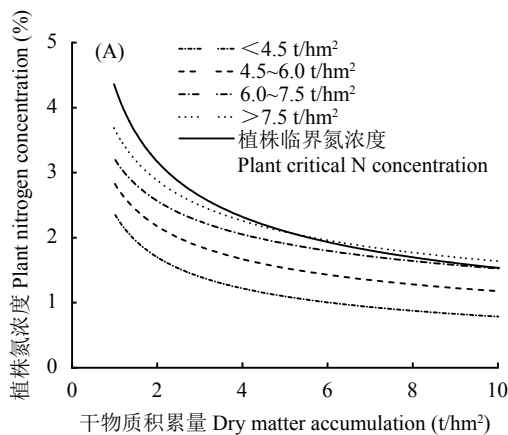


图 4 不同产量水平冬小麦植株临界氮浓度与实际氮浓度的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of plant critical nitrogen concentration and actual nitrogen concentration of winter wheat with different yield levels

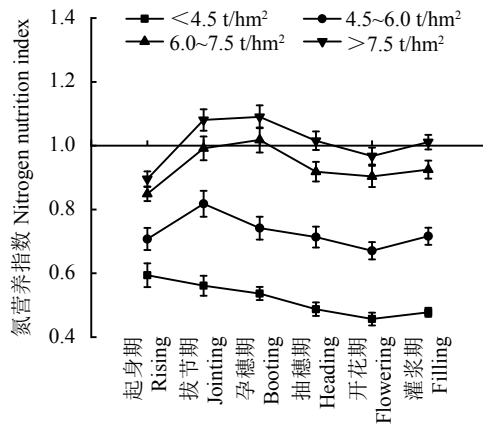


图5 不同产量水平小麦氮营养指数的动态变化

Fig. 5 Change trend of nitrogen nutrient index of winter wheat with different yield levels

高产水平小麦起身期至灌浆期 NNI 平均值为 0.9、1.1、1.1、1.0、0.9、1.0，也就说明在拔节期、孕穗期、抽穗期和灌浆期，高产量水平小麦的氮营养充足甚至过剩，中产水平小麦起身期至灌浆期氮营养指数平均值分别为 0.8、1.0、1.0、0.9、0.9、0.9，表明氮营养状况整体较好；中低产水平小麦起身期至灌浆期氮营养指数平均值小于 1，分别为 0.7、0.8、0.7、0.7、0.7、0.7，表明氮营养供应较差；低产水平小麦的氮营养指数在起身期至灌浆期的平均值分别为 0.6、0.6、0.5、0.5、0.4、0.5，表明氮营养状况极差。通过方差分析可知，在起身期、拔节期、孕穗期和开花期，高产和中产小麦间无显著差异，均显著高于低产和中低产小麦的氮营养指数；在抽穗期和灌浆期，4 个产量水平小麦的氮营养指数间均存在显著差异。

3 讨论

3.1 不同产量水平小麦干物质积累量和植株氮积累量的差异分析

小麦干物质积累是产量形成的基础，在小麦生长进程中随着产量的提高，干物质积累量也会相应增加^[15]，在拔节—开花期干物质积累量与产量呈显著正相关^[16-17]，周玲等^[18]认为增加小麦干物质积累量是提高其产量的重要途径，干物质积累量受小麦品种类型的影响较大，并且较高的干物质积累量会增加无效分蘖的生长，使得小麦在生长前期消耗较多营养，降低营养器官向籽粒的转运量，进而影响小麦产量^[8, 17]。拔节—开花期是小麦籽粒形成的关键时期，此时的干物质积累量为后期小麦产量的形成奠定基础，而花后是籽粒灌浆的关键时期，该阶段较

