

长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响

丁晋利^{1,2} 武继承^{3,4} 杨永辉^{3,4} 冯浩¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 郑州师范学院地理与旅游学院, 郑州 450044;
3. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 4. 农业部作物高效用水原阳科学观测站, 原阳 453514)

摘要: 基于长期定位耕作试验(2006—2016年), 探讨长期传统翻耕、免耕和深松耕作对冬小麦关键生育期0~100 cm土层土壤含水率的影响, 分析长期免耕和深松耕作下冬小麦植株氮素积累和转运的特性。试验结果表明: 长期免耕和深松耕作较传统翻耕均不同程度提高了0~100 cm土层土壤含水率, 但在较干旱年份, 不同生育期免耕蓄水保墒效果优于深松耕作。从冬小麦扬花期到成熟期, 无论何种耕作方式氮素在茎和叶中的分配比例逐渐减小, 在穗中的分配比例逐渐增大。扬花期, 与传统翻耕相比, 连续2 a免耕分别提高茎、叶和穗的平均氮素积累量44.3%、80.5%和70.9%, 而连续2 a深松耕作未呈现显著变化; 成熟期, 连续2 a免耕和深松耕作较传统翻耕均显著降低了茎的平均氮素积累量, 增加了籽粒的平均氮素积累量($P < 0.05$), 且免耕优于深松耕作。此外, 与传统耕作相比, 免耕显著提高冬小麦植株营养器官氮素转运量、转移率和营养器官对籽粒的贡献率($P < 0.05$), 而深松耕作仅在较干旱年份未明显提高冬小麦植株营养器官转运量和对籽粒的贡献率。综上, 长期深松耕作并不能持续促进冬小麦植株氮素积累与转运, 对于干旱少雨年份免耕优于深松耕作。

关键词: 冬小麦; 保护性耕作; 氮素积累与转运; 土壤水分

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0240-07

Effects of Long-term Conservation Tillage on Nitrogen Accumulation and Translocation of Winter Wheat

DING Jinli^{1,2} WU Jicheng^{3,4} YANG Yonghui^{3,4} FENG Hao¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China

3. Institute of Plant Nutrition and Resource & Environmental Science,
Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

4. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China)

Abstract: To study the effects of long-term conservation tillage (no-tillage and subsoiling) on nitrogen accumulation and translocation characteristics of winter wheat, a ten-year (2006—2016) field experiment was carried out, and the effects of different tillage treatments, including traditional tillage, no-tillage and subsoiling on the soil water content in 0~100 cm during the key winter wheat growth stages were analysed. The results showed that long-term no-tillage and subsoiling treatments significantly increased the soil water content in 0~100 cm and no-tillage treatment was superior to subsoiling treatment in the dry year. The nitrogen distribution ratio in stem and leaf was gradually decreased, while it was gradually increased in wheat are from flowering to harvesting stage under three tillage treatments. Compared with conventional tillage treatment, average nitrogen accumulation amounts in stem, leaf and ear under 2-year continuous no-tillage treatment were increased by 44.3%, 80.5% and 70.9%, respectively, and there was no significant increase under 2-year continuous subsoiling treatment at flowering stage. At harvesting stage, no-tillage and subsoiling treatments significantly decreased the nitrogen accumulation in stem, while significantly increased its ear accumulation amount compared with conventional tillage treatment. Moreover, no-tillage treatment significantly increased the nitrogen translocation amount of winter wheat

收稿日期: 2016-10-25 修回日期: 2016-12-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)和国家自然科学基金项目(U1404404)

作者简介: 丁晋利(1978—), 女, 博士生, 郑州师范学院讲师, 主要从事土壤生态与节水农业研究, E-mail: dingjinli1978@163.com

通信作者: 冯浩(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

vegetative organs, translocation ratio, contribution ratio to grain ($P < 0.05$), while subsoiling treatment was non-sustainable to increase nitrogen translocation amount and ratio. In general, long-term effect of no-tillage treatment on nitrogen translocation of winter wheat was superior to that of subsoiling treatment, especially in the dry year.

Key words: winter wheat; conservation tillage; nitrogen accumulation and translocation; soil water

引言

随着中国人口快速增长和可利用耕地面积减少,粮食安全问题日趋严峻^[1]。小麦作为中国第一大粮食作物,如何提高其产量是作物科学研究的热点问题之一。氮素是营养元素中限制产量的首要因子,氮素的积累和转运对实现小麦增产具有重大意义^[2]。小麦开花前营养器官贮存氮素的再分配是籽粒中积累氮素的主要来源,约占籽粒氮素的53%~80.8%^[3]。小麦对氮素的吸收、转运和同化受土壤水分影响,尤其是小麦开花后期土壤水分^[4-6]。有研究认为,适度的干旱有利于小麦叶片氮素向籽粒中转运,进而促进籽粒氮素的积累^[7-8]。

