

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.029

不同降水年型下免耕对冬小麦氮素积累与产量的影响

李森¹ 魏红义² 武继承³ 杨永辉³ 丁晋利⁴

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业农村部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002;

2. 南水北调中线干线工程建设管理局河南分局, 郑州 450018;

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. 郑州师范学院地理与旅游学院, 郑州 450044)

摘要: 基于河南省 2011—2017 年长期定位耕作试验数据对 RZWQM2 模型进行了率定和验证, 利用 RZWQM2 模型分析了不同降水年型免耕对 0~100 cm 土层贮水量、冬小麦地上部氮素积累量和根部氮素积累量、冬小麦产量及氮素利用率的影响。模拟结果表明, 不同降水年型冬小麦地上部氮素积累量和根部氮素积累量、冬小麦产量由大到小均表现为丰水年、平水年、枯水年。与传统耕作相比, 免耕使枯水年、平水年和丰水年冬小麦不同生育期 0~100 cm 土层平均贮水量分别提高 11.3%、12.9% 和 16.9%。与传统耕作相比, 免耕使枯水年冬小麦地上部氮素积累量和平水年抽雄期—收获期根部氮素积累量分别提高 2.5% 和 3.1%, 分别提高枯水年、平水年和丰水年氮素利用率 26.7%、8.7% 和 6.0%, 免耕较传统耕作氮肥利用效率在枯水年提高 11.7%, 而在丰水年降低 1.7%。

关键词: 冬小麦; 免耕; 氮素积累量; 产量; 氮素利用率

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)06-0277-08

OSID:



Effects of No-tillage on Nitrogen Accumulation and Yield of Winter Wheat under Different Precipitation Patterns

LI Sen¹ WEI Hongyi² WU Jicheng³ YANG Yonghui³ DING Jinli⁴

(1. Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

2. Henan Branch of Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450018, China

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

4. School of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Based of a long-term tillage experiment from 2011 to 2017 in Henan Province, the RZWQM2 model was calibrated and validated. Effects of no-tillage on soil water storage at the depth of 0~100 cm, nitrogen accumulation in aboveground and root, crop yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in different precipitation patterns were analyzed. The simulated results showed that the nitrogen accumulation in aboveground and root and crop yield of winter wheat in different precipitation patterns were decreased successively in the order of wet year, normal year, and dry year. Compared with conventional tillage, the average soil water storage at the depth of 0~100 cm under no-tillage was significantly increased by 11.3%, 12.9% and 16.9% in dry, normal and wet year at the whole growing stages of winter wheat, respectively. The aboveground nitrogen accumulation in dry year and root nitrogen accumulation from heading to harvest stage in normal year under no-tillage were both increased by 2.5% and 3.1% compared with conventional tillage, respectively. The nitrogen use efficiency under no-tillage was increased by 26.7%, 8.7% and 6.0% in dry, normal and wet precipitation patterns respectively compared with conventional tillage. However, compared with conventional tillage, N fertilizer using efficiency was increased by 11.7% in dry year, and decreased by 1.7% in wet year.

Key words: winter wheat; no-tillage; nitrogen accumulation amount; yield; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2021-02-05 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 中央公益性科研机构基础研究基金项目(FIRI2019-03-02、FIRI2019-05-03)、河南省科技研发专项(192102110033)和新乡市科技攻关计划项目(GG2020025)

作者简介: 李森(1988—),男,助理研究员,博士,主要从事节水灌溉原理与技术研究,E-mail: lisen18@caas.cn

通信作者: 丁晋利(1978—),女,讲师,博士,主要从事土壤生态与节水农业研究,E-mail: dingjinli1978@163.com

0 引言

氮素的积累和转运是氮素代谢过程的重要环节,对冬小麦增产具有重要意义。水分条件是影响冬小麦植株氮素吸收的重要因素。有研究表明,改善土壤水分状况可增加总氮素产量和生物量,可促进氮素由营养器官向籽粒的转移^[1-2]。降雨是土壤水分补给的重要方式之一。河南省属易旱区,该地区水资源匮乏、季节性干旱频发、不同年份降雨量差异明显,研究河南省不同降水年型对冬小麦氮素积累的影响对提高冬小麦氮素利用率和冬小麦产量具有重要意义。

免耕作为重要的保护性耕作方式之一,可以增加土壤含水量,提高氮素吸收利用及作物产量^[3-5]。黄明等^[6]研究表明,免耕能够改善旗叶光合特性,提高小麦开花后的干物质积累量及向籽粒的转运量。丁晋利等^[7]研究认为,连续2年免耕较传统耕作可分别提高扬花期茎、叶和穗的平均氮素积累量,显著增加了穗和籽粒的平均氮素积累量。然而,由于不同年份降雨量及季节性降雨的差异,免耕对土壤水分、氮素利用及作物产量的影响结果不同^[8]。以往关于免耕冬小麦氮素吸收利用的研究多集中于不同耕作措施的比较,较少涉及免耕在不同降水年型下冬小麦氮素积累及氮素利用特征的研究,尤其是冬小麦根部的氮素积累特征。