高的干物质积累量能保证小麦正常的灌浆能力^[17]。本研究中，在整个生育期内，4 个产量水平的小麦干物质积累量逐渐增加，干物质积累量的大小始终为高产水平 > 中产水平 > 中低产水平 > 低产水平小麦，这与周玲等^[18]的研究结果相同。4 个产量水平的小麦干物质积累差异主要从拔节期开始，在开花期干物质积累差异达到最大，这也表明拔节—开花期的干物质积累差异是影响小麦产量水平的重要时期。

许多研究表明，小麦干物质积累和植株氮积累是同步进行的^[19-20]，不同产量水平小麦各生育时期的植株氮积累量也存在差异，拔节期是小麦快速生长期，此时需要的养分较多，该阶段的植株氮积累量与产量呈二次函数关系，且相关性较好，是小麦养分吸收重要时期^[21-22]。朱新开等^[23]通过研究不同类型小麦氮积累认为提高拔节—开花期的植株氮积累量有利于提高小麦产量；凌启鸿^[24]认为，高产小麦群体的植株氮积累量在花前高于低产小麦群体，且花后阶段的占比也有显著提高；阳显斌等^[25]认为，高产小麦在拔节期以后仍然具有较高的氮素吸收能力，并且生长后期增加氮素吸收量利于进一步提高产量。本研究中不同产量水平间，小麦植株氮积累量的差异远大于干物质积累量，并且从起身期开始就有显著差异，之后差异逐渐增大，表明在生长早期小麦的植株氮积累量对产量有较大影响。4 个产量水平小麦在播种—拔节期的植株氮积累量最大，在拔节—开花期的植株氮积累量差异最大，这也表明在小麦生长过程中，拔节—开花期是植株氮素积累的关键生长阶段，该结论与李瑞珂等^[26]的研究相一致。

3.2 不同产量水平小麦氮营养指标差异分析

翟丙年等^[27]通过研究氮肥对小麦生长发育与产量的亏缺效应，认为越冬期和拔节期的氮亏缺能显著降低小麦产量，但在抽穗期的氮肥供应能有效降低拔节期缺氮对产量产生的影响。本研究中除了低产水平小麦外，中低产、中产和高产小麦在拔节期的累积氮亏缺均出现下降趋势，高产和中产小麦在拔节期和孕穗期的氮亏缺为负值，表明此时氮营养供应充足，这与小麦施用拔节肥有关。而在孕穗期之后，中产水平小麦的累积氮亏缺量逐渐增大，此时若能增施氮肥则有助于中产小麦产量的增加。易媛等^[28]、安志超^[29]研究认为，氮亏缺会降低小麦植株氮浓度，而植株氮浓度的高低又反映了小麦氮营养状况，拔节—开花期较高的植株氮浓度有利于优化小麦群体状况，孕穗期、开花期的植株氮浓度与产量

呈显著正相关。在整个生育期内小麦植株氮浓度呈逐渐下降趋势, 其中越冬—拔节期是小麦植株氮浓度快速下降的阶段, 拔节—成熟期的小麦植株氮浓度下降速率逐渐变缓, 这主要与干物质积累量和植株氮积累量间的异速生长有关^[23, 29-33]。阳显斌等^[25]研究不同产量水平小麦在不同生育时期的植株氮浓度时发现, 高产小麦抽穗期与成熟期之间的植株氮浓度无显著差异, 表明高产小麦在拔节期之后还具有较高的氮素吸收能力。通过植株临界氮浓度与植株实际氮浓度的对比发现, 随着产量水平的提高小麦植株临界氮浓度与植株实际氮浓度的差异减小, 高产水平小麦植株实际氮浓度在生长后期高于植株临界氮浓度, 这也表明在高产小麦生长后期氮营养过剩。前人研究表明氮营养指数是诊断氮营养状况的较好指标^[12, 34], 李正鹏等^[9]、张娟娟等^[35]对不同施氮水平下小麦氮营养指数进行研究, 发现随着小麦生育进程的推进, 氮营养指数呈先升高后降低的波动状态, 不同处理间变化趋势一致, 并且氮营养指数随着施氮量的升高而升高。本研究中, 高产水平的小麦氮营养指数在整个生育期内均在 1 附近波动, 说明高产水平的氮素养分供应充足, 在起身期和开花期氮营养指数小于 1, 可以认为这两个时期增施氮肥能进一步提高高产小麦的产量; 中产小麦与高产小麦的差异较小, 适当增加氮营养供应有助于中产小麦达到高产水平。拔节期到开花期是小麦生长的需氮高峰期, 而中低产和低产水平小麦在此时的氮营养指数下降明显, 表明该时期应提高氮肥供应^[26, 36]; 开花—灌浆期的氮营养指数下降不明显, 主要是由于该阶段籽粒 70% 的氮素积累靠营养器官转运, 从外界吸收的氮素占 30%, 若此时增加氮营养供应则有助于提高小麦产量^[26]。以上结果表明, 累积氮亏缺、氮浓度和氮营养指数等均能诊断小麦植株氮营养状况, 指导小麦的田间管理。