保护性耕作是以秸秆覆盖和免耕播种技术为核心的一种新型耕作方法,它能够通过免耕、深松和残茬覆盖等措施改变土壤物理性质,增加土壤水分并提高氮素吸收利用,进而提高作物产量,有利于农业生产的可持续性发展^[9-12]。黄明等^[13]研究表明,免耕和深松耕作均能够改善旗叶光合特性,提高小麦开花后干物质生产量及向籽粒的转运量。郑成岩等^[14]研究认为,深松较传统翻耕降低了小麦生育后期土壤含水率,促进了营养器官中贮存的氮素向籽粒中的再分配。然而,以往关于保护性耕作方式下小麦氮素吸收利用的研究多是短期效应,长期保护性耕作对小麦氮素吸收利用的持续作用效果仍不清楚,尤其是长期免耕和深松耕作是否能够持续促进冬小麦植株氮素积累和转运有待进一步研究。

本文利用长期定位耕作试验,以长期免耕和深松耕作下冬小麦关键生育期土壤含水率为基础,探讨长期免耕和深松耕作对冬小麦氮素积累量、转运量及氮素利用效率的影响,旨在优化耕作管理,提高氮素利用效率,为保护性耕作措施推广提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验在河南省中部节水农业禹州试验基地(34.16°N、113.15°E,海拔高度150 m)进行。该地区多年平均降水量674.9 mm,其中60%以上集中在夏季,存在较严重的春旱、伏旱和秋旱;土壤为褐土,

土壤母质为黄土性物质,耕层有机质12.3 g/kg、全氮0.80 g/kg、水解氮47.82 mg/kg、速效磷6.66 mg/kg、速效钾114.8 mg/kg(均为质量比)。2014—2016年冬小麦季降水量分别为260.0 mm和193.2 mm,逐月降水量如图1所示。

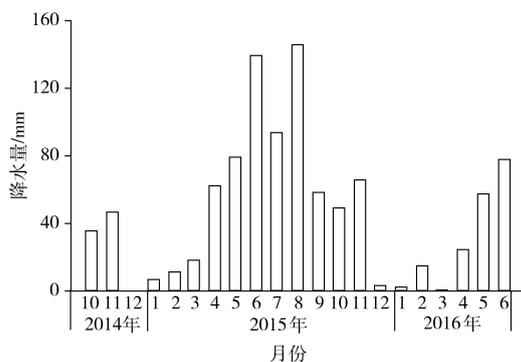


图1 禹州试验站2014—2016年冬小麦生育期逐月降水量
Fig.1 Distribution of monthly precipitation during winter wheat growth stages in 2014—2016 of Yuzhou experiment station

选取10 a长期定位试验(2006—2016)中的2 a试验用于研究(2014—2016)。试验处理分别为传统翻耕(CT)、免耕(NT)和深松(ST)处理,每个处理设3次重复。3种耕作方式具体操作方法:传统翻耕是在玉米收获后,将全部秸秆粉碎覆盖在地表,用犁铧全面深翻20~25 cm将秸秆深埋;免耕是玉米收获后,全部秸秆粉碎覆盖在地表,无其他措施;深松是玉米秸秆粉碎覆盖在地表后,用深松铲耕作,深度30~35 cm。种植的冬小麦品种为“矮抗58”,播种量150 kg/hm²,播种时间为10月中旬,收获时间为次年5月下旬,行距23 cm。冬小麦播种前施用氮肥(纯氮225 kg/hm²)、过磷酸钙(P₂O₅ 105 kg/hm²)和钾肥(75 kg/hm²),一次性底施。小区面积为36 m²(6 m×6 m)。

1.2 田间取样与测定方法

于冬小麦苗期、越冬期、拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期采集植株样,具体采集日期见表1。其中,苗期、越冬期、拔节期留取整株样品,开花期和灌浆期植株样品分为叶片、茎秆和穗3部分,成熟期分为籽粒、叶片、茎秆和穗4部分。样品于105℃杀青并在70℃干燥至质量恒定,测定干物质质量。在冬小麦关键生育期(拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期)采用土钻取土,烘干法测定土壤含水率。采用浓硫

酸消煮-半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量。

表1 植株取样时间

Tab.1 Time of collecting plant samples

| 生育期 | 取样时间 | |
|-----|------------|------------|
| | 2014—2015年 | 2015—2016年 |
| 苗期 | 2014-12-06 | 2015-12-08 |
| 越冬期 | 2015-02-11 | 2016-02-10 |
| 拔节期 | 2015-03-20 | 2016-03-20 |
| 扬花期 | 2015-04-21 | 2016-04-19 |
| 灌浆期 | 2015-05-13 | 2016-05-11 |
| 成熟期 | 2015-06-04 | 2016-05-30 |