RZWQM2(Root zone water quality model)模型综合了气象、土壤、作物、管理等模块,采用系统分析方法和计算机模拟技术,克服了传统农业试验方法的缺陷,能够模拟免耕和传统耕作条件下的水氮平衡及作物产量^[9]。本文利用免耕和传统耕作试验数据率定、验证RZWQM2模型,并利用该模型模拟丰水年、平水年和枯水年免耕冬小麦植株地上部和根部氮素积累特征,研究免耕条件下氮素利用率和作物产量对不同降水年型的响应,旨在优化管理、提高氮素利用率,为实现冬小麦增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验布设在河南省中部节水农业禹州试验基地(34.16°N,113.15°E,海拔150 m)。该地区多年平均降雨量为674.9 mm,土壤为褐土,土壤母质为黄土性物质,耕层有机质质量比12.3 g/kg、全氮质量比0.80 g/kg、水解氮质量比47.82 mg/kg、速效磷质量比6.66 mg/kg、速效钾质量比114.8 mg/kg。本试验处理设置为传统耕作和免耕,每个处理设3次重复。传统耕作是在玉米收获后,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;免耕是在玉米收获后,全部秸秆粉碎覆盖在地表,无其他措施。种植的冬小麦品种为“矮矮58”,播种量为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。冬小麦播种前施用尿素(纯氮225 kg/hm²)、过磷酸钙(P₂O₅ 105 kg/hm²)和硫酸钾(K₂SO₄ 75 kg/hm²),一次性底施。小区面积36 m²(6 m×6 m)。

1.2 降水年型划分

根据研究区11年(2006—2017年)降水资料计算冬小麦生育期平均降水量为229.1 mm、降水量均方差为58.1 mm。降水年型划分依据干燥指数划分标准^[10],干燥指数为每年冬小麦生育期降水量和冬小麦生育期平均降水量差值与降水量均方差的比值,干燥指数大于0.35为丰水年,干燥指数小于-0.35为枯水年,干燥指数介于-0.35~0.35之间为平水年。干燥指数的计算及划分结果如表1所示。

表 1 2006—2017 年冬小麦生育期降水年型划分结果
Tab. 1 Precipitation patterns in growth period of winter wheat in 2006—2017

年份	生育期降水量/mm	干燥指数	降水年型
2006—2007	248.7	0.34	平水年
2007—2008	208.5	-0.36	枯水年
2008—2009	242.9	0.24	平水年
2009—2010	238.4	0.16	平水年
2010—2011	93.9	-2.32	枯水年
2011—2012	246.7	0.30	平水年
2012—2013	186.5	-0.73	枯水年
2013—2014	245.4	0.28	平水年
2014—2015	269.4	0.69	丰水年
2015—2016	198.0	-0.54	枯水年
2016—2017	342.7	1.95	丰水年

1.3 样品测定及土壤贮水量计算

每隔10 d采用DZN2-1型FDR仪测定0~100 cm土层的水分含量。土壤硝态氮(NO₃-N)含量采用连续流动分析仪(TRAACS 2000型)进行测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸容量法(外加热)测定^[11]。每小区沿对角线选取长势均匀的3点,每点取4 m²植株样,脱粒,风干,称量计产。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,样品于105℃杀青并在70℃干燥至质量恒定,测定干物质量。采用浓硫酸消煮-半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量^[9]。

土壤贮水量可以系统地研究不同时段各试验处理的土壤水分利用情况,反映了土壤水分的真实值。1 m深土层贮水量的计算公式为^[12]

$$W = \sum w_i D_i H_i \times 10 / 100 \tag{1}$$

式中 W ——1 m 深土层贮水量,mm
 w_i ——第 i 层土壤质量含水率,%
 D_i ——第 i 层土壤容重,g/cm³
 H_i ——第 i 层土层厚度,cm

1.4 模型模拟氮素吸收和分配原理

RZWQM2 模型中氮素吸收量由植物中氮素(N)的蒸腾流决定。当被动吸收的氮素不能满足植物生长需要,则模型采用米氏基质模型进行氮素主动吸收^[11]。植株将吸收的氮素优先分配给根部,其次,所有剩余的 N 按等级分配给其他植物器官。当植株处于繁殖阶段时,首先满足繁殖体的氮需求。在满足了根和繁殖体的需求后,仍然有剩余 N,则按叶和茎的需求比例进行分配^[13]。

