植物营养与肥料学报 2012,18(6):1303-1311
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

郑成岩[1,2], 于振文[1], 王 东[1*], 张永丽[1], 石 玉[1]
(1 山东农业大学农学院,农业部作物生理生态与耕作重点实验室,山东泰安 271018;
2 中国农业科学院作物科学研究所,农业部作物生理生态重点实验室,北京 100081)

摘要: 以济麦 22 为试验材料,在大田条件下设置条旋耕(SR)、深松+条旋耕(SRS)、深松+旋耕(RS)、旋耕(R)和翻耕(P) 5 个耕作方式处理,研究了耕作方式对冬小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响。结果表明,1)深松+条旋耕和深松+旋耕处理小麦开花至成熟期 20—140 cm 各土层的土壤含水量较低;拔节期之后的小麦氮素吸收强度、开花和成熟期植株氮素积累量、成熟期氮素向子粒中的分配比例及开花期营养器官中贮存的氮素向子粒中的转运量均高于条旋耕和旋耕处理;深松+条旋耕和深松+旋耕处理成熟期氮素向子粒中的分配量高于翻耕,翻耕高于旋耕和条旋耕处理。2)深松+条旋耕和深松+旋耕处理成熟期 0—80 cm 各土层的土壤硝态氮含量低于翻耕处理,翻耕低于旋耕和条旋耕处理,条旋耕最高;深松+旋耕在 120—160 cm 土层的土壤硝态氮含量高于其他处理;各处理在 160—200 cm 土层的土壤硝态氮含量无显著差异。3)深松+旋耕和深松+条旋耕的子粒产量和氮肥偏生产力最高且两者无显著差异,翻耕次之,旋耕和条旋耕低于上述处理。在本试验条件下,综合考虑氮素利用、子粒产量和土壤中硝态氮的淋溶,深松+条旋耕为最佳耕作方式,可供生产中参考。

关键词: 耕作方式;小麦;氮素积累与转运;土壤硝态氮含量;子粒产量
中图分类号: S341;S512.1.01　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1303-09

Effects of tillage practices on nitrogen accumulation and translocation in winter wheat and NO_3^--N content in soil

ZHENG Cheng-yan[1,2], YU Zhen-wen[1], WANG Dong[1,*], ZHANG Yong-li[1], SHI Yu[1]
(*1 College of Agriculture, Shandong Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System, Ministry of Agriculture, Tai'an 271018, China; 2 Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract: Conservation tillage practices, including no-tillage, rotary tillage, subsoil tillage and so on, are applied widely for wheat (*Triticum aestivum*) production in Northern China. They are primarily used because of their positive effects on soil fertility, water conservation and crop yield. Tillage practices affect not only soil properties and grain yield but also plant nitrogen metabolism. To determine the effects of tillage practices on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO_3^--N content, a field experiment was carried out on high fertility soil with organic matter 14.5 g/kg, alkali-hydrolysable N 106.8 mg/kg, available P 35.2 mg/kg and available K 116.9 mg/kg in Shijiawangzi village, Yanzhou city, Shandong province, China, using the wheat cultivar, Jimai 22, which has high yield and medium gluten potential. There were five treatments, strip rotary tillage (SR), strip rotary tillage after subsoiling (SRS), rotary tillage (R), rotary tillage after subsoiling (RS) and plowing tillage (P). There were three replicates for each treatment. The plot area was 4 m×4 m and a 2 m wide protective belt was left between every two adjacent experimental plots. The basic seedling number was 180 plant/m^2.

收稿日期: 2012-04-04　　**接受日期:** 2012-08-13
基金项目: 国家自然科学基金(31171498);国家小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-19)资助。
作者简介: 郑成岩(1982—),男,山东即墨人,博士,主要从事农田生态与耕作制度研究。E-mail: qdjmzcy@163.com
*通讯作者 Tel: 0538-8247828, E-mail: wangd@sdau.edu.cn

The results indicate that the soil moisture contents of SRS and RS treatments in 20-140 cm layers are lower than those of the SR and R treatments from the anthesis to the maturity, respectively. The nitrogen uptake intensities after the jointing, nitrogen accumulation amounts in plant at the anthesis and the maturity, nitrogen distribution proportions in grain at the maturity and the nitrogen translocation amounts from vegetative organs to grain after the anthesis are higher in SRS and RS treatments than those in SR and R treatments. The nitrogen distribution amounts in grain at the maturity are the highest in SRS and RS treatments, and followed by P treatments which is higher than those in SR and R treatments. The soil NO_3^--N contents in 0-80 cm soil layers in SRS and RS treatments are lower than that in P treatment, and the contents in SR and R treatments are higher than that in P treatment, in which the content in SR treatment is the highest. The soil NO_3^--N content in 120-160 cm soil layer of RS is higher than those of the others, and there are no significant differences of the contents in 160-200 cm soil layers among the five treatments. The SRS and RS treatments gain the highest grain yields and nitrogen partial factor productivity which have no significant differences between them, and then the P treatment, followed by R and SR treatments. Based on a comprehensive consideration of nitrogen use efficiency, grain yield and soil NO_3^--N content, we recommend that the SRS is the most appropriate tillage practice in high yield and benefit production of wheat in Northern China.

