

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.03.003

江晓东,李旭冉,张涛,等.春小麦冠层氮素垂直分布与转运特征[J].中国农业气象,2021,42(3):190-199

春小麦冠层氮素垂直分布与转运特征*

江晓东, 李旭冉, 张涛, 杨晓亚, 杨沈斌

(江苏省农业气象重点实验室/南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 以春小麦品种“吉春 34”为材料, 2016–2017 年在南京进行了 3 期分期播种试验 (S1, 2016 年 12 月 16 日播种; S2, 2017 年 1 月 13 日播种; S3, 2017 年 2 月 19 日播种), 研究不同播期春小麦开花后不同空间层次叶片和茎鞘的氮素含量、氮素积累量、氮素垂直梯度变化以及植株氮素转运量、籽粒蛋白质含量和产量变化, 以期明确江苏春小麦植株冠层氮素积累、分配与转运特征, 并确定最适播期。结果表明: 春小麦冠层氮素含量垂直分布特征明显, 开花后春小麦植株含氮量随冠层高度的降低而降低, 播期显著影响春小麦植株冠层氮素的积累、分布与转运。与早播春小麦 (S1) 相比, 晚播春小麦 (S2、S3) 冠层 40–80cm 层次含氮量和氮积累量显著降低, 叶片和茎鞘氮素垂直梯度的峰值出现时间提前至开花–灌浆期, 峰值出现的空间位置降至冠层中下层, 植株氮素转运量显著降低 6.61%~29.12%。早播春小麦冠层中上部营养器官在生育后期可维持较大的氮素垂直梯度, 促进氮素的运转。同时, 晚播春小麦生育期内接受的太阳总辐射量、降水量减少, 平均气温升高, 开花后高温热害程度增加, 生育期持续时间减少, 降低了植株对氮素的吸收和转运。晚播春小麦比早播春小麦籽粒蛋白质含量降低 8.46%~9.82%, 蛋白质产量减少 40.78~71.47g·m⁻²。综合春小麦冠层氮素分布与转运特征认为, 在本试验条件下, S1 播期 (12 月 16 日) 为江苏春小麦的最佳播期。

关键词: 江苏; 春小麦; 播期; 含氮量; 氮素运转

Vertical Distribution and Transport Characteristics of Nitrogen in Spring Wheat Canopy

JIANG Xiao-dong, LI Xu-ran, ZHANG Tao, YANG Xiao-ya, YANG Shen-bin

(Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The spring wheat variety Jichun 34 was used to carry out the three-stage sowing experiment (S1, sowing on December 16, 2016; S2, sowing on January 13, 2017; S3, sowing on February 19, 2017) at Nanjing from 2016 to 2017. The nitrogen content, nitrogen accumulation, nitrogen vertical gradients in leaves and stem-sheaths of spring wheat in different spatial layers of canopy after anthesis, as well as the translocation amount of plant nitrogen, grain protein content and yield were studied in order to clarify the characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in plant canopy of spring wheat, and to determine the optimal sowing date in Jiangsu Province. The results showed that the vertical distribution characteristics of canopy nitrogen content were obvious in spring wheat. After anthesis, the plant nitrogen content of spring wheat decreased with the decrease of canopy height. Sowing date significantly affected the accumulation, distribution and translocation of canopy nitrogen. Compared with early sowing date (S1), the nitrogen content and accumulation in the 40–80cm layer of canopy of late sown spring wheat

* 收稿日期: 2020-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (41875140; 41105078); 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金 (AMF201602)

第一作者联系方式: 江晓东, E-mail: jiangxd@nuist.edu.cn

(S2 and S3) were significantly reduced; the peak time of vertical gradients of nitrogen in leaves and stem-sheaths was advanced to the anthesis and filling stage; and the peak spatial position was reduced to the middle and lower canopy; and the amount of nitrogen translocation was significantly reduced by 6.61%–29.12%. The middle and upper vegetative organs of early sown spring wheat canopies could maintain a larger vertical gradients of nitrogen in the late growth period, and promote the transfer of nitrogen. At the same time, during the growth period of late sowing spring wheat, the amount of total solar radiation and precipitation received decreased, the daily average temperature increased, the heat stress increased after anthesis, the duration of growth period decreased, and the absorption and translocation of nitrogen by plants decreased. The grain protein content of late sown spring wheat was 8.46%–9.82% lower than that of early sowing spring wheat, and the protein yield was 40.78–71.47g·m⁻² lower. According to the characteristics of nitrogen distribution and translocation in spring wheat canopy, sowing date of S1 (16 December) is the best for spring wheat in Jiangsu Province.

Key words: Jiangsu province; Spring wheat; Sowing date; Nitrogen content; Nitrogen transportation

氮素是小麦生长发育所需的大量元素之一，小麦植株对氮素的吸收、利用和转运直接影响小麦的生长状况、产量与品质^[1-2]。开花-成熟期是小麦产量和品质形成的重要时期，花后营养器官氮素向籽粒的转运、植株对土壤氮素的吸收与籽粒产量和蛋白质含量直接相关^[3-4]。品种特性、栽培措施和气候等因素影响小麦对氮素的吸收利用^[5-7]。因此，分析植株对氮素的吸收、同化与利用特点，是研究小麦产量和品质形成的重要内容。

稻麦两熟是江苏主要的种植制度，稻茬麦的种植面积占江苏小麦播种面积的73%^[8]。近年来，由于优质高产晚（粳）稻的大面积推广、水稻轻简栽培及机械化种植技术的应用，水稻收获期延迟至11月中下旬，冬小麦播种期普遍推迟至11月下旬-12月上旬，晚播现象日益严重，晚播面积逐年增加，严重影响小麦的产量^[8-9]。针对稻茬麦冬小麦的晚播高产技术，前人做了大量研究^[2,9-10]，有效解决了晚播影响冬小麦产量的问题，但若在冬小麦播种期间遭遇连阴雨、“雪压稻”等灾害性天气，冬小麦无法种植，则会发生冬季撂荒的现象^[11-12]，造成冬春季节土地和光热资源的浪费，影响周年粮食生产的稳定性。