1.5 模型率定和验证

模型输入初始值包括逐日气象数据、土壤数据、作物参数及田间管理数据。其中,逐日气象数据(包括太阳辐射和降雨量)由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)获取。土

壤数据来源于田间实测值;于 2014 年 10 月在试验小区附近采集土壤样品,测定土壤水力学参数(表 2),某些缺失的值采用 RZWQM2 提供的默认值。此外,利用 2011—2017 年传统耕作(CT)的含水量、有机碳含量、冬小麦产量及籽粒氮含量实测值对 RZWQM2 模型进行率定,通过比较分析土壤分层含水量、有机碳含量、籽粒氮含量模拟效果,采用试错法手动调整土壤剖面水力参数及土壤碳库的取值,从而保证模型率定结果在允许误差范围内。作物品种参数采用 RZWQM2 模型自带的 PEST 参数调试程序调试小麦参数春化敏感系数(PIV)、光周期敏感系数(PID)、从吐丝到生理成熟时的大于 8℃的积温(P5)、出叶间隔期间相应的大于 8℃的积温(PHINT)、籽粒数特性(G1)、标准籽粒重系数(G2)和潜在最大灌浆速率(G3)(表 3),优化作物生长发育期和作物产量的模拟结果。在参数率定的基础上,利用 2011—2017 年的免耕(NT)实测数据用于模型的验证。

表 2 RZWQM2 模型中土壤初始水力参数和有机质含量
Tab.2 Soil parameters and soil organic pools initially used in RZWQM2

土壤深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和含水 率/%	凋萎系数/ %	饱和导水率/ (cm·h ⁻¹)	有机质质量比 (快速)/(μg·g ⁻¹)	有机质质量比 (中速)/(μg·g ⁻¹)	有机质质量比 (慢速)/(μg·g ⁻¹)
0~20	1.10	51.6	11.2	0.25	3 000	3 000	4 000
20~40	1.39	45.2	9.8	0.07	2 551	2 551	3 401
40~60	1.47	48.2	10.4	0.10	1 470	1 470	1 906
60~80	1.52	49.3	9.2	0.10	759	759	1 014
80~100	1.52	47.4	10.3	0.14	407	407	542

表 3 冬小麦作物品种遗传参数
Tab.3 Genetic parameters of winter wheat

参数	PIV/ d	PID/ (%·h ⁻¹)	P5/ (℃·d)	G1/ (#·g ⁻¹)	G2/ mg	G3/ (mg·粒 ⁻¹ ·d ⁻¹)	PHINT/ (℃·d)
优化后数值	48.73	123	491.3	22.2	52.81	1.924	89.58

1.6 模型模拟及评价指标

利用率验证过的 RZWQM2 模型,分别模拟枯水年(2007—2008 年、2010—2011 年、2012—2013 年和 2015—2016 年)、平水年(2006—2007 年、2008—2009 年、2009—2010 年、2011—2012 年和 2013—2014 年)和丰水年(2014—2015 年和 2016—2017 年)传统耕作和免耕 0~100 cm 土层贮水量、地上部氮素积累量、根部氮素积累量和冬小麦产量。模型模拟效果采用均方根误差(RMSE)和相对误差(MRE)来评价,其中 RMSE 主要反映模拟效果的绝对无偏性和极值效应,MRE 主要反映模拟效果的相对无偏性。

2 结果与分析

2.1 模型率定和验证

利用 2011—2017 年传统耕作土壤表层(0~20 cm)有机碳含量、0~100 cm 土壤贮水量和 NO₃-N 含量以及冬小麦产量、地上部氮素积累量和冬小麦籽粒氮含量对 RZWQM2 模型进行了率定(表 4)。模拟结果表明,传统耕作土壤表层有机碳含量模拟值与实测值相近(RMSE 为 0.73 g/kg, MRE 为 0.12),且 2011—2017 年表层有机碳含量实测值均值较模拟值均值增加 11.4%。RZWQM2 模型能较好地模拟土壤 0~100 cm 土层贮水量,其 RMSE 为 18.80 mm, MRE 为 0.14;土壤 NO₃-N 含量模拟

RMSE 为 6.10 mg/kg 和 MRE 为 0.44,说明 RZWQM2 模型能合理地模拟土壤硝态氮变化趋势(表 4)。传统耕作冬小麦产量模拟值和实测值的 RMSE 为 620.3 kg/hm²,说明 RZWQM2 模型能够较好地模拟冬小麦产量(图 1);地上部氮素积累量和籽粒氮含

量的模拟值和实测值 RMSE 分别为 87.9、82.5 kg/hm²(图 1),RMSE 较高可能由于一方面 RZWQM2 模拟土壤硝态氮时其 RMSE 较高^[14-15],另一方面 2015—2016 年小麦生育期为枯水年,模拟精度偏低^[16]。