Key words: tillage practice; wheat; nitrogen accumulation and translocation; soil NO_3^--N content; grain yield

保护性耕作是一种以秸秆覆盖处理和免耕播种技术为核心的新型耕作方法,具有改善土壤结构、控制水土流失、增加土壤水分和提高作物产量等优点,已成为农业可持续发展的趋势[1-2]。少免耕具有良好的保墒作用,与常规翻耕处理相比较,冬小麦生育期内免耕和深松的0—200 cm土层土壤贮水量分别增加了5.5%和4.5%[3],深松处理的棵间蒸发量可降低26%左右[4]。有研究表明,少耕覆盖和免耕覆盖可以提高小麦产量7.2%～18.4%[5-6];而Borghei等[7]研究认为,多年免耕导致土壤压实,容重增大,产量降低。土壤深松可降低土壤容重,增加土壤的通透性[8],改善旗叶光合特性,提高小麦开花后干物质生产量及向子粒的转运量,获得高的子粒产量[9]。

硝态氮是农田氮素淋失的主要形式,容易随水分运移出作物根层以下直至进入地下水,导致地下水污染[10],损失的氮包括来源于土壤的氮,残留的肥料氮和当季施入的肥料氮[11]。土壤耕作因影响土壤矿化和水分运动而影响硝态氮的淋失,通过改变土壤的理化性质和生物环境进而影响硝态氮在土体表层的积累[12]。有研究表明保护性耕作通过减少地表径流而减少硝态氮的流失[13],而Tan等[14]研究认为保护性耕作提高了土壤生物的数量和活性,形成大的土壤孔径,加剧了硝态氮的淋溶损失。

前人的研究多集中在耕作方式对土壤理化性状和作物产量的影响方面,而耕作方式对小麦植株氮素积累与转运影响的研究鲜见报道,关于耕作方式对土壤硝态氮淋溶的研究结果尚不一致。为此,本试验研究不同耕作模式对小麦植株氮素积累与转运、土壤硝态氮含量、产量和氮素利用效率的影响,旨在为黄淮海麦区确定高产高效生态安全的小麦耕作方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于2008～2009小麦生长季在山东省兖州市小孟镇史家王子村进行,供试品种为高产小麦济麦22。试验设置5种耕作方式,分别为条旋耕(SR, strip rotary tillage)、深松+条旋耕(SRS, strip rotary tillage after subsoiling)、旋耕(R, rotary tillage)、深松+旋耕(RS, rotary tillage after subsoiling)、翻耕(P, plowing tillage)。播种前试验田0—20 cm土层土壤有机质含量14.5 g/kg、全氮10.3 g/kg、碱解氮106.81 mg/kg、速效磷35.18 mg/kg和速效钾116.90 mg/kg。小麦生育期间降水量在播种至拔节期60.7 mm,拔节至开花期53.6 mm,开花至成熟期26.3 mm。播前基肥施用量为氮肥(N)105 kg/hm^2,磷肥(P_2O_5) 150 kg/hm^2,钾肥(K_2O) 150 kg/hm^2,拔节期开沟追施N 135 kg/hm^2。2008年10月8日播种,2009年6月10日收获。小区面积为16 m^2(4 m×4 m),小区之间设置2 m宽保护行,每处理3次重复,随机区组排列。在小麦四叶期定苗,留苗密度180株/m^2,按当地高产田进行生长期田间管理。

1.2 土壤耕作程序

1.2.1 条旋耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田后,用

2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机一次性完成播种行旋耕(深度 15 cm)、播种行间施底肥、播种、起畦作业。2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机,设置行距为 18 cm+32 cm,只在播种开沟器前安装旋耕刀,仅对播种行 18 cm 宽的秸秆和根茬进行旋耕粉碎,播种行之间 32 cm 的土壤保持免耕不动,旋耕面积为总面积的 36%,称为条旋耕。

1.2.2 深松+条旋耕　前茬玉米秸秆全部粉碎还田后,用 ZS-180 型振动深松机深松 1 遍(深度 38 cm),然后用 2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机一次性完成播种行条旋耕、施底肥、播种、起畦作业。

1.2.3 旋耕　前茬玉米秸秆全部粉碎还田后撒施底肥,然后用旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm),耙地 2 遍,筑埂打畦,机播下种。