1.3 计算方法

各时期不同器官氮素积累量 (kg/hm^2) 是氮素含量与干物质质量的乘积; 各时期的氮素分配比例 (%) 是各器官氮素积累量占地上部植株氮素积累总量的百分比; 营养器官氮素转移量 (kg/hm^2) 是开花期营养器官氮素积累量减去成熟期氮素积累量; 营养器官氮素转移率 (%) 是营养器官氮素转移量占开花期营养器官氮素积累量的百分比; 营养器官氮素贡献率 (%) 是营养器官氮素转移量占成熟期籽粒氮素积累量的百分比。

1.4 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 处理数据; 采用 SPSS 进行显著性检验 (LSD 法); 采用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作处理对 0~100 cm 土壤含水率的影响

与传统翻耕相比, 免耕均不同程度地增加了冬

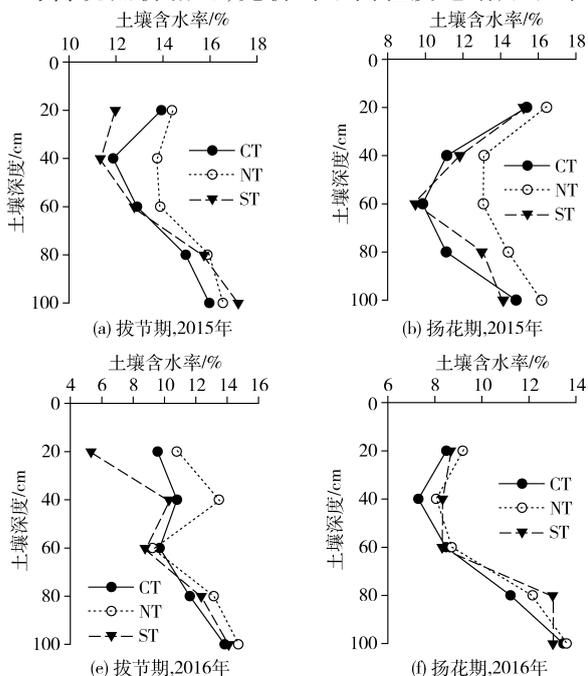


图2 不同耕作方式冬小麦关键生育期 0~100 cm 土壤质量含水率变化

小麦关键生育期 (拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期) 0~100 cm 土层土壤平均含水率; 深松耕作在冬小麦拔节期未明显提高 0~100 cm 土壤平均含水率, 但显著提高了扬花期和成熟期的土壤平均含水率 (图 2)。在冬小麦扬花期、灌浆期和成熟期 60 cm 土层处, 3 种耕作处理下的土壤含水率均达到最低值, 0~60 cm 土壤含水率随深度增加而降低, 而 60~100 cm 土壤含水率随深度增加有增加的趋势。其中 0~40 cm 属耕作层, 土壤含水率受耕作处理明显。2015 年, 免耕较传统翻耕分别提高冬小麦拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期 0~40 cm 土壤平均含水率 8.9%、11.5%、14.3% 和 8.6%; 深松耕作分别提高冬小麦扬花期、灌浆期和成熟期 0~40 cm 土壤平均含水率 2.0%、3.6% 和 10.8%。2016 年免耕较传统翻耕分别提高冬小麦拔节期和扬花期土壤平均含水率 19.1% 和 9.2%, 而降低了成熟期土壤平均含水率 5.3%; 深松耕作较传统翻耕仅提高了冬小麦扬花期土壤平均含水率 7.6%, 在冬小麦拔节期、灌浆期和成熟期均表现为负效应, 这是由于连续深松耕作强烈改变了土壤物理性质和土壤结构, 致使孔隙度增大, 持水能力降低, 加之 2015—2016 年冬小麦季降水量偏低, 墒情变差^[15]。可见, 免耕和深松耕作的蓄水保墒效果受降水量影响, 在较干旱年份, 不同生育期土壤蓄水保墒效果免耕优于深松耕作。

2.2 不同耕作处理对冬小麦植株氮素积累量的影响

从冬小麦整个生育期来看, 氮素积累量呈先增加后降低的趋势, 在拔节期达到最大值 (图 3, 同一

时期,不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。2014—2015 年冬小麦关键生育期植株氮素积累量明显高于 2015—2016 年同生育期氮素积累量,这是由于 2015—2016 年冬小麦季降水量偏低造成的。2014—2015 年,免耕处理在苗期、拔节期、扬花期和成熟期的氮素积累量较传统翻耕处理显著提高,且在拔节期达到最高值 794.54 kg/hm^2 ,这是由于一方面冬小麦在拔节期分蘖株数最多,另一方面免耕处理较其他耕作处理土壤含水率较高,致使冬

小麦植株生物量最高,进而使其氮素积累量达到最大值。连续 2 a 免耕在拔节期、扬花期、灌浆期和成熟期的氮素积累量较传统翻耕分别提高 14.0%、48.2%、75.1% 和 11.7%。而连续 2 a 深松耕作仅在越冬期显著提高冬小麦植株氮素积累量,这可能是由于 2014—2016 年冬小麦越冬期降水量均较大(图 1),深松耕作提高土壤表层(0~40 cm)含水率,导致冬小麦植株氮素积累量提高。