表 4 传统耕作土壤表层(0~20 cm)有机碳含量、土壤 0~100 cm 贮水量与 NO₃-N 含量模拟值和实测值
Tab.4 Simulated and measured soil organic carbon (SOC) in top 20 cm soil profile, and soil water storage and NO₃-N under CT in 100 cm soil profile

参数	观测值	模拟值	RMSE
2011—2017 年土壤有机碳含量平均值/(g·kg ⁻¹)	15.0 ± 1.8	13.1 ± 1.1	0.73
土壤 0~100 cm 平均贮水量/mm	136.8 ± 39.6	145.4 ± 27.2	18.80
土壤 0~100 cm NO ₃ -N 含量平均值/(mg·kg ⁻¹)	13.6 ± 6.3	9.1 ± 4.7	6.10

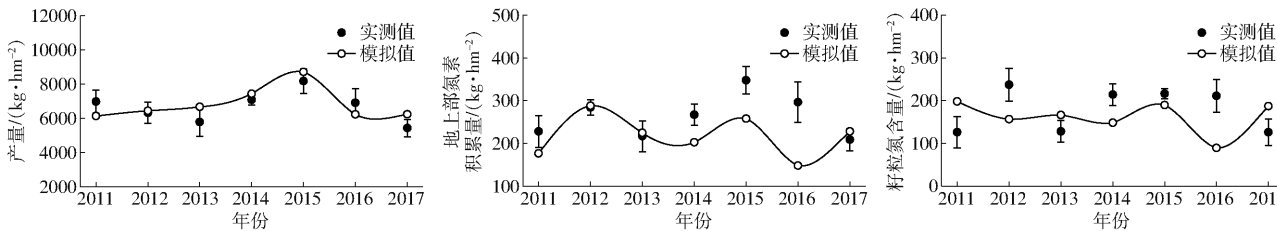


图 1 传统耕作冬小麦产量、地上部氮素积累量和籽粒氮含量模拟值和实测值
Fig.1 Simulated and measured winter wheat yield, N in biomass and N in grain under CT

利用 2011—2017 年免耕数据对 RZWQM2 模型进行验证(表 5)。模拟结果表明,土壤 0~100 cm 贮水量、冬小麦产量模拟效果较好,其 RMSE 分别为 18.0 mm 和 752.1 kg/hm²,其 MRE 分别为 0.07 和

0.08。RZWQM2 模型能够合理模拟土壤 NO₃-N 含量、地上部氮素积累量和籽粒氮含量,其 RMSE 分别为 6.5 mg/kg、97.3 kg/hm² 和 81.2 kg/hm²,MRE 分别为 0.47、0.35 和 0.29。地上部生物量 MRE 为 0.11。

表 5 免耕数据模拟值和实测值的 RMSE

Tab.5 Goodness of simulation across all years under NT in terms of root mean square errors (RMSE)

参数	观测值	模拟值	RMSE
土壤 0~100 cm 平均贮水量/mm	190.3 ± 34.2	197.3 ± 32.1	18.0
土壤 NO ₃ -N 含量平均值/(mg·kg ⁻¹)	13.6 ± 4.9	7.1 ± 2.5	6.5
冬小麦产量/(kg·hm ⁻²)	7 000.7 ± 859.7	7 410.1 ± 717.8	752.1
地上部生物量/(kg·hm ⁻²)	12 845 ± 374.9	12 379.3 ± 502.4	475.9
地上部氮素积累量/(kg·hm ⁻²)	257.3 ± 47.6	160 ± 51.1	97.3
籽粒氮含量/(kg·hm ⁻²)	173.2 ± 46.6	123 ± 41.0	81.2

2.2 不同降水年型冬小麦关键生育期土壤剖面贮水量

冬小麦不同生育期 0~100 cm 土层贮水量受降水年型影响显著(表 6)。不同降水年型冬小麦生育期 0~100 cm 土层平均贮水量由大到小依次为丰水年(166.8 mm)、平水年(142.7 mm)、枯水年(135.1 mm),与枯水年相比,丰水年和平水年分别增墒 23.5%和 5.6%。其中,免耕在丰水年较枯水年分别提高冬小麦苗期、拔节期、扬花期和灌浆期 0~100 cm 贮水量 25.0%、43.2%、44.7%和 12.3%。与传统耕作相比,免耕在枯水年、平水年和丰水年分别提高冬小麦 0~100 cm 土层平均贮水量 11.3%、12.9%和 16.9%。这是由于免耕耕作强度较低,减少

土壤蒸发,降低土壤深层渗漏,提高了土壤保水和持水的能力^[17-18]。

表 6 不同降水年型冬小麦各生育期 0~100 cm 土层贮水量
Tab.6 Soil water storage at depth of 0~100 cm at different growing stages of winter wheat in different precipitation patterns

