中国农业大学学报 2026,31(12):135-148
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

韦一昊,杨玉秀,蒋向,沈帅杰,马玲玲,张志勇,王小纯,熊淑萍. 氮肥减施对一年两熟种植模式下作物氮素利用及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):135-148.

WEI Yihao, YANG Yuxiu, JIANG Xiang, SHEN Shuaijie, MA Lingling, ZHANG Zhiyong, WANG Xiaochun, XIONG Shuping. Effects of nitrogen fertilizer reduction on crop nitrogen utilization and yield under annual double-cropping patterns[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 135-148.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.11

氮肥减施对一年两熟种植模式下作物氮素利用及产量的影响

韦一昊[1] 杨玉秀[1] 蒋 向[2] 沈帅杰[1] 马玲玲[1] 张志勇[1] 王小纯[3] 熊淑萍[1*]

(1. 河南农业大学 农学院/小麦玉米两熟高效生产全国重点实验室,郑州 450046;
2. 河南省农业技术推广总站,郑州 450002;
3. 河南农业大学 生命科学学院,郑州 450046)

摘 要 为探究氮肥减施对一年两熟模式下作物氮素利用及产量的影响,于2022—2023年开展田间试验,设置玉米-小麦(M-W)、大豆-小麦(S-W)、花生-小麦(P-W)3种轮作模式,以及秋作物(玉米、大豆、花生)不施氮(0 kg/hm^2,N_0),减氮处理(玉米120 kg/hm^2,大豆60 kg/hm^2,花生120 kg/hm^2)和常规施氮(玉米225 kg/hm^2,大豆120 kg/hm^2,花生180 kg/hm^2)3个施氮水平,小麦季统一施氮120 kg/hm^2,比较不同作物的氮积累量、氮肥利用效率、土壤硝态氮含量、产量及经济效益的变化。结果表明:1)作物产量及产量构成要素均随施氮量的增加而增加,其中减氮处理与常规施氮处理的作物产量无显著差异,但玉米(M)、大豆(S)和花生(P)的氮肥利用率分别升高28.7%、45.6%和13.4%、氮肥偏生产力分别升高83.35%、95.2%和39.6%,氮素吸收效率分别提高61.5%、83.3%和33.1%。2)各施氮水平下的S-W轮作和减氮处理的P-W轮作中秋作物土壤硝态氮含量(尤其深层土壤)均显著低于M-W轮作,并显著降低了氮淋失风险;同时,二者后茬小麦的氮积累量、产量和氮素利用效率均显著高于M-W轮作。减氮处理可在保障秋作物产量的前提下提高氮肥利用效率并减少氮盈余,基于豆科作物的轮作系统(S-W、P-W)可显著降低土壤硝态氮积累与氮淋失风险。3)不同轮作模式中,M-W轮作的产量最高,平均为18 557.0 kg/hm^2,但经济效益最低,平均为32 424.8元/hm^2。在秋作物施氮120 kg/hm^{2}下,S-W与P-W的经济效益无显著差异,但均显著高于M-W轮作。综合考虑产量、环境效益和经济效益,在华北平原增加基于豆科作物的轮作模式,同时配合减氮措施可在保证丰产的同时降低环境风险,实现农业生产的绿色可持续发展。

关键词 玉米-小麦;大豆-小麦;花生-小麦;轮作;施氮量;氮素利用率;产量

中图分类号 S158 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0135-14 **文献标志码** A

Effects of nitrogen fertilizer reduction on crop nitrogen utilization and yield under annual double-cropping patterns

WEI Yihao[1], YANG Yuxiu[1], JIANG Xiang[2], SHEN Shuaijie[1], MA Lingling[1], ZHANG Zhiyong[1], WANG Xiaochun[3], XIONG Shuping[1*]

(1. College of Agronomy/State Key Laboratory of High-Efficiency Production of Wheat-Maize Double Cropping, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;
2. Henan Agricultural Technology Extension Station, Zhengzhou 450002, China;
3. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract To investigate the effects of nitrogen (N) fertilizer reduction on crop N utilization and yield under annual double-cropping systems, a field experiment was conducted from 2022 to 2023. Three cropping systems were established: Maize-wheat (M-W), soybean-wheat (S-W), and peanut-wheat (P-W), combined with three N