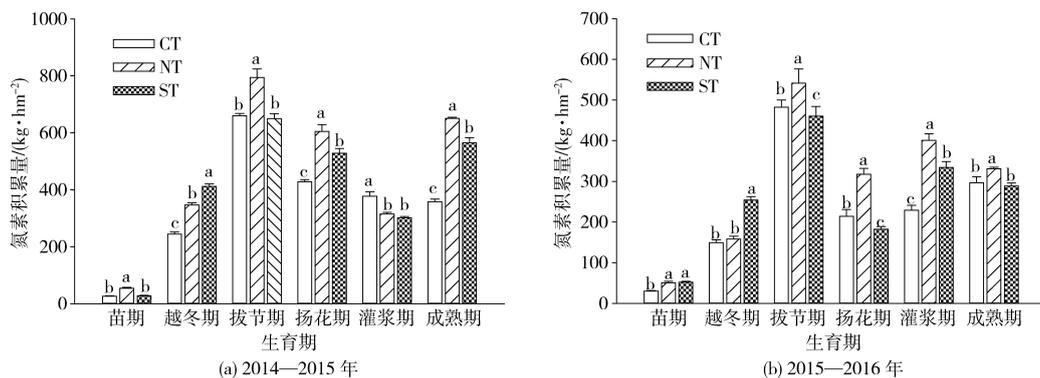


图 3 不同耕作处理冬小麦不同生育期氮素积累量

Fig. 3 Nitrogen accumulation amount during winter wheat growth stages under different tillage treatments

2.3 不同耕作处理氮素在冬小麦茎、叶、穗中的分配

从冬小麦扬花期、灌浆期到成熟期,3 种耕作处理氮素在茎和叶中的分配比例逐渐减小,在穗中的分配比例逐渐增大。其中,扬花期氮素分配比例由

大到小为:茎、叶、穗,成熟期氮素分配比例由大到小为:籽粒(穗)、茎、叶(表 2)。扬花期,连续 2 a 免耕处理较传统翻耕处理茎、叶和穗的平均氮素积累量分别提高 44.3%、80.5%、70.9%。这是由于冬小

表 2 耕作方式对冬小麦各器官氮素积累与分配的影响

Tab. 2 Effects of different tillage treatments on nitrogen accumulation and distribution in various organs of winter wheat

| 年份 | 生育期 | 处理 | 茎 | | 叶 | | 穗 | | 籽粒 | |
|-------------|-----|----|---|--------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|--------------------|
| | | | 氮积累量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 分配 比例/% | 氮积累量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 分配 比例/% | 氮积累量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 分配 比例/% | 氮积累量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 分配 比例/% |
| 2014—2015 年 | 扬花期 | CT | 215.97 ^b | 50.66 ^a | 163.19 ^c | 38.17 ^b | 48.47 ^c | 11.34 ^c | | |
| | | NT | 238.15 ^a | 42.16 ^b | 231.83 ^a | 41.05 ^a | 94.81 ^b | 16.79 ^b | | |
| | | ST | 214.10 ^b | 40.52 ^b | 212.55 ^b | 40.23 ^a | 101.73 ^a | 19.25 ^a | | |
| | 灌浆期 | CT | 126.67 ^a | 33.55 ^a | 80.12 ^a | 21.22 ^b | 170.82 ^a | 45.24 ^b | | |
| | | NT | 69.89 ^c | 22.22 ^b | 75.98 ^a | 24.16 ^a | 168.66 ^a | 53.62 ^a | | |
| | | ST | 99.62 ^b | 33.02 ^a | 56.07 ^b | 18.59 ^c | 145.99 ^b | 48.39 ^b | | |
| | 成熟期 | CT | 65.18 ^a | 12.45 ^a | 73.69 ^a | 14.07 ^a | 384.70 ^b | 73.48 ^b | 356.12 ^c | 68.02 ^b |
| | | NT | 59.07 ^b | 9.80 ^b | 68.76 ^b | 11.43 ^a | 474.90 ^a | 78.79 ^b | 429.39 ^a | 71.24 ^a |
| | | ST | 46.67 ^c | 8.25 ^b | 38.03 ^c | 6.73 ^b | 480.34 ^a | 85.01 ^a | 398.52 ^b | 70.52 ^a |
| 2015—2016 年 | 扬花期 | CT | 110.58 ^b | 51.65 ^a | 57.83 ^b | 27.01 ^b | 45.69 ^b | 21.34 ^a | | |
| | | NT | 150.39 ^a | 50.06 ^a | 80.34 ^a | 27.03 ^{ab} | 66.78 ^a | 22.47 ^a | | |
| | | ST | 85.89 ^c | 47.02 ^b | 55.97 ^b | 30.64 ^a | 40.81 ^c | 22.34 ^a | | |
| | 灌浆期 | CT | 69.39 ^b | 30.30 ^a | 25.03 ^c | 10.93 ^c | 134.56 ^c | 58.76 ^a | | |
| | | NT | 106.09 ^a | 27.34 ^b | 76.85 ^a | 19.81 ^a | 204.99 ^a | 53.62 ^b | | |
| | | ST | 94.15 ^a | 28.17 ^a | 43.70 ^b | 13.07 ^b | 196.41 ^b | 58.76 ^a | | |
| | 成熟期 | CT | 54.02 ^a | 17.86 ^a | 27.75 ^b | 9.17 ^b | 220.69 ^b | 72.96 ^b | 211.61 ^b | 69.93 ^b |
| | | NT | 43.89 ^b | 14.58 ^b | 35.57 ^a | 11.81 ^a | 231.62 ^a | 76.93 ^{ab} | 226.32 ^a | 75.17 ^a |
| | | ST | 35.01 ^c | 12.14 ^b | 16.85 ^c | 13.01 ^a | 236.57 ^a | 82.02 ^a | 223.94 ^a | 77.64 ^a |