生育期	mm					
	枯水年		平水年		丰水年	
	CT	NT	CT	NT	CT	NT
苗期	187.8 ^a	202.4 ^a	211.4 ^a	222.5 ^a	231.7 ^b	253.0 ^a
拔节期	131.9 ^a	143.5 ^a	138.7 ^b	169.3 ^a	174.1 ^b	205.5 ^a
扬花期	116.0 ^b	139.6 ^a	122.3 ^b	142.7 ^a	168.8 ^b	202.1 ^a
灌浆期	106.1 ^a	119.9 ^a	98.2 ^a	113.5 ^a	114.1 ^a	134.7 ^a
成熟期	97.2 ^a	106.3 ^a	100.0 ^a	108.8 ^a	80.1 ^a	103.5 ^a

注:不同降水年型 CT 和 NT 间数字后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

2.3 不同降水年型免耕冬小麦植株氮素积累特征

不同降水年型对冬小麦地上部和根部氮素积累有显著影响,氮素积累量由大到小均表现为丰水年、平水年、枯水年(图2)。与枯水年相比,传统耕作和免耕在丰水年分别提高地上部平均氮素积累量44.4%和41.6%。冬小麦根系在拔节期之后,根系数量均达到最大值^[17],图2表明,传统耕作和免耕处理下根系在播后150 d 氮素积累量较冬小麦前期差异显著。与枯水年相比,传统耕作和免耕在丰水年分别提高根部平均氮素积累量43.1%和42.6%。从不同耕作措施来看,传统耕作和免耕处理地上部氮素积累量均随冬小麦生长呈现增加的趋势,而根

部氮素积累量呈现先增大后减小的趋势。丰水年根部氮素积累量峰值出现时间明显晚于平水年和枯水年,说明土壤水分能够延缓根部衰老,提高冬小麦植株根部氮素积累量。与传统耕作相比,免耕在枯水年和平水年分别提高冬小麦地上部氮素积累量2.5%和3.6%,而在丰水年冬小麦地上部氮素积累量差别不大。免耕较传统耕作枯水年、平水年和丰水年根部平均氮素积累量略有增加,但在冬小麦抽雄期-收获期(播后179~225 d)免耕平水年根部氮素积累量较传统耕作提高3.1%,说明免耕有助于根部对氮素的吸收,且降雨量过多或过少均不利于根系对氮素的吸收。

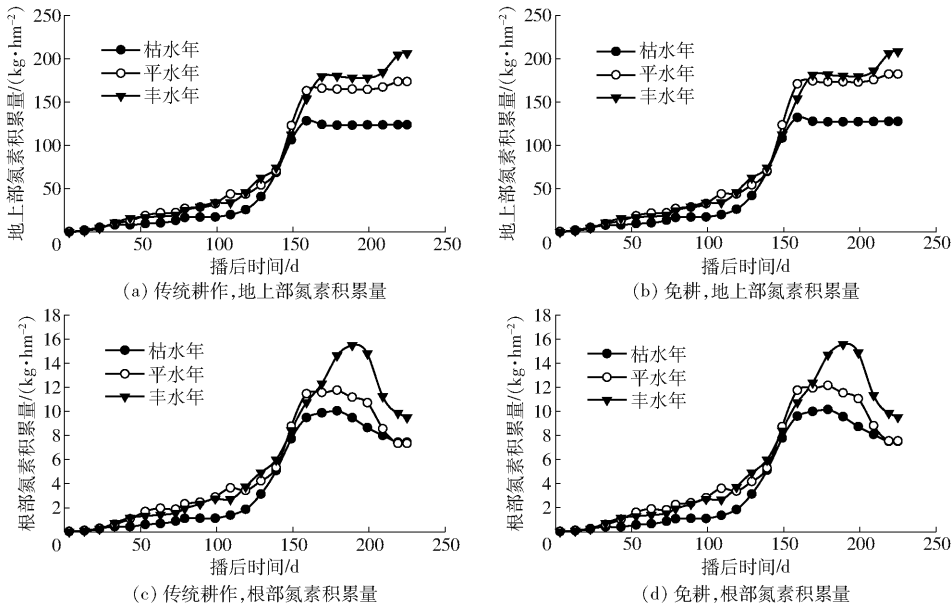


图2 不同降水年型免耕和传统耕作冬小麦生长期地上部和根部氮素积累量

Fig. 2 N in aboveground biomass and root during whole growing stages under CT and NT in different rainfall years