收稿日期:2026-01-30;接受日期:2026-03-28
基金项目:国家自然科学基金(32372239);国家重点研发计划(2021YFD1700900)
第一作者:韦一昊(ORCID:0000-0001-9897-0571),讲师,主要从事作物氮素高效利用研究,E-mail:weiyihao@henau.edu.cn
通讯作者:熊淑萍(ORCID:0000-0001-8787-5237),教授,主要从事作物氮素高效利用和智慧农业研究,E-mail:shupxiong@henau.edu.cn

application levels: No N application (0 kg/hm^2), reduced N treatment (120 kg/hm^2 for maize, 60 kg/hm^2 for soybean, 120 kg/hm^2 for peanut), and conventional N application (225 kg/hm^2 for maize, 120 kg/hm^2 for soybean, 180 kg/hm^2 for peanut). Winter wheat uniformly received 120 kg/hm^2. Crop N accumulation, N use efficiency indices, soil nitrate-N content, grain yield, and economic returns were evaluated across different cropping systems. The results showed that: 1) Crop yield and yield components increased with increasing N application rates. Compared with redaced N treatments, reduced N application did not significantly affect crop yields; however, N use efficiency of maize, soybean, and peanut increased by 28.7%, 45.6%, and 13.4%, respectively. 2) Compared with the M-W rotation, the S-W rotation under different N application rates and the P-W rotation under reduced-N treatment both significantly decreased soil nitrate-N content (especially in deep layers) during the autumn crop season, thereby reducing the risk of N leaching. Meanwhile, the N accumulation, yield, and N use efficiency of the subsequent wheat in both rotation systems were significantly higher than those in the M-W rotation. Reducing N fertilizer application can improve N use efficiency and reduce N surplus while ensuring autumn crop yields. Legume-based rotation systems (S-W, P-W) can significantly reduce soil nitrate-N accumulation and the risk of N leaching. 3) Partial factor productivity of N increased by 83.35%, 95.2%, and 39.6%, while N uptake efficiency increased by 61.5%, 83.3%, and 33.1%, respectively. Among the cropping systems, the M-W system achieved the highest grain yield (average 18 557 kg/hm^2) but exhibited the lowest economic return (average 32 424.8 yuan/hm^2). Under the same N application rate of 120 kg/hm^2 for the autumn crop, the economic returns of the S-W and P-W systems were comparable and significantly higher than those of the M-W system. When yield, environmental benefits and economic returns are considered comprehensively, increasing legume-based rotation systems combined with reduced N application in the North China Plain can maintain yield while reducing environmental risks, thereby promoting green and sustainable agricultural production.

Keywords maize-wheat; soybean-wheat; peanut-wheat; double-cropping patterns; nitrogen application rate; nitrogen use efficiency; yield

华北平原是我国最主要的粮食生产区之一,其耕地面积占全国耕地面积的25%,粮食产量占全国总产量的37%[1]。该区域最常见的种植模式是夏玉米-冬小麦轮作,生产了约全国36%的玉米[2]和50%的小麦[3],对于保障我国粮食安全至关重要[4]。自2015年我国实施“化肥使用量零增长行动”以来,全国化肥施用总量已得到有效控制,并提前实现了零增长目标[5]。然而,由于追求高产的惯性思维,“总量控制”与“局部过量”并存的现象依然突出[6]。在玉米-小麦轮作体系中,小麦和玉米的氮需求量均较高,氮肥的过量使用仍非常普遍,导致土壤养分持续呈现盈余[7]。过量的氮肥使用不仅不会持续增加产量、反而造成了氮肥利用率降低、氮淋失风险增加、土壤退化和面源污染等问题[8]。为了在保证粮食产量的同时提升环境效益,迫切需要优化种植制度和氮肥管理,进而实现节肥增效的目标[9-11]。继2020和2022年中央一号文件明确大力实施大豆油料扩种行动后,2023年中央一号文件进一步强调深入推进大豆和油料产能提升工程,支持黄淮海地区开展粮豆轮作。因此,开展优化种植模式和氮肥管理的研究对华北农作区确保产量和效益的同时减少环境风险具有重要意义。