1.2.4 深松+旋耕　前茬玉米秸秆全部粉碎还田后,撒施底肥,ZS-180 型振动深松机深松 1 遍(深度 38 cm),旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm),耙地 2 遍,筑埂打畦,机播下种。

1.2.5 翻耕　前茬玉米秸秆全部粉碎还田后,撒施底肥,用铧式犁耕翻(深度 25 cm),然后用旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm),耙地 2 遍,筑埂打畦最后机播下种。

1.3　田间取样与测定方法

于越冬、返青、拔节、开花和成熟期进行群体动态调查和取样,其中越冬、返青、拔节期留取整株样品;开花期植株样品分为叶片、茎秆+叶鞘、穗 3 部分;成熟期分为子粒、叶片、茎秆+叶鞘、颖壳+穗轴 4 部分。样品于 70°C 烘干至恒重,测定干物质重;采用浓硫酸消煮—半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量,计算植株氮素积累量。

在开花和成熟期,分别在各小区按 20 cm 为一层分为 10 个层次取 0—200 cm 土层土样,每个小区随机取 2 点,相同层次的土壤混合为一个样。取上述混匀土壤样品一份立即装入铝盒,110℃烘干至恒重,计算土壤含水量。一份立即置于 -20℃冰冻保存,土壤样品解冻后,将样品充分混匀过 2 mm 筛,称取 5 g 土壤样品 3 份,分别加入 50 mL 0.01 mol/L 的 $CaCl_2$ 溶液,振荡 30 min 后过滤,吸取待测液 5 mL,加 0.2 mL 1:9 H_2SO_4 溶液酸化,摇匀,用紫外分光光度法分别在 210 nm 和 275 nm 处比色,测定浸提液中硝态氮含量[15]。

1.4　数据处理与统计分析

冬小麦植株氮素积累与转运及氮素利用效率的计算公式[16-18]为:

各时期不同器官氮素累积量(kg/hm^2)=氮素含量×干物质质量

各器官的氮素分配比例(%)=各器官的氮素积累量/地上部植株氮素积累总量×100

营养器官氮素转移量(kg/hm^2)=开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

营养器官氮素转移率(%)=营养器官氮素转移量/开花期营养器官氮素积累量×100

营养器官氮素贡献率(%)=营养器官氮素转移量/成熟期子粒氮素积累量×100

氮素内部利用效率(kg/kg)=子粒产量/植株氮素积累量

氮肥偏生产力(kg/kg)=子粒产量/施氮量

采用 DPS 统计分析软件进行显著性检验(LSD 法)。

2　结果与分析

2.1　不同耕作方式对 0—200 cm 土层土壤含水量的影响

由图 1 可知,开花期,深松+条旋耕(SRS)和深松+旋耕(RS)处理在 20—140 cm 各土层的土壤含水量分别低于条旋耕(SR)和旋耕(R)处理;翻耕(P)处理在 20—120 cm 各土层的土壤含水量均低于深松+条旋耕处理,与深松+旋耕处理无显著差异。成熟期,深松+条旋耕和深松+旋耕处理在 20—160 cm 各土层的土壤含水量分别低于条旋耕和旋耕处理;翻耕处理在 20—120 cm 各土层的土壤含水量高于深松+条旋耕和深松+旋耕处理;在 20—140 cm 各土层的土壤含水量低于条旋耕和旋耕处理。表明深松和翻耕条件下,小麦在开花至成熟阶段对土壤水消耗量增加,该阶段的土壤水分含量低于旋耕和条旋耕处理,成熟期深松处理的中上层土壤水分含量最低。

2.2　不同耕作方式对小麦植株氮素积累、分配和转运的影响

2.2.1 不同生育阶段氮素吸收强度　图 2 显示,播种至返青期,各处理小麦的氮素吸收强度均较低,返青至开花期升高,开花后降低。播种至越冬期,翻耕、旋耕和深松+旋耕的氮素吸收强度高于深松+条旋耕和条旋耕处理;越冬至返青期各处理间无显著差异;返青至拔节期为翻耕高于其他处理;拔节至开花期为深松+旋耕和深松+条旋耕最高,翻耕次之,旋耕和条旋耕最低且两处理间无显著差异;