注:同一时期同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

麦拔节—扬花期免耕处理土壤水分显著高于传统翻耕,促进小麦营养器官生长,增加了茎和叶的生物量,进而导致其氮素积累量增加。与传统翻耕处理相比,深松耕作在2015年冬小麦扬花期显著提高茎、叶和穗的氮素积累量,而在2016年降低了茎、叶和穗的氮素积累量,这是由于2015年冬小麦扬花期土壤含水率显著高于2016年同生育期土壤含水率。成熟期,2a免耕和深松耕作分别降低了茎的平均氮素积累量14.1%和31.8%,而显著提高了穗和籽粒的氮素积累量($P < 0.05$),说明氮素由茎叶转运到穗和籽粒。其中关于籽粒中的氮素积累量,2a免耕和深松耕作较传统翻耕分别提高了43.1%和32.4%。

2.4 扬花后冬小麦植株氮素向籽粒中的转运

由表3可知,连续2a免耕处理显著提高冬小麦植株营养器官氮素转移量、转移率和对籽粒的贡献

率($P < 0.05$),而深松耕作在降水量较少年份(2015—2016年)未显著提高冬小麦植株营养器官氮素转移量及对籽粒的贡献率。其中,2015年免耕处理较传统翻耕处理分别提高营养器官氮素转运量、转移率和对籽粒的贡献率42.5%、14.8%和18.1%;深松耕作处理分别提高42.4%、26.4%和27.1%。然而,2016年免耕较传统翻耕显著提高营养器官氮素转运量、转移率和对籽粒贡献率($P < 0.05$);而深松耕作与传统翻耕处理无显著性差异,这可能是由于2016年冬小麦拔节期深松耕作0~40cm土壤含水率较低,抑制了冬小麦植株氮素积累,不利于小麦植株氮素转运,最终致使深松耕作处理下冬小麦植株氮素转运量及转运率偏低。综上,深松处理并不能持续促进氮素向籽粒中的转运和吸收,就小麦植株氮素转运持续性效果来看,免耕优于深松耕作。

表3 不同耕作方式冬小麦营养器官氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率

Tab.3 Nitrogen translocation amount and translocation rate and contribution rate to grains from wheat vegetative organs under different tillage treatments

| 年份 | 处理 | 营养器官氮素转运量/(kg·hm ⁻²) | 营养器官氮素转运率/% | 营养器官对籽粒贡献率/% |
|------------|----|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 2014—2015年 | CT | 240.29 ± 3.08 ^b | 63.40 ± 1.10 ^c | 67.49 ± 1.20 ^c |
| | NT | 342.15 ± 5.83 ^a | 72.80 ± 1.14 ^b | 79.68 ± 1.19 ^b |
| | ST | 341.95 ± 4.87 ^a | 80.15 ± 1.14 ^a | 85.80 ± 1.22 ^a |
| 2015—2016年 | CT | 86.73 ± 2.06 ^b | 51.50 ± 1.22 ^c | 40.78 ± 0.85 ^b |
| | NT | 160.88 ± 3.81 ^a | 69.84 ± 1.52 ^a | 71.18 ± 1.33 ^a |
| | ST | 89.93 ± 1.47 ^b | 63.39 ± 1.04 ^b | 40.35 ± 0.56 ^b |

3 讨论

3.1 冬小麦植株氮素积累与分配特征

在小麦生长过程中,氮素以光合同化物的形式积累,氮素的积累与转运与营养物质的积累与转运密切相关。ZHU等^[16]研究表明,小麦植株氮素积累量随生育进程推进而不断增加,至成熟期达峰值,但也有研究认为,成熟期比开花期氮素积累量有所下降^[17-18]。本研究结果发现,冬小麦植株氮素积累量至拔节期达到峰值,在成熟期氮素积累量有所下降。这主要是由于拔节期冬小麦分蘖株数在整个生育期达到最大值,致使生物量达到最大,进而影响氮素积累量。开花至成熟阶段是冬小麦氮素吸收分配的关键时期,开花后营养器官氮素的转移对籽粒氮素积累有较大贡献^[19]。本研究中扬花前营养器官对籽粒贡献率高达66.49%~85.80%,这与前人研究结果一致^[20]。这说明冬小麦扬花前氮素转运对籽粒的积累作用远高于扬花后吸收的氮素。