自2000年以来,小麦和玉米的氮肥消费量与需求量均呈现持续增长的趋势,在当前的产量水平和管理模式下,氮肥管理仍具备优化潜力[12]。已有研究表明,玉米和小麦适当减量施肥不会显著降低产量,反而能更好地利用光温水资源,提高氮肥利用率[13]。此外,茬口效应能通过一系列生物和非生物因子直接或间接影响土壤性状及后茬作物生长[14]。因此,构建适合的多样化种植模式对提高产量和资源利用效率,以及降低环境污染风险具有巨大潜力。已有研究表明,采用豆科作物与小麦轮作能有效改善土壤氮素失衡状况,提高小麦的氮素利用效率[15]。此外,与麦-玉轮作相比,麦-豆轮作能够减少病、虫、草害的发生[16],豆科作物的秸秆还田也是增加土壤有机质、改善土壤结构的有效方法[17]。

华北平原高度集约化的冬小麦-夏玉米周年轮作制度中过量施氮问题突出,且夏季降雨集中导致农田氮淋失风险大幅增加[18]。已有研究表明,减氮和改变轮作模式能够显著影响农田系统的氮循环

过程[19-21]。但二者协同对一年两熟种植系统的产量、经济效益、氮利用效率和环境效益综合影响的研究鲜见报道。本研究通过设置不同氮肥水平下的玉米-小麦、大豆-小麦、花生-小麦轮作试验，测定周年氮肥减施对3种轮作体系作物产量及氮素吸收利用的影响，并解析不同轮作模式对农田系统氮循环的时空变化特征，旨在揭示氮肥减施对一年两熟模式下作物氮素利用及产量的调控效应，以期为构建高产高效绿色可持续发展的种植制度提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2022年6月—2023年5月在河南农业大学许昌校区试验田（34.14° N，113.82° E，海拔69 m）进行。该地区属于温带季风气候，试验地的土壤类型为潮土，秋作物播种前0—20 cm耕层土壤有机质含量为16.92 g/kg，全氮含量为1.36 g/kg，有效磷含量为7.61 mg/kg，速效钾含量为115.14 mg/kg。2022年6—9月秋作物生育期内总降雨量为356.40 mm，2022年10月—2023年5月小麦生育期内总降雨量为268.07 mm，逐月降雨量和月均气温见图1。

1.2　试验设计

供试玉米品种为‘大丰30’，种植密度6.9万株/hm^2；大豆品种为‘囤豆一号’，种植密度11.2万株/hm^2；花生品种为‘鲁花14’，种植密度19.3万株/hm^2；后茬的小麦品种均为‘伟隆169’，种植密度320.5万株/hm^2。采用裂区试验设计，共9个小区，小区面积为30×30 m^2，主因素设玉米-小麦（M-W）、大豆-小麦（S-W）、花生-小麦（P-W）3种一年两熟种植模式，次要因素为氮肥处理。小麦季各处理施氮量统一为120 kg/hm^2。

参考文献[19-21]设置秋作物施氮水平，秋作物（玉米、大豆、花生）设3个施氮水平：不施氮（0 kg/hm^2，N_0）、减氮（玉米120 kg/hm^2、大豆60 kg/hm^2、花生120 kg/hm^2，分别记为RN_M、RN_S、RN_P）和常规施氮（玉米225 kg/hm^2、大豆120 kg/hm^2、花生180 kg/hm^2，分别为CN_M、CN_S、CN_P），小麦季统一施氮120 kg/hm^2。所用氮、磷、钾肥料分别为尿素（含N 46 g/100 g）、过磷酸钙（含P_2O_5 12 g/100 g）和硫酸钾（含K_2O 52 g/100 g）。各处理磷、钾肥施用量相同，均为120 kg/hm^2（分别以P_2O_5、K_2O计），均作为基肥于每季作物播种前一次性施入。氮肥采用分期施用，小麦季60%作基肥于播种前施入，40%作拔节肥于拔节期追施；夏玉米季40%作基肥于播种前施入，60%作拔节肥于大喇叭口期结合降雨或灌溉追施；大豆和花生季氮肥按50%基肥、50%追肥施用，基肥于播种前施入，追肥于花生开花下针期施入。