3.3 不同产量水平小麦氮营养指标在指导施肥中的实际应用

赵犇等^[13]通过临界氮浓度稀释曲线构建了小麦氮营养指数模型和氮亏缺模型, 发现小麦地上部氮营养指数模型可以准确诊断氮素营养状况, 小麦地上部氮亏缺模型可以定量调控氮肥管理措施。随着研究深入, 不同研究者对不同作物(玉米、水稻、油菜等)的氮营养指数以及该诊断指标的其他用途进行了研究, 发现氮营养指数能准确诊断出氮素亏缺对油菜各生长指标的影响以及玉米全生育时期的氮素亏缺状况, 并能准确预测水稻和小麦不同生育期的氮

素需求量, 有效指导田间施肥^[37-40], 有研究认为氮营养指数与品质间有较好的线性关系, 并能预测出不同氮肥条件下小麦产量构成^[41-42]。王晓玲^[33]认为, 基于不同小麦器官临界氮浓度稀释曲线的氮营养指数和氮亏缺能有效的诊断氮素状况和预测相对产量, 但基于茎干物质建立的临界氮浓度曲线下的氮营养指数与相对产量间的相关性最好。本研究与前人研究结果较为一致, 认为氮营养指数和累积氮亏缺对小麦田间氮素状况诊断较为准确, 且赵犇等^[13]和 Zhao 等^[41]认为不同氮水平试验下, 氮亏缺值与氮营养指数的诊断结果相同, 通过测定氮营养指数和累积氮亏缺, 可以估测出小麦田间氮素盈亏水平。

4 结论

不同产量水平小麦干物质积累量和植株氮素积累量变化的总体趋势相同, 但在不同生育时期氮积累量差异较为明显。植株氮浓度和氮营养指数均随着产量水平的增加而增加, 累积氮亏缺呈逐渐下降趋势。但在整个生育期内植株氮浓度逐渐下降, 累积氮亏缺和氮营养指数出现一定的波动。根据累积氮亏缺和氮营养指数的变化趋势判断不同产量水平小麦氮营养状况, 其中, 高产和中产小麦的累积氮亏缺和氮营养指数的变化趋势一致, 但高产小麦的氮营养状况在除起身期外的其余时期氮营养均过剩; 中产小麦起身期和拔节期氮营养过剩, 其余时期为亏缺状态, 整个生育时期累积氮亏缺均在 0 附近波动, 氮营养指数在 1 附近波动, 氮素养分基本达到最佳状态; 而中低产和低产小麦在整个生育时期氮营养均处于亏缺状况, 在关键生育时期需要及时施肥。在不同生育时期内小麦氮素吸收规律并不一致, 累积氮亏缺和氮营养指数都能准确反映出小麦的氮营养状况, 有助于指导田间施肥, 提高小麦氮素精准管理的水平。

参 考 文 献:

- [1] 淮贺举, 陆洲, 秦向阳, 等. 种植密度对小麦产量和群体质量影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(9): 1-4.
Huai H J, Lu Z, Qin X Y, et al. Advances of researches in plant density effects on the wheat yield and population quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9): 1-4.
- [2] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 施氮量与行距互作对小麦群体质量的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(7): 906-912.
Guo M M, Zhao G C, Guo W S, et al. Effect of nitrogen amount and row space on population quality of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(7): 906-912.
- [3] 岳善超. 小麦玉米高产体系的氮肥优化管理[D]. 北京: 中国农业大

- 学博士学位论文, 2013.
- Yue S C. Optimum nitrogen management of high-yield wheat and maize cropping system[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2013.
- [4] 张运红, 孙克刚, 杜君, 等. 施氮水平对不同基因型优质小麦干物质积累、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(4): 10-16.
- Zhang Y H, Sun K G, Du J, *et al.* Effect of application level of nitrogen on dry matter accumulation, yield and nitrogen uptake and utilization of different genotypes of high-quality wheat[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(4): 10-16.
- [5] 石书兵, 马林, 石庆华, 等. 不同施氮时期对冬小麦子粒蛋白质组分及其动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 456-460.
- Shi S B, Ma L, Shi Q H, *et al.* Effect of nitrogen application timing on protein constitutes and its dynamic change in wheat grain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(4): 456-460.
- [6] Ravier C, Meynard J, Cohan J, *et al.* Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 89: 16-24.
- [7] 孟维伟, 张正, 徐杰, 等. 不同施氮量对玉米花生间作下茬小麦干物质积累及产量构成的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 175-180.
- Meng W W, Zhang Z, Xu J, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on dry matter accumulation and yield components of following wheat which planted after maize peanut intercropping[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2018, 33(4): 175-180.
- [8] 张小涛, 黄玉芳, 马晓晶, 叶优良. 播种量和施氮量对不同基因型冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1067-1076.
- Zhang X T, Huang Y F, Ma X J, Ye Y L. Effects of seeding and nitrogen application on dry matter accumulation, transport and yield of winter wheat of different genotypes[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(6): 1067-1076.
- [9] 李正鹏, 冯浩, 宋明丹. 关中平原冬小麦临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 177-183.
- Li Z P, Feng H, Song M D. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of winter wheat in Guanzhong plain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 177-183.
- [10] Ata-Ul-Karim S T, Yao X, Liu X, *et al.* Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149: 149-158.
- [11] Greenwood J D, Neeteson J J, Draycott A. Quantitative relationships for the dependence of growth rate of arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment[J]. *Plant and Soil*, 1986, 91(3): 281-301.
- [12] Lemaire G, Jeuffroy M, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(4): 614-624.
- [13] 赵犇, 姚霞, 田永超, 等. 基于临界氮浓度的小麦地上部氮亏缺模型[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3141-3148.