3.2 耕作方式对冬小麦植株氮素积累与转运的影响

不同耕作方式由于对土壤扰动程度不同,使农

田降水入渗和土壤水分蒸发条件有所差异,致使不同耕作方式的蓄水保墒能力不同。长期免耕因减少土壤表层扰动,减少水分散失,具有良好的蓄水保墒作用^[21-22],深松耕作可打破犁底层,增加土壤水分入渗,进而提高土壤蓄水保墒能力^[23-24]。免耕和深松耕作的蓄水保墒效果受降水状况影响,许迪等^[15]研究发现在平水年和干旱年,免耕0~40cm土层土壤蓄水量平均增加7.1%和15.4%,免耕的蓄水保墒作用在干旱少雨条件下更加明显。然而,余海英等^[25]研究表明免耕处理作物全生育期土壤剖面的平均含水率均明显高于传统翻耕,两者间的差异在降水量较大的情况下表现尤为突出。本研究结果表明,免耕在降水量较大的年份(2014—2015年)冬小麦关键生育期的蓄水保墒效果优于干旱年份(2015—2016年)。另外,王小彬等^[26]研究表明,在麦田夏闲期末,免耕覆盖和深松处理土壤蓄水量显著提高,由大到小表现为:免耕、深松耕作、翻耕。也有研究表明连续深松耕作强烈改变了土壤结构,增大了土壤孔隙度,造成土壤持水能力下降,墒情变差^[15]。本研究结果也表明,在降水量较少的年份

(2015—2016年),连续深松耕作降低了冬小麦关键生育期(拔节期、灌浆期和成熟期)的土壤含水率。可见,免耕的蓄水保墒效果优于深松耕作,尤其在干旱年份表现明显。

土壤水分状况是影响冬小麦氮素吸收、积累及转运的重要因素之一^[27-29]。水分亏缺能够显著降低小麦的氮素吸收量^[30-31]、氮素利用效率和籽粒产量^[32]。本研究结果表明,2015—2016年干旱年份冬小麦各生育期的植株氮素积累量显著低于2014—2015年冬小麦同生育期的氮素积累量。张永丽等^[33]研究认为小麦开花后土壤含水率过高会使其营养器官氮素向籽粒的转移量和转移率降低。郑成岩等^[14]指出深松耕作促进了小麦生育中后期对表层土壤水分的消耗,降低了小麦生育后期的土壤含水率,促进了营养器官中贮存的氮素向籽粒中的再分配。然而,也有研究^[34-35]表明,冬小麦不同生育期中度和重度干旱胁迫能减少冬小麦氮素吸收量,并降低花前贮藏氮素向籽粒中的转移量。本研究发现深松耕作在降水量较大的年份(2014—2015年)能够有效提高冬小麦生长前期土壤表层含水率,促进冬小麦营养器官氮素积累量,降低扬花后期土壤含水率,促进营养器官中贮存的氮素向籽粒转运,且由大到小表现为:深松耕作、免耕、传统翻耕。但对于较干旱的年份,连续深松耕作降低了冬小麦拔节期和灌浆期土壤表层含水率,干旱胁迫增大,抑制小麦植株氮素积累,进而影响后期小麦茎和叶中氮素向籽粒的转运。而免耕在干旱少雨的年份蓄水保墒优于深松耕作,提高了冬小麦生长前期土壤含水率,促进了冬小麦植株氮素积累,进而提高了小麦植株氮素转运营养器官氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率。综上,深松耕作并不能持续促进冬小麦植株氮素积累与转运,对于干旱少雨年份免耕优于深松耕作。

4 结论

(1)与传统翻耕相比,免耕和深松耕作均不同程度地增加了0~100 cm土层土壤平均含水率,但免耕和深松耕作的蓄水保墒效果受降水状况影响。在降水量较多的年份(2014—2015年),免耕和深松耕作较传统翻耕显著提高了冬小麦关键生育期(扬花期、灌浆期和成熟期)0~40 cm土壤平均含水率;而在降水量较少的年份(2015—2016年),免耕较传统翻耕分别提高冬小麦拔节期和扬花期土壤平均含水率19.1%和9.2%,而深松耕作仅提高了冬小麦扬花期土壤平均含水率,在冬小麦拔节期、灌浆期和成熟期均表现为负效应。可见,在干旱年份,不同生育期土壤蓄水保墒效果免耕优于深松耕作。