春小麦春化温度高、春化时间短、生长周期短，生产上安排比较灵活^[13]。江苏地处亚热带季风气候区，最冷月平均气温-1.0~3.3℃，气候条件满足春小麦的生长需求，春小麦可在特殊年份作为备选品种在江苏种植^[14]。但需要注意的是，一旦出现冬小麦无法种植的情况，春小麦的播种时间也因天气条件而存在很大的不确定性。氮素的吸收与利用情况直接影响小麦的产量与品质，不同播期条件下，春

小麦在生长发育过程中的气象因子组合不同，植株干物质和氮素的积累与分配发生变化，产量和品质必将受到影响。因此，研究不同播期条件下春小麦植株冠层营养器官氮素垂直分布、氮素积累和分配特征，明确春小麦氮素分配吸收、利用和转化的特点，可为春小麦在江苏的高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2016–2017年在南京信息工程大学农业气象试验站（118° 42'17"E，32° 12'24"N）进行。试验设置3个播期，分别为S1（2016年12月16日）、S2（2017年1月13日）和S3（2017年2月19日）。试验田土壤为潴育型水稻土，灰马肝土属。0–20cm土壤有机碳含量为11.04g·kg⁻¹，全氮含量1.25g·kg⁻¹，全磷含量为0.92g·kg⁻¹，全钾含量为18.93g·kg⁻¹，土壤pH6.70，质地为壤质黏土，黏粒含量26.10%。供试春小麦品种为吉春24，由吉林省农业科学院提供。春小麦采用条播种植，行距为25cm，种植密度均为300株·m⁻²，小区面积3m×3m=9m²，采用随机区组排列，3次重复。试验田前茬作物为水稻，水稻根茬还田，春小麦种植期间肥料用量为45%复合肥（N:P:K=15:15:15）800kg·hm⁻²，基肥:追肥=1:1，基肥在土壤耕作时施用，追肥在春小麦拔节时施用，田间管理同当地高产田。

1.2 测定项目

1.2.1 气象要素观测

春小麦种植期间的气象数据由南京信息工程大学农业气象试验站提供。

1.2.2 发育期观测

观测记录不同播期春小麦的出苗期、分蘖期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期日期。

1.2.3 冠层垂直分层与取样方法

在春小麦开花期、灌浆期和成熟期，在每个小区中长势均匀的地段连续选择无病害且长势正常的小麦单茎 30 个带根取回室内，以根茎交接处为 0cm，从茎基部到小麦冠层顶部，每 20cm 为一层将植株分为 4 层，即 0-20、20-40、40-60 和 60-80cm，由于试验条件下种植的春小麦株高在 90cm 左右，80cm 以上的叶片和茎秆质量很少，因此将该部分叶片和茎鞘归入到 60-80cm 层次中。

1.2.4 含氮量的测定

将各层样品按茎鞘、叶片和籽粒分开，在 75℃ 条件下烘干后磨碎，采用半微量凯氏定氮法测定各器官含氮量^[15]。

1.2.5 产量测定

在成熟期，在每播期长势均匀的地块取 3 块 2 m² 小麦样点，人工收割并脱粒，晾晒籽粒含水量至 13%左右称重测产。

1.3 计算方法

1.3.1 叶片（茎鞘）氮素垂直梯度

将相邻两层次之间叶片（茎鞘）含氮量之差定义为氮素垂直梯度。在春小麦开花期、灌浆期和成熟期，分别计算叶片（茎鞘）氮素垂直梯度，即

ΔN = N_n - N_{n-1} (1)

式中，ΔN 为叶片（茎鞘）的氮素垂直梯度（百分点），N_n 为第 n 层叶片（茎鞘）含氮量（%），N_{n-1} 为相邻第 n-1 层叶片（茎鞘）含氮量（%）。计算时分上、中、下 3 层，将 60-80cm 与 40-60cm 叶片（茎鞘）含氮量差值定义为上层氮素垂直梯度，40-60cm 与 20-40cm 叶片（茎鞘）含氮量差值定义为中层氮素垂直梯度，20-40cm 与 0-20cm 叶片（茎鞘）含氮量差值定义为下层氮素垂直梯度。

1.3.2 籽粒蛋白质含量

成熟期籽粒的蛋白质含量为

N_{pr} = N_{grain} × 5.7 (2)

式中，N_{pr} 为成熟期籽粒蛋白质含量（%），N_{grain} 为成熟期籽粒含氮量（%），5.7 为转换系数。

1.3.3 叶片（茎鞘）氮素积累量

开花期、灌浆期和成熟期叶片（茎鞘）氮素积累量为

NC = N × DW (3)

式中，NC 为单茎叶片（茎鞘）氮素积累量（mg），N 为叶片（茎鞘）含氮量（%），DW 为单茎叶片（茎鞘）干物质量（mg）。

1.3.4 叶片（茎鞘）氮素转运量

叶片（茎鞘）氮素转运量为

NT = NC_{anthesis} - NC_{mature} (4)

式中，NT 为单茎叶片（茎鞘）氮素转运量（mg），NC_{anthesis} 为开花期单茎叶片（茎鞘）氮素积累量（mg），NC_{mature} 为成熟期单茎叶片（茎鞘）氮素积累量（mg）。

1.3.5 籽粒蛋白质产量

籽粒蛋白质产量为

NY_{pr} = Y_{grain} × N_{pr} (5)

式中，NY_{pr} 为籽粒蛋白质产量（g·m⁻²），Y_{grain} 为成熟期籽粒产量（g·m⁻²），N_{pr} 为成熟期籽粒蛋白质含量（%）。

1.4 数据处理

采用 Excel2016 作图，采用 DPS 7.05 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 春小麦主要生育期气象要素分布