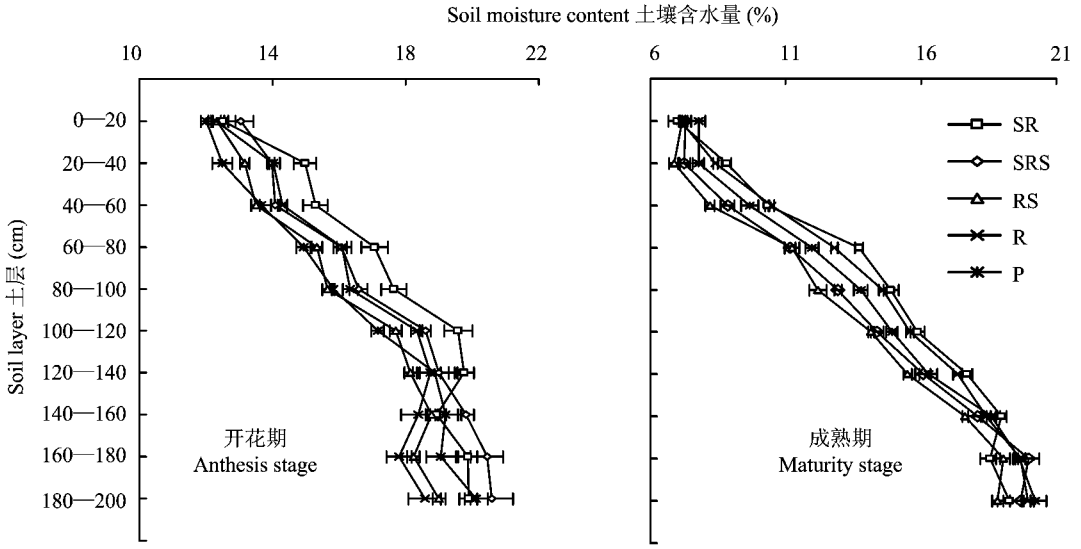

图1 耕作方式对开花和成熟期0—200 cm土层土壤含水量的影响

Fig. 1 Effects of different soil tillage practices on soil moisture contents in 0–200 cm soil layers at the anthesis and maturity stages

[注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松+条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松+旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage.]

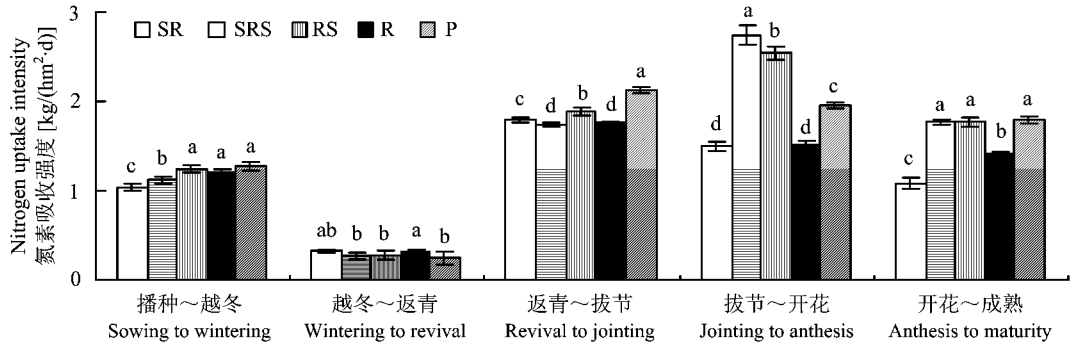

图2 耕作方式对小麦各生育阶段氮素吸收强度的影响

Fig. 2 Effects of different soil tillage practices on nitrogen uptake intensities

[注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松+条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松+旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage. 柱上不同字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$).]

开花至成熟期为翻耕、深松+旋耕和深松+条旋耕高于旋耕处理,条旋耕最低。说明深松有利于提高拔节期之后小麦对氮素的吸收能力。拔节至成熟期小麦由营养生长和生殖生长并进期转入生殖生长期,此期较高的氮素吸收强度对提高植株氮素积累量、进而提高产量有重要意义。

2.2.2 不同生育时期植株氮素积累量 小麦植株氮素积累量随生育进程逐渐增加(表1)。越冬期和返青期,植株氮素积累量为翻耕、旋耕和深松+旋耕显著高于深松+条旋耕和条旋耕处理;越冬期,深松+条旋耕高于条旋耕处理,返青期两者无显著差异。拔节期,翻耕的植株氮素积累量最高,旋耕和深松+旋耕次之,均高于深松+条旋耕和条旋耕处理。开花期和成熟期,翻耕、深松+旋耕和深松+条旋耕显著高于旋耕和条旋耕处理,条旋耕处理最低,这与翻耕、深松+旋耕和深松+条旋耕处理小麦拔节后对氮素的吸收强度较大有关。

2.2.3 成熟期氮素在不同器官中的分配 从表2可

表 1　耕作方式对植株氮素积累量的影响 (kg/hm²)

Table 1　Effects of different soil tillage practices on nitrogen accumulation amounts

处理 Treatment	越冬期 Wintering	返青期 Revival	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity
SR	55.94 c	82.22 b	159.36 c	198.28 c	239.50 c
SRS	60.60 b	82.43 b	157.24 c	228.58 a	295.86 a
RS	67.18 a	89.67 a	170.81 b	236.88 a	304.14 a
R	65.17 a	91.30 a	167.16 b	206.58 b	260.16 b
P	68.71 a	88.51 a	179.78 a	230.58 a	298.72 a