- Zhao B, Yao X, Tian Y C, *et al.* Accumulative nitrogen deficit models of wheat aboveground part based on critical nitrogen concentration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3141-3148.
- [14] 联合国粮农组织. 粮食和农业数据[EB/OL]. [2019/12/5]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC>.
- Food and Agriculture Organization. Food and agriculture data [DB/OL]. [2019/12/5]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC>.
- [15] 张青松, 卢殿君, 岳善超, 等. 华北地区高产冬小麦氮磷钾养分需求特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3840-3851.
- Zhang Q S, Lu D J, Yue S C, *et al.* Characteristics of N, P and K nutrient demand of high-yielding winter wheat in north China plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3840-3851.
- [16] 彭红心, 张存岭. 小麦群体动态及其与产量的相关性分析[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(16): 46-48.
- Peng H X, Zhang C L. Population dynamics of wheat and its correlation with yield analysis[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(16): 46-48.
- [17] 朱新开, 郭文善, 范琦, 等. 小麦不同产量群体干物质积累指标差异研究[J]. 天津农学院学报, 2004, 11(3): 10-15.
- Zhu X K, Guo W S, Fan Q, *et al.* Differences of dry matter accumulation among populations with different grain yield in wheat[J]. *Journal of Tianjin Agricultural College*, 2004, 11(3): 10-15.
- [18] 周玲, 王朝辉, 李富翠, 等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质积累和转移的差异分析[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4123-4131.
- Zhou L, Wang Z H, Li F C, *et al.* Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dry land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4123-4131.
- [19] 丁锦峰, 陈芳芳, 王云翠, 等. 后期追氮时期对扬麦 20 花后光合物质生产力和产量的影响[J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2012, 33(3): 56-62.
- Ding J F, Chen F F, Wang Y C, *et al.* Effects of nitrogen late topdressing stages on productivity of post-anthesis photosynthates and grain yield of Yangmai 20[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2012, 33(3): 56-62.
- [20] 卢殿君. 华北平原冬小麦高产高效群体动态特征与氮营养调控[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
- Lu D J. Dynamics of population trait for high yielding and high efficiency winter wheat and N nutrient regulation in the North China Plain[J]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [21] 李友军, 付国占, 刘丰明, 等. 拔节期重施氮肥对小麦群体质量和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 1997, 17(5): 41-45.
- Li Y J, Fu G Z, Liu F M, *et al.* Effects of reapplication of nitrogen fertilizer at jointing stage on population quality and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 1997, 17(5): 41-45.
- [22] 杨佳凤, 丁锦峰, 顾后文, 等. 稻茬晚播小麦高产群体氮素积累特性研究[J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2014, 35(1): 49-54.
- Yang J F, Ding J F, Gu H W, *et al.* Nitrogen accumulation characteristics of high yielding population in late-sown wheat following rice[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2014, 35(1): 49-54.
- [23] 朱新开, 郭文善, 封超年, 等. 不同类型专用小麦优质高产群体氮素积累特征分析[J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2007, 28(3):