2.4 不同降水年型免耕氮素利用率及产量变化

冬小麦产量受降水影响显著,冬小麦平均产量由大到小依次为丰水年、平水年、枯水年(表7)。与枯水年相比,丰水年和平水年冬小麦平均产量分别增产11.4%和15.2%,其中,传统耕作和免耕丰水

年较枯水年冬小麦平均产量分别提高16.7%和14.0%。与传统耕作相比,免耕冬小麦产量在枯水年、平水年和丰水年分别增加12.4%、4.3%和9.8%,这说明在降雨量较少年份,免耕增产更显著。氨挥发、氨反硝化、硝态氮淋洗渗漏及作物吸收

表7 不同降水年型免耕和传统耕作氮素利用率及产量

Tab. 7 NUE and yield under CT and NT in different rainfall years

参数	枯水年		平水年		丰水年	
	CT	NT	CT	NT	CT	NT
小麦产量/(kg·hm ⁻²)	6 115.7 ^b	6 874.6 ^a	7 080.9 ^a	7 386.3 ^a	7 136 ^b	7 835.4 ^a
籽粒含氮量/(kg·hm ⁻²)	74.3 ^a	76.2 ^a	148.2 ^a	155.9 ^a	177.7 ^a	180.0 ^a
植株氮吸收量/(kg·hm ⁻²)	150.2 ^a	152.1 ^a	202.2 ^a	210.5 ^a	235.0 ^a	239.8 ^a
氨挥发量/(kg·hm ⁻²)	0.9 ^a	0.2 ^a	1.6 ^b	4.5 ^a	1.3 ^a	1.5 ^a
氨反硝化量/(kg·hm ⁻²)	0.8 ^a	1.3 ^a	1.3 ^b	2.9 ^a	5.8 ^b	8.3 ^a
硝态氮淋洗渗漏量/(kg·hm ⁻²)	32.8 ^a	11.1 ^b	42.1 ^a	19.9 ^b	48.6 ^a	24.9 ^b
氮素消耗量/(kg·hm ⁻²)	184.7 ^a	164.7 ^a	247.2 ^a	237.8 ^a	290.7 ^a	274.5 ^a
氮素利用率/(kg·kg ⁻¹)	37.4 ^b	47.4 ^a	28.6 ^b	31.1 ^a	28.1 ^a	29.8 ^a
氮肥利用效率/%	45.9 ^b	51.3 ^a	35.0 ^a	35.0 ^a	34.8 ^a	34.2 ^a
氮收获指数	0.52 ^a	0.51 ^a	0.73 ^a	0.74 ^a	0.76 ^a	0.75 ^a

是氮素损失的主要途径。不同降水年型,传统耕作和免耕均在丰水年冬小麦吸收氮素量最高。与枯水年相比,传统耕作在平水年和丰水年分别提高冬小麦氮素吸收量 34.6% 和 54.6%,免耕分别提高 38.4% 和 57.7%。传统耕作和免耕在枯水年、平水年和丰水年氮素消耗量(氨挥发量+氨反硝化量+硝态氮淋洗渗漏量+作物吸收量)分别为 184.7、164.7 kg/hm² 和 247.2、237.8 kg/hm² 以及 290.7、274.5 kg/hm²,其中丰水年氮素消耗量最大。与传统耕作相比,免耕氮素消耗量在枯水年、平水年和丰水年分别降低 10.8%、3.8% 和 5.6%,这主要是因为免耕较传统耕作减弱了对土壤表层的扰动,降低了氮渗漏量。

不同降水年型冬小麦氮素利用率、氮肥利用效率和氮收获指数差异显著(表 7)。传统耕作和免耕冬小麦氮收获指数由大到小均表现为丰水年、平水年、枯水年,而氮肥利用效率则刚好相反。与传统耕作相比,免耕在枯水年、平水年和丰水年氮素利用率分别增加 26.7%、8.7% 和 6.0%。免耕氮肥利用效率较传统耕作在枯水年提高 11.7%,而在丰水年降低 1.7%。免耕在枯水年、平水年和丰水年氮收获指数与传统耕作相差不大。

3 讨论

3.1 不同降水年型免耕对土壤贮水量和冬小麦产量的影响

不同降水量对土壤贮水量及作物产量影响显著^[19-22]。于琦等^[23]研究表明,丰水年型较干旱和平水年型分别提高冬小麦休闲期和生育期 0~200 cm 土壤蓄墒量,分别增加冬小麦拔节期-灌浆期 1 倍和 3 倍以上耗水量,增产 70.0% 和 25.8%。李玉山等^[24]研究表明,47% 的黄土高原地区小麦产量受种植时土壤储水量影响,而休闲期降水是影响土壤储水量的主要因素。不同耕作方式由于对土壤扰动程度不同导致土壤容重不同^[25-26],进而影响农田降雨入渗和土壤水分蒸发,致使不同耕作方式的蓄水保墒能力不同。免耕^[27-28]因减少土壤表层扰动且保留地表残茬覆盖,减少地面径流,提高土壤导水率,增加降水入渗,减少翻耕时土壤水分散失,因而具有良好的蓄水保墒作用。免耕在枯水年、平水年和丰水年增产效应表现不同。有研究表明,免耕较传统耕作能显著提高冬小麦关键生育期的 0~100 cm 土层土壤含水量和贮水量,增加冬小麦产量^[20]。许迪等^[29]研究也发现,在平水年和干旱年,免耕 40 cm 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愈