(2)从冬小麦整个生育期来看,氮素积累量呈先增加后降低的趋势,在拔节期达到最大值。从冬小麦扬花期、灌浆期到成熟期,3种耕作方式氮素在茎和叶中的分配比例逐渐减小,在穗中的分配比例逐渐增大。与传统翻耕相比,连续2 a免耕在扬花期分别提高茎、叶和穗的平均氮素积累量44.3%、80.5%、70.9%,在成熟期降低了茎的平均氮素积累量14.1%,而显著增加了穗和籽粒的平均氮素积累量;连续2 a深松耕作在扬花期并未显著增加茎、叶和穗的平均氮素积累量,在成熟期显著降低了茎的平均氮素积累量,增加穗和籽粒的平均氮素积累量。其中,籽粒的氮素积累量由大到小表现为:免耕、深松、传统翻耕。

(3)与传统翻耕相比,免耕显著提高营养器官氮素转移量、转移率和对籽粒的贡献率($P < 0.05$)。深松耕作并不能持续促进氮素向籽粒中的转运与吸收,在干旱年份,长期免耕优于深松耕作更能促进氮素的积累与转运。

参 考 文 献

- 胡富亮,郭德林,高杰,等. 种植密度对春玉米干物质、氮素积累与转运及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 60-66.
HU Fuliang, GUO Delin, GAO Jie, et al. Effects of planting densities on dry matter and nitrogen accumulation and grain yield in spring maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(6): 60-66. (in Chinese)
- OTTOMAN M J, POPE N V. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1883-1892.
- 张庆江,张立言,毕桓武. 春小麦品种氮的吸收积累和转运特征及与籽粒蛋白质的关系[J]. 作物学报, 1997, 23(6): 712-718.
ZHANG Qingjiang, ZHANG Liyan, BI Huanwu. The absorption, accumulation and translocation of nitrogen and their relationships to grain protein content in spring wheat variety[J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(6): 712-718. (in Chinese)
- WANG H, MCCAIG T N, DEPAUW R M, et al. Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(4): 699-707.
- 王晓英,贺明荣. 水氮耦合对济麦20籽粒蛋白质组分及品质的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 126-131.
WANG Xiaoying, HE Mingrong. Coupling effects of irrigation and nitrogen fertilizer on protein composition and quality of winter wheat cultivar Jimai 20[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(1): 126-131. (in Chinese)

- 6 王德梅, 赵广才, 常旭虹, 等. 土壤相对含水量对冬小麦氮素积累、蛋白质组成和加工品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(9):1245-1252.
WANG Demei, ZHAO Guangcai, CHANG Xuhong, et al. Effects of soil water content on nitrogen accumulation, protein composition and processing quality of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(9):1245-1252. (in Chinese)
- 7 许振柱, 王崇爱, 李晖. 土壤干旱对小麦叶片光合和氮素水平及其转运效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4):75-79.
XU Zhenzhu, WANG Chongai, LI Hui. Effects of soil drought on photosynthesis, nitrogen and nitrogen translocation efficiency in wheat leaves[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4):75-79. (in Chinese)
- 8 郑成岩, 于振文, 王西芝, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6):1324-1332.
ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, WANG Xizhi, et al. Effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO₃-N content in high-yield wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6):1324-1332. (in Chinese)
- 9 SINGH B, CHANASYK D S, MCGILL W B. Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45(1-2):59-74.
- 10 DE VITA P, DI PAOLO E, FECONDO G, et al. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1-2):69-78.
- 11 RILEY H C F, BLEKEN M A, ABRAHAMSEN S, et al. Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of Central Norway[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1-2):79-93.
- 12 朱炳耀, 黄建华, 黄永耀, 等. 连续免耕对中稻产量及土壤理化性质的影响[J]. 福建农业学报, 1999, 19(增刊1):159-163.
ZHU Bingyao, HUANG Jianhua, HUANG Yongyao, et al. Effect of continuous tillage-free practice on the grain yield of semilate rice and soil physicochemical property[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 1999, 19(Supp. 1):159-163. (in Chinese)
- 13 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1):50-54.
HUANG Ming, WU Jinzhi, LI Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1):50-54. (in Chinese)
- 14 郑成岩, 于振文, 王东, 等. 耕作方式对冬小麦氮素积累与转运及土壤硝态氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1303-1311.
ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effects of tillage practices on nitrogen accumulation and translocation in winter wheat and NO₃-N content in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6):1303-1311. (in Chinese)
- 15 许迪, SCHMI R, MERMOUD A. 耕作方式对土壤水动态变化及夏玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3):101-106.
XU Di, SCHMI R, MERMOUD A. Effects of tillage practices on the variation of soil moisture and the yield of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3):101-106. (in Chinese)
- 16 ZHU X K, GUO W S, FENG C N, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different end uses[J]. Plant Nutrition & Fertilizing Science, 2005, 11(2):148-154.
- 17 SCHENK M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level[J]. Plant and Soil, 1996, 181(1):131-137.
- 18 HOU Y L, O'BRIEN L, ZHONG G R. Study on the dynamic changes of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(4):493-499.
- 19 王秀英. 不同水氮条件对燕麦氮素吸收转运和积累的影响[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2014, 39(11):101-107.
WANG Xiuying. On effect of different water and nitrogen condition on nitrogen absorption, translocation and accumulation of oat [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science, 2014, 39(11):101-107. (in Chinese)
- 20 PALTA J A, KOBATA T, TURNER N C, et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits[J]. Crop Science, 1994, 34(1):118-124.
- 21 张国盛, CHAN K Y, LI G D, 等. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2722-2728.
ZHANG Guosheng, CHAN K Y, LI G D, et al. Long-term effects of tillage systems and rotation on selected soil properties in cropping zone of Southern NSW, Australia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6):2722-2728. (in Chinese)
- 22 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双处理轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报, 2006, 26(4):1176-1185.
HUANG Gaobao, GUO Qingyi, ZHANG Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4):1176-1185. (in Chinese)
- 23 李素娟, 李琳, 陈阜, 等. 保护性耕作对华北平原冬小麦水分利用的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(增刊1):115-120.
LI Sujuan, LI Lin, CHEN Fu, et al. Effects of conservation tillage on water use of winter wheat in North China Plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(Supp. 1):115-120. (in Chinese)
- 24 张丽华, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬保护性耕作对冬小麦-春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7):1750-1758.
ZHANG Lihua, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7):1750-1758. (in Chinese)