由图 1 可见，不同播期春小麦生长期间的气象要素组合存在很大差异。分蘖-成熟期间，S1、S2 和 S3 播期处理春小麦所接受的太阳总辐射分别为 1518.48、1428.05 和 1135.10MJ·m⁻²·d⁻¹，除开花-灌浆期 3 个播期的太阳总辐射差异较小外，其它时期播期处理间均差异明显，均表现为 S1>S2>S3，充足的太阳辐射有利于产量和品质的形成。播期处理间降水量也有明显差异，分蘖-成熟期 S1、S2 和 S3 播期处理的降水量分别为 285.1、255.6 和 182.8mm，S1>S2>S3，其中拔节-开花期 3 个播期处理间差异最大，S1 分别比 S2 和 S3 多 30.3mm 和 96.6mm，此期间水分的充足供应可以保证春小麦的营养生长和穗分化对水分的需求。各播期处理日平均温度随发育期的后移而升高，各生育阶段均表现出 S3>S2>S1 的规律。在开花-成熟期，S1、S2 和 S3 播期处理的平均气温分别为 21.28、22.12 和 22.37℃，晚播春小麦该阶段的平均温度升高明显，此期间 3 个播期处理春小麦遭遇了不同程度的>30℃ 的高温热害天气，在开花-灌浆期，S1、S2 和 S3 播期处理分别遭遇 0、1

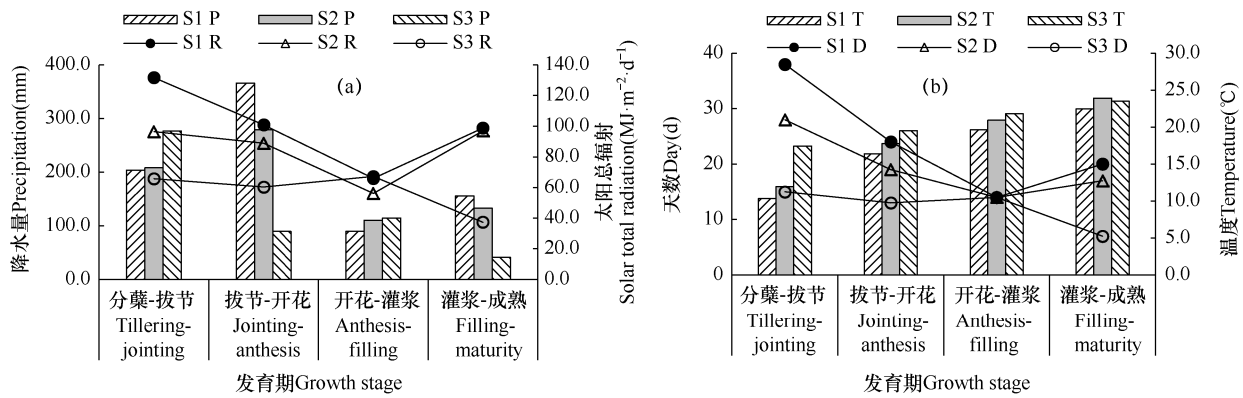


图 1 不同播期春小麦生育期持续天数及期间气象要素

Fig. 1 Growth duration of spring wheat of different sowing date and the meteorological elements during the period

注：图例中 P 代表降水量，R 代表太阳总辐射，T 代表日平均温度，D 代表发育期持续天数。S1、S2 和 S3 分别指播期为 2016 年 12 月 16 日、2017 年 1 月 13 日和 2017 年 2 月 19 日。下同。

Note: In the legend, P represents precipitation, R represents total solar radiation, T represents daily average temperature, and D represents duration of growth period. S1 means sowing on December 16, 2016; S2 means sowing on January 13, 2017; S3 means sowing on February 19, 2017. The same as below.

和 3d 高温热害天气，在灌浆-成熟期，S1、S2 和 S3 播期处理又分别遭遇了 6、8 和 3d 的高温热害天气（图略），播期推迟加重了春小麦的高温危害，不利于小麦产量和品质的形成。受平均温度升高的影响，晚播春小麦发育期的持续时间明显缩短，S1、S2 和 S3 播期处理小麦分蘖-成熟期持续天数分别为 96、78 和 49d，S2、S3 分别比 S1 缩短 18d 和 47d。综合分析认为，S1 播期春小麦生长期间接受的太阳总辐射最高、降水量最多、日平均气温最低，相对于 S2

和 S3 播期，其光、温、水条件有利于春小麦的生长发育，而 S3 播期的光、温、水条件在 3 个播期中最不利于春小麦的生长发育。

2.2 春小麦生殖生长阶段植株氮素垂直分布

2.2.1 含氮量

由图 2 可见，春小麦开花后各器官含氮量在不同播期间和不同生育时期表现出明显的垂直分布特点。在同一生育期，各器官的含氮量表现出 40-60cm 以下随植株高度快速升高、60-80cm 停止

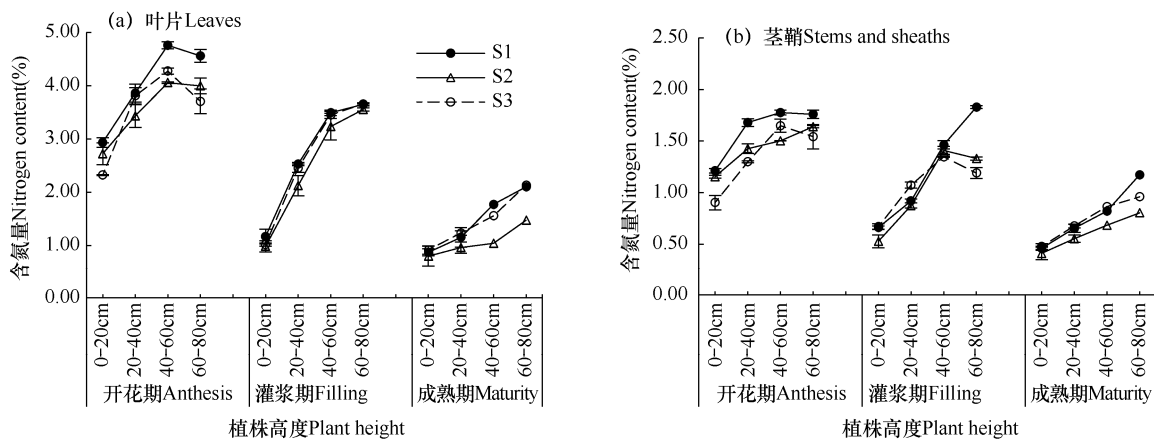


图 2 不同播期春小麦生殖生长阶段植株叶片和茎鞘含氮量随植株高度变化

Fig. 2 Variation of the nitrogen content in leaves and stem-sheaths with the plant height of spring wheat during the reproductive stages under different sowing date treatments