加明显。同时,DE VITA 等^[21]通过对意大利南部福贾和瓦斯托硬质小麦的产量和品质研究,发现免耕小麦产量与降雨量呈显著相关性,免耕较传统耕作的优势主要是减少蒸发,更适于降雨量较少地区。本研究表明,冬小麦产量受降水年型影响显著,在降雨较少的年份,免耕增产更显著。

3.2 不同降水年型免耕对冬小麦氮素吸收和氮肥利用效率的影响

土壤水分状况是影响冬小麦积累及转运的重要因素之一^[30-32]。水分亏缺能够显著降低小麦的氮素吸收量^[33-34]。王秀英^[35]研究指出灌溉后的植株含氮量整体高于干旱条件下的植株含氮量。这与本研究结果一致,冬小麦地上部和根部氮素积累量由大到小均表现为丰水年、平水年、枯水年。这主要是由于土壤中养分只有溶解在水中才能通过一定的生理作用到达根系表面进而为植物所吸收,促进养分释放,进而有利于作物对养分的吸收和利用。当降雨量低于正常水平时,土壤含水率低抑制了小麦植株对氮素的吸收,冬小麦氮素总吸收量减少,同时促进了氮素向籽粒的转运,氮素生产效率较低。本研究结果也表明,免耕在平水年和丰水年较枯水年分别提高冬小麦氮素吸收量 38.4% 和 57.7%,而免耕氮素利用率在平水年和丰水年较枯水年分别降低 34.4% 和 37.1%。不同耕作措施通过影响土壤水分进而影响作物氮素吸收和氮肥利用效率。本研究结果表明,免耕在枯水年、平水年和丰水年较传统耕作氮素利用率分别增加 26.7%、8.7% 和 6.0%。免耕氮肥利用效率较传统耕作在枯水年提高 11.7%,而在丰水年则略微降低。

4 结论

(1) RZWQM2 模型能够合理模拟 NO₃-N 含量、地上部氮积累量和籽粒氮含量,且能够较好地模拟土壤 0~100 cm 土层贮水量和冬小麦产量。

(2) 不同降水年型冬小麦生育期 0~100 cm 土层平均贮水量由大到小依次为丰水年、平水年、枯水年,与枯水年相比,丰水年和平水年分别增墒 23.5% 和 5.6%。不同降水年型冬小麦地上部氮素积累量和根部氮素积累量、冬小麦产量由大到小依次为丰水年、平水年、枯水年。

(3) 与传统耕作相比,免耕使枯水年、平水年和丰水年冬小麦 0~100 cm 土层平均贮水量分别提高 11.3%、12.9% 和 16.9%,免耕使枯水年冬小麦地上部氮素积累量和平水年抽雄期-收获期根部氮素积累量分别提高 2.5% 和 3.1%,免耕在枯水年、平水年和丰水年氮素利用率分别增加 26.7%、8.7% 和 6.0%。