注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松 + 条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松 + 旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

表 2　耕作方式对成熟期各器官中氮素积累和分配的影响

Table 2　Effects of different soil tillage practices on nitrogen accumulation and distribution in different organs at the maturity stage

处理 Treatment	氮素积累量(mg/plant) Nitrogen accumulation			分配比例(%) Distribution proportion		
	子粒 Grain	茎鞘 + 叶 Stem and leaf	穗轴 + 颖壳 Spike axis and glume	子粒 Grain	茎鞘 + 叶 Stem and leaf	穗轴 + 颖壳 Spike axis and glume
SR	170.31 c	59.61 c	9.57 b	71.11 b	24.89 c	4.00 a
SRS	225.68 a	60.83 c	9.35 bc	76.28 a	20.56 d	3.16 d
RS	232.65 a	62.48 c	9.01 c	76.49 a	20.54 d	2.96 d
R	177.52 c	72.56 b	10.08 a	68.23 c	27.89 b	3.87 b
P	195.90 b	92.55 a	10.27 a	65.58 d	30.98 a	3.44 c

注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松 + 条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松 + 旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

以看出,成熟期小麦各器官中氮素积累量和分配比例为: 子粒 > 茎鞘 + 叶 > 穗轴 + 颖壳。深松 + 旋耕和深松 + 条旋耕处理的子粒氮素积累量和分配比例显著高于旋耕和条旋耕处理,茎鞘 + 叶与穗轴 + 颖壳的氮素分配比例低于旋耕和条旋耕处理。翻耕处理的茎鞘 + 叶的氮素积累量和分配比例最高; 子粒和穗轴 + 颖壳的氮素积累量高于旋耕和条旋耕处理,分配比例低于旋耕和条旋耕处理。表明深松处理促进了氮素向子粒中的分配,有利于子粒中氮素的积累; 翻耕处理则导致氮素过多地分配于营养器官中。

2.2.4 开花后营养器官中的氮素向子粒中的转运

子粒中的氮素来源于两部分,一部分为开花前贮存在营养器官于开花后转移到子粒中的氮素,一部分为开花后植株吸收同化的氮素。表 3 显示,深松 + 旋耕与深松 + 条旋耕处理子粒氮素积累量、营养器官中的氮素向子粒的转移量和转移率显著高于旋耕和条旋耕处理。翻耕处理的成熟期氮素积累量、营养器官氮素转移量和转移率及其对子粒的贡献率均低于深松 + 旋耕和深松 + 条旋耕处理; 成熟期营养器官氮素积累量高于深松 + 旋耕和深松 + 条旋耕处理。表明深松促进了开花期营养器官中贮存的氮素向子粒中的转运,而翻耕处理植株吸收的氮素较多地滞留于营养器官中,不利于氮素的再分配利用。

2.3　不同耕作方式对 0—200 cm 土层土壤硝态氮含量的影响

由图 3 可以看出,小麦开花期各土层土壤硝态氮含量随土层深度呈现逐渐下降的趋势。深松 + 条

表3 开花后营养器官氮素向子粒中的转移

Table 3 Nitrogen translocation from vegetative organs to grain after the anthesis stage

处理 Treatment	营养器官氮素积累量(kg/hm²) NAVO		成熟期子粒氮素积累量 NAG (kg/hm²)	营养器官氮素转移量 NTA (kg/hm²)	营养器官氮素转移率 TE (%)	营养器官氮素对子粒的贡献率 CP (%)
	开花期 Anthesis	成熟期 Maturity				
SR	198.28 b	69.19 c	170.31 c	129.09 b	65.11 b	75.80 a
SRS	228.58 a	70.18 c	225.68 a	158.40 a	69.30 a	70.19 b
RS	236.88 a	71.49 c	232.65 a	165.39 a	69.82 a	71.09 b
R	206.58 b	82.64 b	177.52 c	123.94 b	60.00 c	69.82 b
P	230.58 a	102.82 a	195.90 b	127.76 b	55.41 d	65.22 c

注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松+条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松+旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage. NAVO—Nitrogen accumulation in vegetative organs; NAG—Nitrogen accumulation in grain; NTA—Nitrogen translocation amount; TE—Translocation efficiency; CP—Contribution proportion. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