注：图中的误差线为标准偏差。下同。

Note: The bar shows standard deviation. The same as below.

增加的特点，且器官之间含氮量有较大差异。具体来看，在开花期，各层叶片含氮量在 2.32%~4.76% 范围内变动，显著高于茎鞘含氮量 (0.90%~1.78%)，至灌浆期和成熟期，叶片和茎鞘含氮量明显下降，成熟期叶片含氮量最高值和最低值分别为 2.13% 和 0.80%，但仍显著高于此时茎鞘最高和最低含氮量 (1.17% 和 0.41%)。由图还可见，植株不同层次之间含氮量差异明显，开花期，各播期 0-20、20-40、40-60 和 60-80cm 层次叶片含氮量平均为 2.66%、3.70%、4.36% 和 4.09%，茎鞘含氮量平均为 1.09%、1.47%、1.64% 和 1.65%，至灌浆期和成熟期，叶片和茎鞘含氮量明显下降，在成熟期 0-20、20-40、40-60 和 60-80cm 层次叶片含氮量分别为 0.86%、1.11%、1.45% 和 1.90%，茎鞘的含氮量分别为 0.45%、0.63%、0.79% 和 0.98%，垂直分布特点依然明显。3 个播期比较表明，叶片和茎鞘含氮量皆表现为 S1>S3>S2，冠层上部 (40-60cm 和 60-80cm) 含氮量差异较大。开花期、灌浆期和成熟期 3 个发育期比较，叶片和茎秆含氮量表现为开花期>灌浆期>成熟期。

2.2.2 氮素积累量

由图 3 可见，春小麦花后叶片和茎鞘的氮素积累量逐渐降低，同样表现出明显的垂直分布特征。叶片的氮素积累量随植株高度的增加而增加 (图 3a)，40-60cm 层次氮素积累量达到最高值，60-80cm 层次氮素积累量降低。在开花期，叶片氮素积累量表现为 S1>S2>S3，除 20-40cm 层次外，其它层次叶片氮素积累量播期处理间差异显著；在灌浆期，不

同播期处理间叶片氮素积累量差异显著减小，S1、S2 和 S3 播期处理单茎叶片氮素积累量分别为 9.47、8.79 和 7.94mg，表现为 S1>S2>S3；成熟期各播期处理氮素积累量表现为 S1>S3>S2，播期处理间相同株高层次比较表明，差异最大为 40-60cm 高度，该层次 S1、S2 和 S3 处理单茎叶片氮素积累量分别为 1.52、0.93 和 1.36mg，播期处理间差异显著。对于茎鞘而言 (图 3b)，开花期茎鞘氮素积累量随小麦高度的增加而降低，0-60cm 各层次播期处理间差异显著，单茎茎鞘氮素积累总量 S1 比 S2 和 S3 分别高 2.34 和 2.96mg；在灌浆期和成熟期，不同播期单茎茎鞘氮素积累量均为 S1>S3>S2，20-40cm 和 40-60cm 株高氮素积累量最高，60-80cm 最低。成熟期 S1、S2 和 S3 播期处理单茎茎鞘氮素积累量分别为 16.31、13.09 和 14.22mg，S1 比 S2 和 S3 分别高 3.23 和 2.09mg。综合来看，S1 比 S2 和 S3 播期处理能显著提高春小麦开花后叶片和茎鞘氮素积累量，保证花后春小麦籽粒生长发育及灌浆对氮素的需求。

2.3 春小麦生殖生长阶段植株氮素含量垂直梯度

氮素垂直梯度为相邻两层次之间叶片或茎鞘含氮量的差值，垂直梯度越大表明下层器官向上层器官的氮素转移越多。从图 4a 可以看出，不同层次叶片之间的氮素垂直梯度差异显著。在开花期，各播期处理下层叶片氮素垂直梯度，即 0-20cm 层次叶片向 20-40cm 层次叶片的氮素转移，最大值为 S3 播期处理的 1.49 个百分点，比 S1 和 S2 分别高 0.56 个和

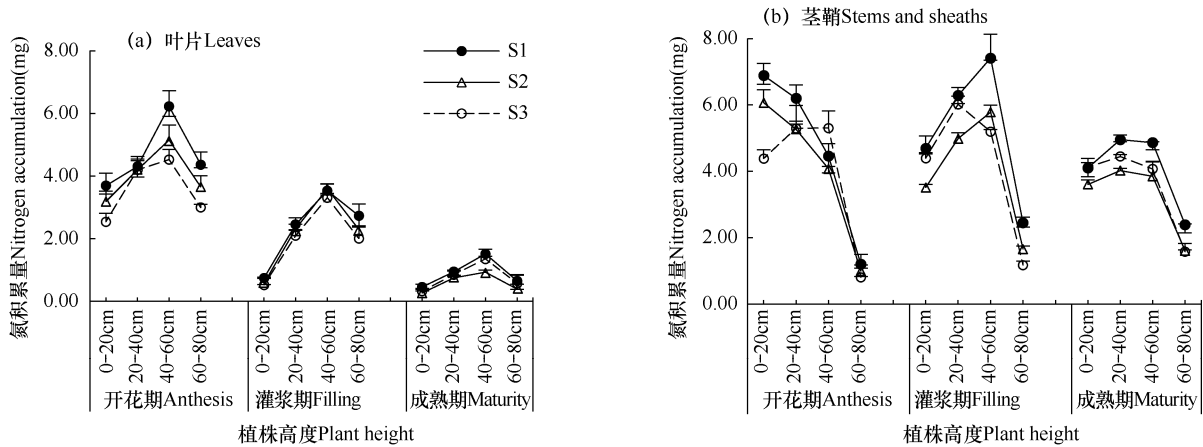


图 3 不同播期春小麦生殖生长阶段植株叶片和茎鞘氮素积累量随植株高度变化

Fig. 3 Variation of the nitrogen accumulation in leaves and stem-sheaths with the plant height of spring wheat during the reproductive stages under different sowing date treatments