水分管理方面，小麦全生育期灌溉2次，分别为拔节水（3月中旬，约70 mm）和灌浆水（5月上旬，约60 mm），总灌水量约130 mm；秋作物于苗期灌溉1次，灌水量70 mm。试验期间，各小区病虫害防治、杂草清除、秸秆还田等农艺措施均按当地高产田块管理标准统一进行，确保除氮肥处理外其他条件一致。

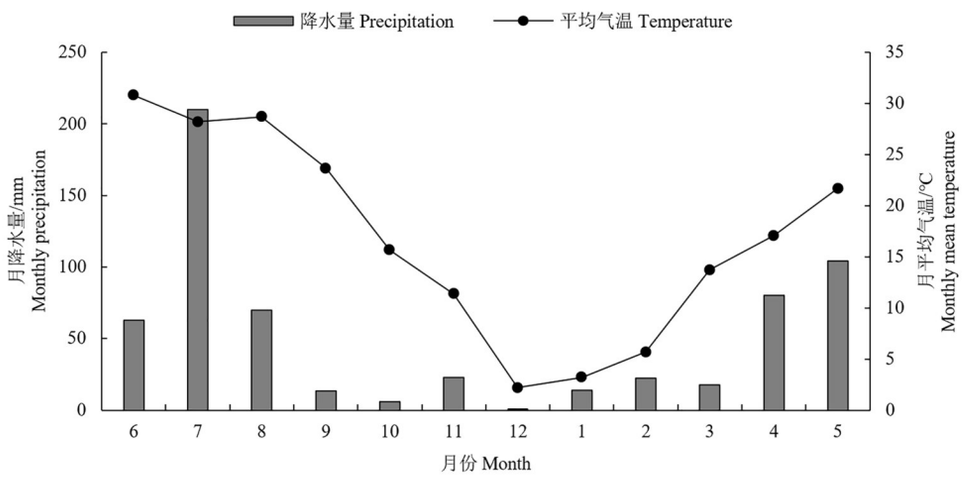


图1　2022年6月—2023年5月的降雨量和平均气温

Fig. 1　Monthly precipitation and mean temperature from June 2022 to May 2023

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株各部分氮含量

于玉米开花期、灌浆期、成熟期3个时期，大豆开花期、鼓粒期、成熟期3个时期，花生开花下针期、结荚期、成熟期3个时期取长势一致且良好的植株。每个处理玉米取3株，大豆和花生各取10株，共3次重复。小麦于拔节期、开花期、成熟期3个时期取长势一致的植株，每组10株，重复3次。采集的鲜样在105 ℃下杀青30 min，然后在75 ℃下干燥至恒重后称重并研磨成粉末。使用浓硫酸-高氯酸法[19]（V∶V=95∶5）消煮，使用全自动连续流动分析仪（AA3, SEAL Analytical, Germany）测定植株含氮量。

1.3.2 土壤样品采集

在玉米、大豆和花生播种前，以每20 cm为一层采集土壤样品测定基础肥力，使用环刀法[7]测定容重。于玉米拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期、成熟期；大豆的幼苗期、花芽分化期、开花结荚期、鼓粒期、成熟期；花生的苗期、始花期、开花下针期、结荚期、成熟期和小麦拔节期、开花期、成熟期分别取 0—20、>20—40、>40—60、>60—80、>80—100 cm土层的土壤样品，重复3次，一部分放入自封袋中带回实验室后，将土壤过2 mm筛均质化后储存在−40 ℃，以测定土样含水率和铵、硝态氮含量。

1.3.3 土壤氮素

称取10 g新鲜土壤置于180 mL的塑料瓶中，加入50 mL（1 mol/L）的KCl溶液，振荡1 h，过滤。使用德国水尔分析仪器有限公司的全自动连续流动分析仪（AA3，SEAL Analytical），参照曲文凯等[7]的方法测定滤液中硝态氮和铵态氮的含量。