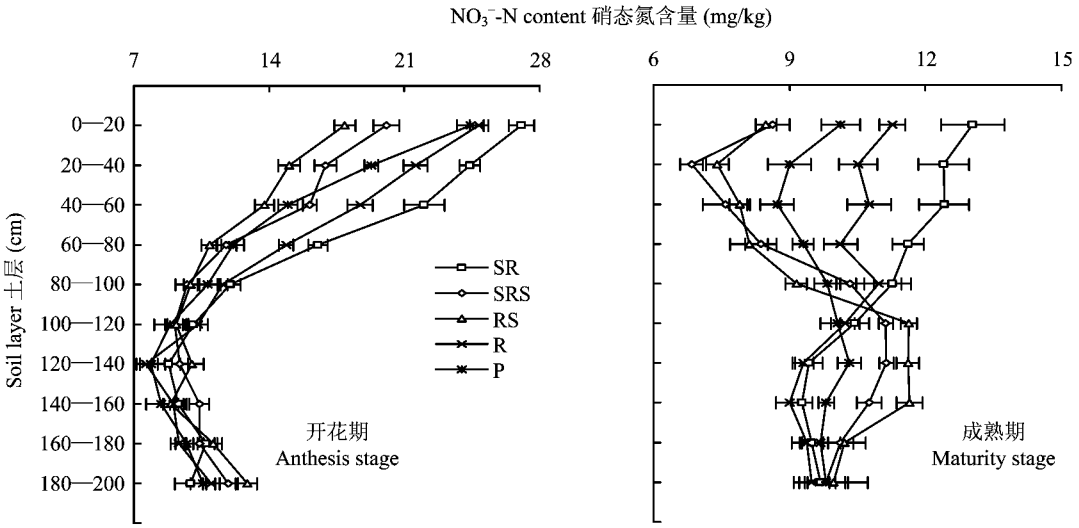

图3 耕作方式对开花和成熟期0—200 cm土层硝态氮含量的影响

Fig. 3 Effects of different soil tillage practices on NO_3^--N contents in 0–200 cm soil layers at the anthesis and maturity stages

[注(Note): SR—条旋耕 Strip rotary tillage; SRS—深松+条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling; RS—深松+旋耕 Rotary tillage after subsoiling; R—旋耕 Rotary tillage; P—翻耕 Plowing tillage.]

旋耕与深松+旋耕处理在0—100 cm各土层的土壤硝态氮含量低于条旋耕和旋耕处理,而120—160 cm各土层则高于条旋耕和旋耕处理;翻耕处理在0—40 cm各土层的土壤硝态氮含量高于深松+条旋耕和深松+旋耕处理,在20—80 cm各土层的土壤硝态氮含量低于旋耕和条旋耕处理。条旋耕处理在0—80 cm各土层的土壤硝态氮含量最高。

在小麦成熟期,各处理0—100 cm土层的土壤硝态氮含量显著低于开花期,而对140—200 cm土层的土壤硝态氮含量无显著影响。深松+条旋耕与深松+旋耕处理在成熟期0—80 cm各土层的土壤硝态氮含量低于条旋耕和旋耕处理,而100—160 cm各土层高于条旋耕和旋耕处理;翻耕处理在0—80 cm各土层的土壤硝态氮含量高于深松+条旋耕和深松+旋耕处理,在140—

160 cm 各土层的土壤硝态氮含量高于条旋耕和旋耕处理;深松+条旋耕处理在 120—160 cm 土层的土壤硝态氮含量低于深松+旋耕处理;160—200 cm 各土层的土壤硝态氮含量各处理间无显著差异。表明深松和翻耕促进了小麦在生育中后期对 0—80 cm 各土层土壤氮素的吸收利用,但在开花至成熟阶段出现硝态氮淋溶,增加了硝态氮在 100—160 cm 土层中的积累量;条旋耕和旋耕模式下小麦对土壤硝态氮的吸收较少,0—80 cm 土层土壤中残留的硝态氮较多。

2.4　不同耕作方式对氮素利用效率和子粒产量的影响

由表 4 可以看出,深松+旋耕和深松+条旋耕处理氮素内部利用效率与旋耕和条旋耕处理之间无显著差异,但氮肥偏生产力和子粒产量显著高于旋耕和条旋耕处理。翻耕处理的氮肥偏生产力和子粒产量显著高于旋耕和条旋耕处理,而氮素内部利用效率则低于上述处理。表明深松促进了小麦对氮肥的吸收利用,有利于子粒产量和氮素利用率的提高,获得高产高效。

表 4　耕作方式对小麦氮素利用效率和子粒产量的影响

Table 4　Effects of different soil tillage practices on nitrogen use efficiency and grain yield of wheat

处理 Treat.	氮素内部利用效率 N internal efficiency (kg/kg)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity (kg/kg)	产量 Grain yield (kg/hm^2)
SR	29.47 a	29.41 d	7057.48 d
SRS	29.69 a	36.60 a	8783.05 a
RS	29.36 a	37.20 a	8928.70 a
R	29.84 a	32.34 c	7762.65 c
P	28.21 b	35.11 b	8426.25 b

注(Note):SR—条旋耕 Strip rotary tillage;SRS—深松+条旋耕 Strip rotary tillage after subsoiling;RS—深松+旋耕 Rotary tillage after subsoiling;R—旋耕 Rotary tillage;P—翻耕 Plowing tillage. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at the 5% level.