0.78 个百分点；中层叶片氮素梯度，即 20–40cm 层次叶片向 40–60cm 层次叶片的氮素转移表现为 S1 高于 S2 和 S3 播期处理。在灌浆期，中层叶片的氮素垂直梯度较开花期明显增大，与下层叶片梯度值差异明显减小，中层叶片氮素垂直梯度最大值为 S2 播期处理的 1.11 个百分点，下层叶片最大值为 S3 的 1.43 个百分点，S1 与 S3 播期处理无显著差异。在成熟期，各层植株叶片的氮素垂直梯度明显减小，S1 播期处理中层叶片的氮素垂直梯度为各层最大值，为 0.62 个百分点，表明 S1 播期下层叶片仍有大量的氮素输出。综合分析可以看出，S3 播期叶片氮素转

移主要集中在开花期和灌浆期，以下层叶片为主，S2 播期叶片氮素转移主要集中在灌浆期的中层叶片，S1 播期处理叶片氮素转移在开花期中层、灌浆期下层和成熟期中层叶片都保持较高值，叶片氮素转移稳定持续，输出能力强。

图 4b 显示，茎鞘氮素垂直梯度变化幅度小于叶片，氮素转移中心随发育期的推进由下层茎鞘向高层茎鞘转移。在开花期，下层茎鞘氮素垂直梯度最大，S1 和 S3 播期处理显著高于 S2，中层茎鞘氮素垂直梯度 S3 显著高于 S1 和 S2。在灌浆期，中层茎鞘氮素垂直梯度显著增大，S1 和 S2 显著高于 S3，

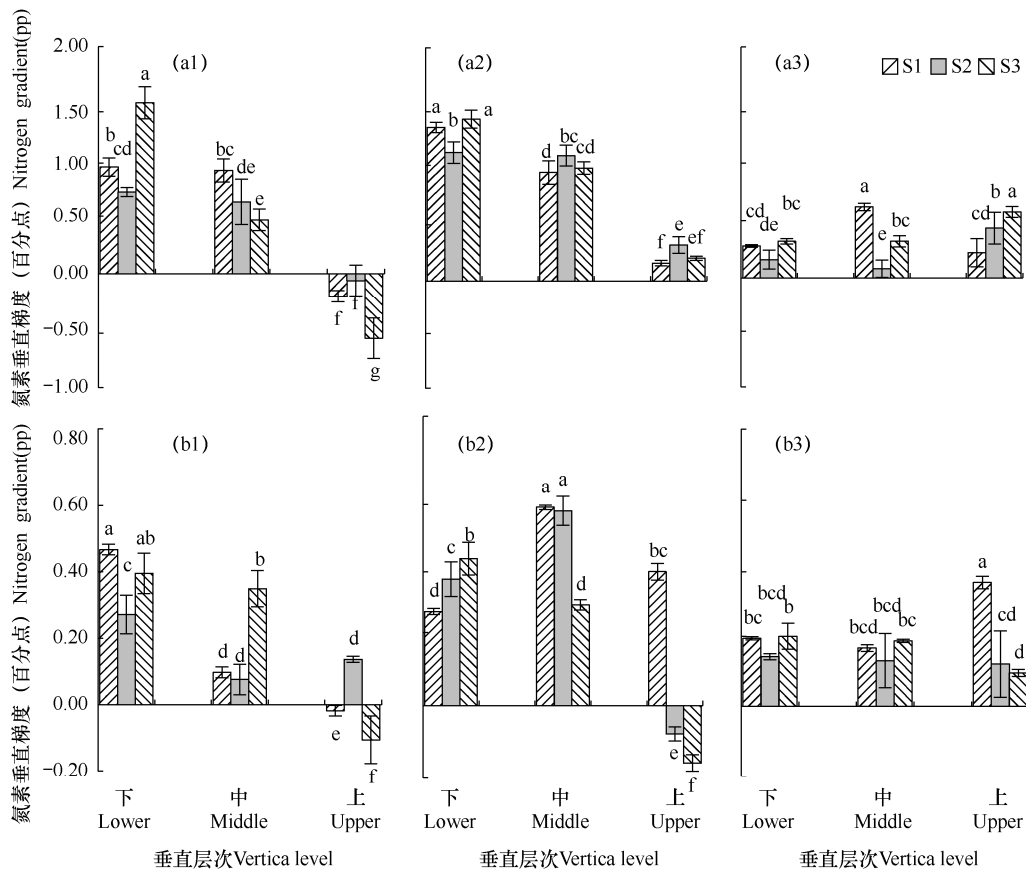


图 4 不同播期处理春小麦花期(1)、灌浆期(2)和成熟期(3)叶片(a)和茎鞘(b)相邻上下层间氮素含量差值 (垂直梯度)

Fig. 4 Nitrogen content difference between upper and lower layer (vertical gradients) in leaves(a) and stem-sheaths(b) during anthesis(1), filling (2) and maturity(3) stage of spring wheat for different sowing date treatments

注：小写字母表示 3 个处理所有层次样品间在 0.05 水平上的差异显著性。下层的氮素垂直梯度指 20–40cm 高度叶片 (茎鞘) 与 0–20cm 层叶片 (茎鞘) 的含氮量差值，中层氮素垂直梯度指 40–60cm 层与 20–40cm 层的差值，上层氮素垂直梯度指 60–80cm 层与 40–60cm 层的差值。下同。

Note: Lowercase letters indicate the significance of differences at the 0.05 level between all levels of the three treatments. The vertical gradient of nitrogen in the lower layer refers to the difference(pp is percent point) of nitrogen content between the leaves or stem-sheaths at the height of 20–40cm and the leaves or stem-sheaths at the height of 0–20cm, the vertical gradient of nitrogen in the middle layer refers to the difference of 40–60cm and 20–40cm, and the vertical gradient of nitrogen in the upper layer refers to the difference of 60–80cm and 40–60cm. The same as below.