- 58–63.
Zhu X K, Guo W S, Feng C N, *et al.* Differences of nitrogen accumulation amount of population with high yield and good quality in wheat for different end uses[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2007, 28(3): 58–63.
- [24] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
Ling Q H. Crop population quality[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000.
- [25] 阳显斌, 张锡洲, 李廷轩, 等. 不同产量水平小麦的氮吸收利用差异[J]. *核农学报*, 2010, 24(5): 1073–1079.
Yang X B, Zhang X Z, Li T X, *et al.* Difference of nitrogen uptake and utilization in wheat cultivars with different grain level[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(5): 1073–1079.
- [26] 李瑞珂, 汪洋, 安志超, 等. 不同产量类型小麦品种的干物质和氮素积累转运特征[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(11): 1359–1364.
Li R K, Wang Y, An Z C, *et al.* The transport characteristics of dry matter and nitrogen accumulation in different wheat cultivars[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(11): 1359–1364.
- [27] 翟丙年, 李生秀. 氮素对冬小麦生长发育及产量的亏缺和补偿效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 308–313.
Zhai B N, Li S X. Response to nitrogen deficiency and compensation on growth and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(3): 308–313.
- [28] 易媛, 董召娣, 张明伟, 等. 减氮对半冬性中筋小麦产量、NUE 及氮代谢关键酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 365–374.
Yi Y, Dong Z D, Zhang M W, *et al.* Effects of reduction nitrogen on grain yield, NUE and enzymes activities related to nitrogen metabolism in semi-winter medium-gluten wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(2): 365–374.
- [29] 安志超. 不同基肥供氮水平下氮肥形态对小麦植株氮浓度、群体动态和产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2018.
An Z C. Effect of different nitrogen forms on plant nitrogen concentration, population dynamic and yield of wheat under different nitrogen application rates[D]. Zhengzhou: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2018.
- [30] 丁锦峰, 瞿妍, 成亚梅, 等. 稻茬小麦公顷产量 9000 kg 群体糖氮代谢特征[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(1): 182–190.
Ding J F, Zi Y, Cheng Y M, *et al.* Sugar-nitrogen characteristics of wheat at yield level of 9000 kg/hm² following rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(1): 182–190.
- [31] 叶利庭, 樊剑波, 徐晔红, 等. 不同氮效率水稻的生长特性[J]. *南京农业大学学报*, 2010, 33(3): 77–81.
Ye L T, Fan J B, Xu Y H, *et al.* Characteristics of growth in rice genotypes with different nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(3): 77–81.
- [32] 赵雪飞, 王丽金, 李瑞奇, 等. 不同灌溉次数和施氮量对冬小麦群体动态和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(6): 1004–1009.
Zhao X F, Wang L J, Li R Q, *et al.* Effect of irrigation times and nitrogen application rate on population dynamics and grain yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6): 1004–1009.
- [33] 王晓玲. 长江中下游稻麦两熟区冬小麦植株器官临界氮浓度模型构建及氮素诊断调控研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2017.
Wang X L. Study on construction critical nitrogen concentration dilution models based on plant organs and diagnosis and regulation of wheat in the middle and lower reaches of the Yangtze River[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2017.
- [34] 岳松华, 刘春雨, 黄玉芳, 等. 豫中地区冬小麦临界氮稀释曲线与氮营养指数模型的建立[J]. *作物学报*, 2016, 42(6): 909–916.
Yue S H, Liu C Y, Huang Y F, *et al.* Simulating critical nitrogen dilution curve and modeling nitrogen nutrition index in winter wheat in central Henan Area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(6): 909–916.
- [35] 张娟娟, 杜盼, 郭建彪, 等. 不同氮效率小麦品种临界氮浓度模型与营养诊断研究[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1480–1488.
Zhang J J, Du P, Guo J B, *et al.* Study of critical nitrogen concentration model and nitrogen nutrition diagnosis in winter wheat with different N efficiency[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(11): 1480–1488.
- [36] 丁锦峰, 杨佳凤, 王云翠, 等. 稻茬小麦公顷产量 9000 kg 群体氮素积累、分配与利用特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 543–551.
Ding J F, Yang J F, Wang Y C, *et al.* Nitrogen accumulation, distribution and utilization characteristics of wheat at yield level of 9000 kg/hm² in rice-wheat rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 543–551.
- [37] Colenne C, Meynard J M, Roche R, Reau R. Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17: 11–28.
- [38] 强生才, 张富仓, 向友珍, 等. 关中平原不同降雨年型夏玉米临界氮稀释曲线模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 17(30): 168–175.
Qiang S C, Zhang F C, Xiang Y Z, *et al.* Simulation and verification of critical nitrogen dilution curve of summer maize in different rainfall years in Guanzhong plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 17(30): 168–175.
- [39] 吕茹洁, 商庆银, 陈乐, 等. 基于临界氮浓度的水稻氮素营养诊断研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1396–1405.
Lü R J, Shang Q Y, Chen L, *et al.* Study on diagnosis of nitrogen nutrition in rice based on critical nitrogen concentration[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1396–1405.
- [40] 田兴帅, 李松阳, 张羽, 等. 基于临界氮浓度稀释曲线的小麦氮肥需求量估测研究[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(9): 1112–1120.
Tian X S, Li S Y, Zhang Y, *et al.* Estimation of nitrogen fertilizer requirement of winter wheat based on critical nitrogen dilution curve[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(9): 1112–1120.
- [41] Zhao B, Niu X L, Ata-Ul-Karim S T, *et al.* Determination of the post-anthesis nitrogen status using ear critical nitrogen dilution curve and its implications for nitrogen management in maize and wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 113: 967–978.
- [42] Ata-Ul-Karim S T, Zhu Y, Cao Q, *et al.* In-season assessment of grain protein and amylose content in rice using critical nitrogen dilution curve[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90: 139–151.