3　讨论

氮素的吸收利用直接影响小麦的生长发育,进而影响其产量,因此明确作物对氮素的吸收利用特性及其对产量的影响,是获得作物高产的基础[19]。小麦子粒产量与吸氮量之间呈二次曲线关系,在一定范围内,随着吸氮量的增加子粒产量逐渐增加[20-21]。已有研究表明,深松能提高土壤氮的矿化率,增加土壤中矿质氮的含量[22];同时由于深松打破了犁底层,能促进作物根系在土壤中的生长[23],有利于作物对土壤氮素的吸收和利用[24]。本研究表明,深松+旋耕和深松+条旋耕处理促进了小麦拔节之后对氮素的吸收,增加了氮素积累量。拔节至成熟期是小麦生长和产量形成的重要时期,该阶段植株吸收充足的氮素可以更好地维持小麦体内蛋白酶的更新,提高光合作用效率和延长叶片功能期[25],这是深松耕作调节小麦氮素吸收,获得 8783.05～8928.70 kg/hm^2 高产的原因。

一般认为,小麦植株氮素的转运与分配受灌溉、施肥和栽培措施的影响。开花后土壤含水量过高会降低小麦营养器官开花前贮存的氮素向籽粒的转移率和转移量[26],Sinclair 等[27]和 Xu 等[28]的研究亦指出,较低的土壤含水量能促进氮素从营养器官向子粒的转移,提高子粒氮素含量。本试验中,深松+条旋耕和深松+旋耕处理开花期和成熟期 20—140 cm 土层的土壤含水量均低于条旋耕和旋耕处理,而营养器官中氮素向子粒的转移量和转移率却显著高于条旋耕和旋耕处理,说明深松耕作促进了小麦生育中后期对中上层土壤水分的消耗,不仅增加了光合蒸腾耗水[29],而且降低了小麦生育后期的土壤含水量,促进了营养器官中贮存的氮素向子粒中的再分配。

硝态氮是农田无机氮存在的主要形态,也是最易被作物吸收利用的氮素形态,但其极易随水分在土壤中淋溶,对地下水造成污染。土壤耕作后会产生大的土壤比表面积和短的弥散路径,使硝态氮的淋溶量增加[30]。免耕条件下地下水中的 NO_3^--N 浓度最小,通常年淋失量也最小[31];但另有研究表明,免耕提高了土壤生物的数量和活性,可形成大的土壤孔径[14],而且由于蒸发少,不利于土壤深层硝态氮向上移动,易造成硝态氮淋溶[32]。本试验结果表明,深松和翻耕促进了小麦在生育中后期对 0—80 cm 各土层土壤氮素的吸收利用,但在开花至成熟阶段出现硝态氮淋溶,增加了硝态氮在 100—160 cm 土层中的积累,深松+条旋耕处理的淋溶量低于深松+旋耕处理;条旋耕和旋耕模式下 0—80 cm 土层土壤中残留的硝态氮较多,小麦对土壤硝态氮的吸收较少,其开花和成熟期植株的氮素积累量显著低于其他处理,条旋耕处理最低(表 1)。

关于土壤深松的最佳次数和时间,研究认为在免耕2～4年后进行一次深松,其作物产量和水分利用效率最高[23,33]。本研究结果表明,深松耕作能够提高小麦拔节期之后的氮素积累量和成熟期氮素向子粒的分配,获得高的子粒产量,但就深松对小麦氮素积累与转运和土壤硝态氮含量的持续作用效果有待进一步研究。本试验条件下,深松+条旋耕与深松+旋耕处理相比,产量和氮素利用效率无显著差异,但在深松作业的基础上使用2BLMFS-8-4-3型多功能贴茬播种机播种,可一次性完成播种行条旋耕、施底肥、播种、起畦作业,减少了耕作整地的工序,而且在该耕作方式下100—160 cm土层硝态氮淋溶量低于深松+旋耕处理,降低了硝态氮对地下水污染的风险,有推广价值。

参考文献:

[1] Holland J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2004, 103: 1-25.

[2] 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 Till. Res., 2005, 80: 79-93.

[3] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 王蕾. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44-51.
Mao H L, Li J, Jia Z K Wang L. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(8): 44-51.

[4] 郑成岩, 崔世明, 王东, 等. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1432-1440.
Zheng C Y, Cui S M, Wang D *et al*. Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2011, 37(8): 1432-1440.

[5] Ghuman B S, Sur H S. Tillage and residue management effects on soil properties and yields of rainfed maize and wheat in a subhumid subtropical climate[J]. Soil Till. Res., 2001, 58: 1-10.