下层茎鞘氮素垂直梯度 S3 显著高于 S1 和 S2，上层茎鞘氮素垂直梯度 S1 显著高于 S2 和 S3。在成熟期，中层和下层各个播期间茎鞘的氮素垂直梯度无显著差异，S1 播期上层茎鞘氮素垂直梯度显著高于 S2 和 S3。综合来看，S3 播期茎鞘氮素垂直梯度的高峰值出现在开花期的中、下层和灌浆期的下层茎鞘，S2 播期茎鞘氮素垂直梯度的高峰值出现在灌浆期的中层茎鞘，说明 S2 和 S3 播期茎鞘氮素输出分别主要发生在开花期和灌浆期，且以下层和中层茎鞘为主。S1 播期茎鞘各层次氮素垂直梯度峰值随发育期的推进而逐渐上移，开花期的下层、灌浆期的中层和上层、成熟期上层茎鞘的氮素垂直梯度显著高于其它播期，说明 S1 播期春小麦茎鞘的氮素转移能力强，持续时间长。综合叶片和茎鞘的氮素浓度梯度变化可以看出，S1 较 S2 和 S3 播期处理春小麦的营养器官氮素转移持续时间长且转移能力强，尤其是在灌浆后期高层营养器官仍能从中下层营养器官获得充足的氮素供应。

2.4 春小麦生殖生长阶段植株氮素转运

播期显著影响春小麦叶片氮素的转移分配。由图 5a 可见，叶片氮素转运量随株高的增高而增大，0–20cm 层叶片氮素转运量最低，40–60cm 层次氮素转运量达到最大值，随后减小，3 个播期处理均为 40–60cm 层次叶片氮素转运量最大，平均占植株叶

片氮素转运量的 30.22%，是花后叶片氮素转运的主体。3 个播期处理比较，各层次叶片氮素的转运量基本表现为 S1>S2>S3，S1、S2 和 S3 处理单茎叶片氮素转移总量分别为 15.03、13.86 和 11.16mg，S1 分别比 S2 和 S3 高 8.44%和 34.68%，可见播期延迟显著减少叶片积累的氮素向籽粒转移。茎鞘的氮素转运量显著低于叶片，转移规律也与叶片有明显差异(图 5b)，S1 和 S2 播期茎鞘氮素转运量随株高的增高而减小，而 S3 播期则相反。各播期 60–80cm 层次无氮素输出，表现为氮素的输入。S1、S2 和 S3 处理单茎茎鞘氮素总运转量分别为 4.03、3.94 和 2.35mg，S1 分别比 S2 和 S3 高 2.28%和 71.49%，同样表明播期推迟显著降低茎鞘积累氮素的输出量。冠层氮素输出量合计，S1、S2 和 S3 播期处理分别为 19.06、17.80 和 13.51mg，S2 和 S3 分别比 S1 低 6.61%和 29.12%，播期间差异显著，S1 处理显著优于 S2 和 S3，说明早播可促进叶片(茎鞘)中积累的氮素向籽粒转移。

2.5 春小麦成熟期蛋白质产量

表 1 表明，播期显著改变春小麦的产量。随着播期的推迟，春小麦产量显著降低，S1 播期产量为 775.27g·m⁻²，分别比 S2 和 S3 显著高 221.53 和 456.66g·m⁻²。播期也改变了春小麦籽粒蛋白质含量，播期推迟，籽粒蛋白质含量显著降低，S2 和 S3 播期

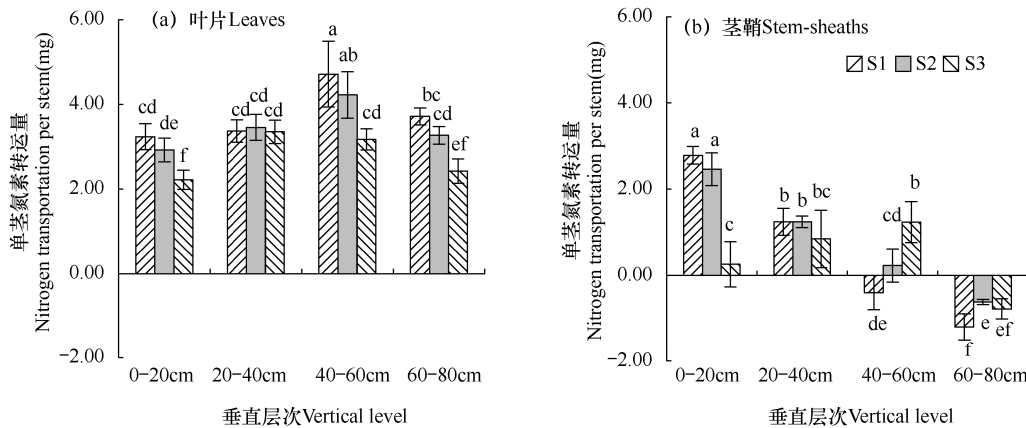


图 5 不同播期春小麦生殖生长阶段植株叶片和茎鞘氮素转运量变化随植株高度变化

Fig. 5 Variation of the amount of nitrogen transported in leaves and stem-sheaths with the plant height of spring wheat during the reproductive stages under different sowing date treatments

注：正值表示氮素由叶片或茎鞘向籽粒转运，负值表示该层次叶片或茎鞘氮素无输出，表现为输入。

Note: A positive value indicates that nitrogen is transported from leaf or stem-sheath to grain, while a negative value indicates that there is no output of nitrogen from leaf or stem-sheath at this level, showing as input.