- bread[J]. *European Food Research & Technology*, 2011, 232(3): 405–413.
- 18 SALINAS M V, ZULETA A, RONAYNE P, et al. Wheat flour enriched with calcium and inulin: a study of hydration and rheological properties of dough[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3129–3141.
- 19 KERCH G, GLONIN A, ZICANS J, et al. A DSC study of the effect of ascorbic acid on bound water content and distribution in chitosan-enriched bread rolls during storage[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2012, 108(1): 73–78.
- 20 王金虎. 不同亲水胶体对速冻水饺皮品质影响的研究[D]. 无锡:江南大学, 2009.
WAN Jinhu. Effects of different hydrocolloids on quality of quick-frozen dumpling skin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- 21 ENGELSEN S B, JENSEN M K, PEDERSEN H T, et al. NMR-baking and multivariate prediction of instrumental texture parameters in bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2001, 33(1): 59–69.
- 22 LAI H M, HWANG S C. Water status of cooked white salted noodles evaluated by MRI[J]. *Food Research International*, 2004, 37(10): 957–966.
- 23 LIU J, LUO D, Li X, et al. Effects of inulin on the structure and emulsifying properties of protein components in dough[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210(21): 235–241.
- 24 BRENNAN C S, KURI V, TUDORICA C M. Inulin-enriched pasta: effects on textural properties and starch degradation[J]. *Food Chemistry*, 2004, 86(2): 189–193.
- 25 张雅媛. 玉米淀粉与亲水性胶体协同性和作用机理的研究[D]. 无锡:江南大学, 2012.
ZHANG Yayuan. Synergistic effect and mechanism of corn starch and hydrophilic[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012. (in Chinese)
- 26 GLIBOWSKI P. Rheological properties and structure of inulin- whey protein gels[J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(8): 443–449.
-

(上接第 246 页)

- 25 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99–104.
YU Haiying, PENG Wenying, MA Xiu, et al. Effects of no tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99–104. (in Chinese)
- 26 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(9): 1044–1049.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, JIN Ke, et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(9): 1044–1049. (in Chinese)
- 27 XU Z Z, YU Z W, WANG D, et al. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes [J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2005, 191(6): 439–449.
- 28 范雪梅, 戴廷波, 姜东, 等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 63–67.
FAN X M, DAI T B, JIANG D, et al. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and waterlogging from anthesis to maturity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 63–67. (in Chinese)
- 29 ZHAO G C, HE Z H, LIU L H, et al. Study on the co-enhancing regulating effect of fertilization and watering on the main quality and yield in Zhongyou 9507 high gluten wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(3): 351–356.
- 30 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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339–1343.
- 31 XU Z Z, YU Z W, WANG D. Nitrogen translocation in wheat plants under soil water deficit[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1–2): 291–303.
- 32 LI F S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, water status and applied nitrogen on water and nitrogen-use efficiencies of wheat[J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 279–289.
- 33 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[J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 870–878.
ZHANG Yongli, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 870–878. (in Chinese)
- 34 樊小林, 李玲, 何文勤, 等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 131–137.
FAN Xiaolin, LI Ling, HE Wenqin, et al. Effect of nitrogen fertilizer, water stress and the genotypes on nitrogen uptake of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 131–137. (in Chinese)
- 35 刘恩科, 梅旭荣, 龚道枝, 等. 不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 555–562.
LIU Enke, MEI Xurong, GONG Daozhi, et al. Effects of drought on N absorption and utilization in winter wheat at different developmental stages[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2010, 34(5): 555–562. (in Chinese)