[6] 周兴祥, 高焕文, 刘晓峰. 华北平原一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 841-843.
Zhou X X, Gao H W, Li X F. Experimental study on conservation tillage system in areas of two crops a year in North China Plain [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2001, 17(6): 841-843.

[7] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S *et al*. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest of Iran[J]. Int. J. Agric. Biol., 2008, 10: 120-123.

[8] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 41-46.
Lu M R, Li Z J, Zhang T *et al*. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2010, 26(1): 41-46.

[9] 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 M, Wu J Z, Li Y J *et al*. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, 25(1): 50-54.

[10] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al*. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(12): 1493-1499.

[11] Tong Y A, Emteryd O, Lu D Q, Grip H. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eum-orthic anthrosols profile [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1997, 48(3): 225-229.

[12] Katupitiya A, Eisenhauer D E, Ferguson R B *et al*. Long-term tillage and crop rotation effects on residual nitrate in the crop root zone and nitrate accumulation in the intermediate vadose zone [J]. Trans. ASABE, 1997, 40(5): 1321-1327.

[13] Sharpley A N, Smith S J. Wheat tillage and water quality in the southern plains[J]. Soil Till. Res., 1994, 30: 33-48.

[14] Tan C S, Drury C F, Soultani M *et al*. Effect of controlled drainage and tillage on soil structure and tile drainage nitrate loss at the field scale[J]. Water Sci. Technol., 1998, 35(4): 103-110.

[15] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 47-49.
National Extension Center for Agricultural Technology. The criterion for soil analyzing technology (2nd ed.)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. 47-49.

[16] Stevens W B, Hoeft R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study Ⅱ. Nitrogen uptake efficiency [J]. Agron. J., 2005, 97: 1046-1053.

[17] Arvind K S, Jagdish K L, Singh V K *et al*. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a system perspective[J]. Agron. J, 2004, 96: 1606-1621.

[18] 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[J]. 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[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(4): 484-490.

[19] 肖相芬, 周川娇, 周顺利, 等. 燕麦氮吸收利用特性与适宜施氮量的定位研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4618-4626.
Xiao X F, Zhou C J, Zhou S L *et al*. Characteristics of N absorption, utilization and optimum N-fertilizer rate based on a

long-term fertilization experiment of oats[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(22): 4618-4626.

[20] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 高长青. 黄土高原氮磷肥水平对旱作冬小麦产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 101-107.
Wang B, Liu W Z, Dang T H, Gao C Q. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization rate on yield and nitrogen utilization of winter wheat in dryland of Loess Plateau[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2011, 27(8): 101-107.

[21] 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]. Can. J. Plant Sci., 2003, 83: 699-707.

[22] Nevens F, Reheul D. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium[J]. Soil Till. Res., 2003, 70: 175-184.

[23] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
Qin H L, Gao W S, Ma Y C *et al*. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(1): 78-85.

[24] 贾永国, 安调过, 李俊明, 等. 不同小麦基因型孕穗期根系性状与吸氮量的关系[J]. 华北农学报, 2006, 21(3): 37-40.
Jia Y G, An D G, Li J M *et al*. Study on the effects of root traits on nitrogen uptake by different wheat genotypes at booting stage [J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2006, 21(3): 37-40.

[25] 米国华, 张福锁, 王震宇. 小麦超高产生理基础探讨—小麦后期碳氮代谢互作与粒重形态[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(5): 73-78.
Mi G H, Zhang F S, Wang Z Y. Discussion on the physiological basis of superhigh wheat yield: grain weight formation in relation to postanthesis interaction between carbon and nitrogen[J]. J. China Agric. Univ., 1997, 2(5): 73-78.

[26] 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 Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 870-878.

[27] Sinclair T R, Pinter P J, Kimball B A *et al*. Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated CO_2 and either water or N deficits[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2000, 79: 53-60.

[28] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. J. Agron. Crop Sci., 2005, 191: 439-449.

[29] 褚鹏飞, 于振文, 王东, 张永丽. 耕作方式对小麦耗水特性和籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3954-3964.
Chu P F, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L. Effects of tillage on water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(19): 3954-3964.

[30] Matthews A M, Armstrong A C, Leeds-Harrison P B. Development and testing of a model for predicting tillage effects on nitrate leaching from cracked clay soils[J]. Soil Till. Res., 2000, 53: 245-254.

[31] Weed D A J, Kanwar R S. Nitrate and water present in and flowing from root-zone soil[J]. J. Environ. Qual., 1996, 25: 709-719.

[32] Smith S J, Naney J W, Berg W A. Nitrogen and ground water protection[M]. Chelsea: Lewis Publishers, 1987. 367-374.

[33] 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 62-67.
He J, Li H W, Gao H W. Subsoiling effects and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2006, 22(10): 62-67.