分别比 S1 播期显著降低籽粒蛋白质含量 9.82%和 8.46%。产量和蛋白质含量的差异共同导致了播期间春小麦蛋白质产量的差异, S1>S2>S3, 与 S2 和 S3

播期相比, S1 播期可显著提高蛋白质产量 40.78 和 71.47g·m⁻², 表明播期延迟可显著降低春小麦蛋白质的产量。

表 1 不同播期春小麦产量、蛋白质含量和蛋白质产量的比较

Table 1 Comparison of grain yield, protein content and protein yield of spring wheat under different sowing date treatments

播期 Sowing date	产量 Yield(g·m ⁻²)	蛋白质含量 Protein content(%)	蛋白质产量 Protein yield (g·m ⁻²)
S1	775.27±10.19a	14.77±0.65a	114.54±6.54a
S2	553.74±1.69b	13.32±0.16b	73.76±1.13b
S3	318.61±23.51c	13.52±0.17b	43.08±3.41c

3 结论与讨论

3.1 讨论

本研究中春小麦冠层氮素含量垂直分布特征明显, 冠层氮素含量和积累量基本随植株高度的降低而降低, 与冬小麦的研究结果一致^[16-17]。S1、S2 和 S3 播期处理相比较, S1 播期处理可显著提高春小麦开花后植株各层次营养器官的含氮量和氮积累量, 对冠层上部 40-80cm 层次影响尤为明显, 良好的氮素营养有利于提高上层叶片光合性能、延长叶片的功能期, 提高小麦的氮代谢活性和籽粒产量。

小麦籽粒中的氮素主要来源于开花前贮存在营养器官的氮素和开花后从土壤中吸收同化的氮素^[18-19], 籽粒蛋白质含量随植株氮素积累量和运转量的增加而增加^[1,20]。本研究表明, 春小麦花后营养器官氮素向籽粒的运转与冠层氮素的垂直分布特征相关, 播期推迟 (S2 和 S3 播期处理) 不仅降低了春小麦营养器官的氮素含量和积累量, 而且使叶片和茎鞘氮素垂直梯度的峰值出现时间提前至开花-灌浆期, 峰值出现的空间位置降低至冠层中下层, 说明晚播春小麦植株在灌浆期前中下层营养器官已经将大量的氮素转移至上层营养器官中, 灌浆期后上层营养器官无法从中下层营养器官中得到持续的氮素供应, 植株衰老加速, 也降低了营养器官氮素转运量, 不利于籽粒品质的形成; 早播春小麦 (S1 播期处理) 开花和灌浆期营养器官中的氮素含量和积累量高, 冠层中上部营养器官在灌浆-成熟期仍维持较大的氮素垂直梯度, 优化了开花后氮素在冠层内的分配, 促进了植株体内的氮素向籽粒转移, 增加了籽粒蛋白质含量。

播期改变了春小麦生长期间的气象要素组合。与 S2 和 S3 相比, S1 播期处理春小麦生长过程中接

收到的太阳总辐射和降水量增多、日平均温度降低, 减轻了开花后高温热害的危害, 有利于植株的光合作用和氮素代谢的进行, 促进了植株体内氮素的吸收和积累^[5,21-23], 提高了籽粒的产量和蛋白质的含量。但本研究仅考虑了播期对春小麦氮素利用状况的影响, 今后还应从灌溉、施肥、品种选择等多方面进行综合研究, 为春小麦在江苏种植的高产高效提供可靠的理论依据。

3.2 结论

春小麦冠层氮素含量垂直分布特征明显, 播期显著影响了春小麦冠层氮素分布与转运特征。播期推迟显著降低春小麦开花后各层次叶片和茎鞘的含氮量和氮积累量, 对冠层上部的影响尤为明显。播期推迟使叶片和茎秆氮素垂直梯度的峰值出现时间提前, 出现的空间位置降低, 减少了植株氮素运转量, 早播春小麦冠层中上部营养器官在生育后期可维持较大的氮素垂直梯度, 促进氮素的运转。播期推迟同时减少了春小麦接受的太阳总辐射量和降水量, 提高了生育期内平均温度, 缩短了春小麦的生育期天数, 加重了高温热害的程度, 导致小麦籽粒蛋白质含量和产量显著降低。从春小麦冠层氮素的分布与转运特征的角度看, 在本试验条件下, S1 播期即 2016 年 12 月 16 日是江苏春小麦的最佳播期。

参考文献 References

- [1] 戴廷波,孙传范,荆奇,等.不同施氮水平和基追比对小麦籽粒品质形成的调控[J].作物学报,2005,31(2):248-253.
Dai T B,Sun C F,Jing Q,et al.Regulation of nitrogen rates and dressing ratios on grain quality in wheat[J].Acta Agronomica Sinica,2005,31(2):248-253.(in Chinese)
- [2] 江东国,黄正来,马文静,等.晚播条件下施氮量对稻茬小