参 考 文 献

- [1] 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉量对小麦氮素吸收和运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1002–1007.
XU Zhenzhu, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effects of irrigation amount on absorability and translocation of nitrogen in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(10): 1002–1007. (in Chinese)
- [2] 王百群, 张卫, 余存祖. 用¹⁵N示踪法研究不同土壤水分条件下小麦对氮的吸收利用[J]. 核农学报, 1999, 13(6): 362–367.
WANG Baiqun, ZHANG Wei, YU Cunzu. Nitrogen uptake and fertilizer nitrogen use efficiency of wheat under different soil water conditions[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1999, 13(6): 362–367. (in Chinese)
- [3] 师江澜, 刘建忠, 吴发启. 保护性耕作研究进展与评述[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 205–212.
SHI Jianglan, LIU Jianzhong, WU Faqi. Research advances and comments on conservation tillage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1): 205–212. (in Chinese)
- [4] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 229–237.
WANG Xudong, ZHANG Xia, WANG Yanli, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on Loess Plateau[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 229–237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171128&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.028. (in Chinese)
- [5] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 333–339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 333–339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190736&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036. (in Chinese)
- [6] 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 CASE, 2009, 25(1): 50–54. (in Chinese)
- [7] 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 245–251.
DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Effects of long-term conservation tillage on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 245–251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.032. (in Chinese)
- [8] 彭文英. 免耕措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 379–383.
PENG Wenying. Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 379–383. (in Chinese)
- [9] ANAPALLI S S, NIELSEN D C, MA L W, et al. Effectiveness of RZWQM for simulating alternative great plains cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4): 1183–1193.
- [10] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234–1240.
ZHANG Beiyang, XU Xuexuan, LIU Wenzhao, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234–1240. (in Chinese)
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [12] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 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 Hongling, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 44–51. (in Chinese)
- [13] AHUJA L R, ROJAS K W, HANSON J D, et al. Modeling management effects on water quality and crop production[M]// Root zone water quality model. Colorado: Water Resources Publications, 2000: 372–379.
- [14] NANGIA V, GOWDA P H, MULLA D J, et al. Water quality modeling of fertilizer management impacts on nitrate losses in tile drains at the field scale[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(2): 296–307.
- [15] 刘海涛, 胡克林, 李保国, 等. 土壤剖面基础性质差异对农田水氮过程和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1348–1360.
LIU Haitao, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Effects of soil profile basic properties on water and nitrogen movement and crop yield [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(7): 1348–1360. (in Chinese)
- [16] MA L, MALONE R W, HEILMAN P, et al. RZWQM simulated effects of crop rotation, tillage, and controlled drainage on crop yield and nitrate-N loss in drain flow[J]. Geoderma, 2007, 140(3): 260–271.
- [17] 王昌全, 魏成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(2): 152–154.
WANG Changquan, WEI Chengming, LI Tingqiang, et al. Effect of different zero tillage on the crop yield and soil property [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2001, 19(2): 152–154. (in Chinese)
- [18] 张海林, 陈阜, 秦耀东, 等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 36–40.
ZHANG Hailin, CHEN Fu, QIN Yaodong, et al. Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 36–40. (in Chinese)

- [19] 潘小莲, 李秀, 赵英, 等. 黄土高原旱塬区不同覆盖模式下冬小麦耗水特征及根系生长规律研究[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(6): 726–733.
PAN Xiaolian, LI Xiu, ZHAO Ying, et al. Characteristics of water consumption and root growth of winter wheat under different covering modes in arid tableland of the Loess Plateau[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(6): 726–733. (in Chinese)
- [20] 丁晋利, 魏红义, 杨永辉, 等. 保护性耕作对农田土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2501–2508.
DING Jinli, WEI Hongyi, YANG Yonghui, et al. Effects of conservation tillage on soil water condition and winter wheat yield in farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2501–2508. (in Chinese)
- [21] DE VITA P, DI PAOLO E D, 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.
- [22] 王钧, 李广, 聂志刚, 等. 保护性耕作下土壤水分变化特征模拟研究[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 263–274.
WANG Jun, LI Guang, NIE Zhigang, et al. Simulation on variation characteristics of soil water content under conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 263–274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210130&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.030. (in Chinese)
- [23] 于琦, 李军, 周栋, 等. 不同降水年型黄土旱塬冬小麦免耕与深松轮耕蓄墒增收效应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1870–1882.
YU Qi, LI Jun, ZHOU Dong, et al. Effects of no-tillage/subsoiling rotational tillage system on increasing soil water storage and crop yield under different precipitation patterns of winter wheat in the loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(11): 1870–1882. (in Chinese)
- [24] 李玉山, 韩仕峰, 史竹叶. 渭北塬区农田水分供需特征和低定额灌溉研究[J]. 中国农业科学, 1985, 18(4): 42–48.
LI Yushan, HAN Shifeng, SHI Zhuye. Evaluation on the water conditions of field and study on the low irrigation quota system in the loess plateau of Weibei, Shaanxi Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1985, 18(4): 42–48. (in Chinese)
- [25] 雷金银, 吴发启, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 40–45.
LEI Jinyin, WU Faqi, WANG Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 40–45. (in Chinese)
- [26] 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3800–3808.
CHENG Ke, LI Jun, MAO Hongling. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rainfed wheat fields of the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(18): 3800–3808. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] 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 Wenyong, 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)
- [29] 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)
- [30] 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.
- [31] 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 Water Conservation, 2004, 18(6): 63–67.
- [32] 张作为, 李宏宇, 付强, 等. 不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体响应机理研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 245–255.
ZHANG Zuwei, LI Hongyu, FU Qiang, et al. Response mechanism of wheat/maize intercropping system under different water stresses[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 245–255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200127&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.027. (in Chinese)
- [33] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1339–1343.
WANG Zhaohui, WANG Bing, LI Shengxiu. 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. (in Chinese)
- [34] 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.
- [35] 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 Edition), 2014, 39(11): 101–107. (in Chinese)