- 麦氮素吸收及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10):1211-1221.
- Jiang D G, Huang Z L, Ma W J, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen uptake and yield of wheat under late sowing conditions after rice[J]. *Acta Triticeae*, 2019, 39(10):1211-1221. (in Chinese)
- [3] Flowers M, Weisz R, Heiniger R, et al. In-season optimization and site-specific nitrogen management for soft red winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1): 124-134.
- [4] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2):55-59.
- Wang Y F, Yu Z W, Li S X, et al. Effect of nitrogen nutrition on carbon assimilation and transfer and yield after wheat anthesis[J]. *Acta Triticeae*, 2002, 22(2):55-59. (in Chinese)
- [5] 潘洁, 姜东, 戴廷波, 等. 不同生态环境与播种期下小麦籽粒品质变异规律的研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 467-473.
- Pan J, Jiang D, Dai T B, et al. Variation in wheat grain quality grown under different climatic conditions with different sowing dates[J]. *Acta Plant Ecology*, 2005, 29(3):467-473. (in Chinese)
- [6] 李勤英, 姚凤梅, 张佳华, 等. 不同农艺措施对缩小冬小麦产量差和提高氮肥利用率的评价[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6):370-379.
- Li Q Y, Yao F M, Zhang J H, et al. Evaluation of different agronomic measures on narrowing the yield gap and improving nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(6):370-379. (in Chinese)
- [7] 周景博, 刘亮. 未来气候变化对中国小麦产量影响的差异性研究: 基于 Meta 回归分析的定量综述[J]. 中国农业气象, 2018, 39(3):141-15.
- Zhou J B, Liu L. Study on the differences of the impact of future climate change on wheat yield in China: quantitative review based on Meta regression analysis[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(3):141-15. (in Chinese)
- [8] 张明伟, 姚义, 唐建鹏, 等. 长江中下游稻茬晚播小麦高产限制因素及栽培技术研究进展[J]. 金陵科技学院学报, 2020, 36(1): 59-64.
- Zhang M W, Yao Y, Tang J P, et al. Research progress on limiting factors and cultivation techniques of high-yielding in late-sowing wheat following rice in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2020, 36(1):59-64. (in Chinese)
- [9] 高德荣, 张晓, 康建鹏, 等. 长江中下游麦区小麦迟播的不利影响及育种对策[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2):279-283.
- Gao D R, Zhang X, Tang J P, et al. Negative effects of late sowing on wheat production in Middle and Lower Reaches of Yangtze River Valley and breeding strategies[J]. *Acta Triticeae*, 2014, 34(2):279-283. (in Chinese)
- [10] 张明伟, 王梦尧, 马泉, 等. 稻茬晚播小麦不同品种产量及群体特征和氮效应比较研究[J]. 麦类作物学报, 2020, 38(7):1-11.
- Zhang M W, Wang M Y, Ma Q, et al. Differences in yield, population structure and nitrogen efficiency of different wheat varieties under late-sowing conditions following rice[J]. *Acta Triticeae*, 2020, 38(7):1-11. (in Chinese)
- [11] 徐德利, 王艳, 王兵, 等. 基于“雪压稻”灾情对江苏省淮河以北地区稻麦周年协调发展的思考[J]. 作物杂志, 2016, (3): 128-133.
- Xu D L, Wang Y, Wang B, et al. Ideas on coordinated development for annual production of rice and wheat in North of Huai River of Jiangsu Region based on the disaster of “rice over whelmed by snow”[J]. *Crop Journal*, 2016, (3):128-133. (in Chinese)
- [12] 程路, 谭方颖, 何亮, 等. 2018/2019 年冬季气象条件对农业生产的影响[J]. 中国农业气象, 2019, 40(5):337-339.
- Cheng L, Tan F Y, He L, et al. Impact of winter meteorological conditions on agricultural production in 2018/2019[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(5):337-339. (in Chinese)
- [13] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本[M]. 中国农业出版社, 2011:67-70.
- Yang W Y, Tu N M. Monographs of crop cultivation: southern edition[M]. China Agriculture Press, 2011:67-70. (in Chinese)
- [14] 江晓东, 张涛, 陈佳鑫, 等. 基于 WOFOST 模型的苏南地区春小麦种植适应性分析[J]. 南方农业学报, 2020, 51(2): 335-341.
- Jiang X D, Zhang T, Chen J X, et al. Adaptability of spring wheat planting in the south of Jiangsu based on WOFOST model[J]. *Southern Agricultural Journal*, 2020, 51(2):335-341.

- (in Chinese)
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].中国农业科技出版社,1999:309.
- Lu R K. Soil agrochemical analysis method[M]. China Agricultural Science and Technology Press,1999:309.(in Chinese)
- [16] 蒿宝珍,姜丽娜,方保停,等.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[J].生态学报,2011,31(17):4941-4951.
- Hao B Z, Jiang L N, Fang B T, et al. Effect of different nitrogen supply on the temporal and spatial distribution and remobilization of canopy nitrogen in winter wheat under limited irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17):4941-4951.(in Chinese)
- [17] 王之杰,王纪华,黄文江,等.冬小麦冠层不同叶层和茎鞘氮素与籽粒品质关系的研究[J].中国农业科学,2003,36(12):1462-1468.
- Wang Z J, Wang J H, Jiang W J, et al. Studies on the nitrogen state of leaf, culm and sheath at different layers in canopy and their relationship with grain quality in winter wheat[J]. China Agricultural Sciences, 2003, 36(12):1462-1468.(in Chinese)
- [18] Kichey T, Hirel B, Heumez E, et al. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers[J]. Field Crops Research, 2007, 102(1):22-32.
- [19] Frederick J R. Winter wheat leaf photosynthesis, stomatal conductance, and leaf nitrogen concentration during reproductive development[J]. Crop Science, 1997, 37(6): 1818-1826.
- [20] David M, Daniel W, Jean-Marc M. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 377-385.
- [21] 信志红,郭建平,谭凯炎,等.冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究[J].中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8):1205-1217.
- Xin Z H, Guo J P, Tan K Y, et al. Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English), 2019, 27(8):1205-1217.(in Chinese)
- [22] Farooq M, Bramley H, Palta J A, et al. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2011, 30(6): 491-507.
- [23] 张美微,王晨阳,敬海霞,等.灌浆期高温对冬小麦籽粒氨基酸含量和组成的影响[J].生态学报,2016,36(18):5725-5731.
- Zhang M W, Wang C Y, Jing H X, et al. Effects of high temperature during grain filling on the content and composition of amino acids in the grains of two winter wheat cultivars[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18):5725-5731.(in Chinese)