1.4 数据分析

氮肥利用率（NUE）=（施氮区植株氮积累量−N_0植株氮积累量）/施氮量×100%[22]；

氮肥偏生产力（NPFP）=施氮区成熟期籽粒产量/施氮量[23]；

氮素吸收效率（NUPE）=施氮区成熟期植株氮积累量/施氮量[24]。

计算经济效益时，总成本包括轮作的两季作物种子、肥料、机播、机收和农药的成本投入。按当地当年市场均价计算相关费用：播种人工费（玉米、大豆、小麦均为30元/666.7 m^2，花生50元/666.7 m^2）；收获机械使用费（玉米80、大豆60、花生160、小麦60元/666.7 m^2）；农药费（玉米/大豆/小麦30、花生40元/666.7 m^2）；种子价格（玉米40.0、大豆14.0、花生16.0和小麦6.2元/kg）。肥料价格（复合肥2.8、磷肥2.0、钾肥5.4元/kg）；售价（玉米1.86、大豆5.20、花生9.00、小麦1.23元/kg）。

周年经济效益为两季产值总和减去总成本后的利润具体计算公式如下：

经济效益（元/hm^2）=产值-总成本。

在计算氮素表观平衡时，将土层定义在0—100 cm，即作物根系的主要吸收区域。本研究的氮平衡计算未包含大气沉降、灌溉水氮输入以及氨挥发、反硝化、淋溶等氮素损失项，因此“氮盈余”仅反映作物吸收与土壤残留之间的表观分配关系，而非严格的系统氮收支平衡，主要聚焦于土壤-作物系统中可量化且主导的氮素流动过程。有关氮平衡计算公式如下[22-25]：

土壤硝（铵）态氮积累量（kg/hm^2）=土层厚度×土壤容重×硝（铵）态氮含量[22]；

土壤起始氮（kg/hm^2）=播前土壤铵态氮积累量+播前土壤硝态氮积累量[24]；

土壤残留氮（kg/hm^2）=收获后土壤铵态氮积累量+收获后土壤硝态氮积累量[22]；

氮矿化量（kg/hm^2）=N_0植株氮素积累量+N_0土壤残留氮−N_0土壤起始氮[23]；

氮输入量（kg/hm^2）=土壤起始氮+施氮量+氮矿化量[25]；

氮盈余（kg/hm^2）=氮输入量−植株氮积累量[25]。

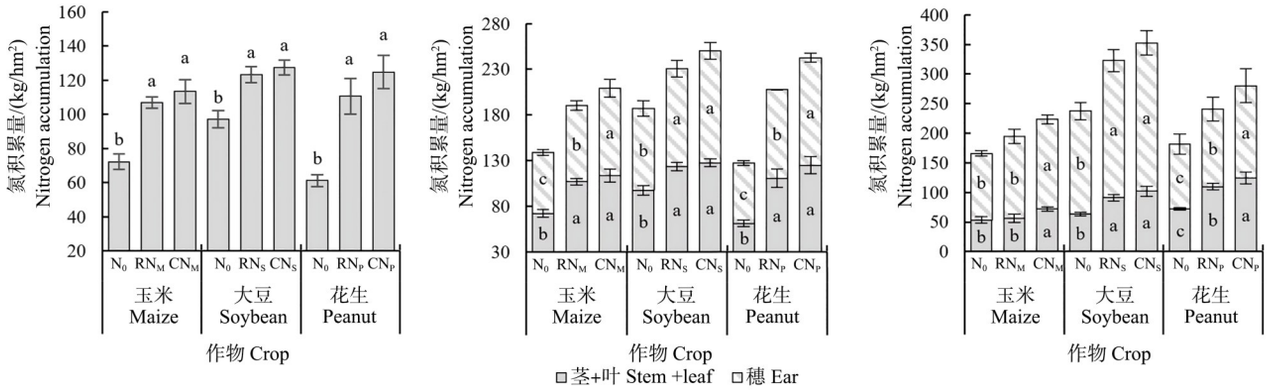
试验数据利用Excel进行初步分析处理，利用SPSS Statistics 26.0进行统计处理，处理间使用方差分析（ANOVA），通过Origin 2018和GraphPad prism完成绘图。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式与施氮量对作物氮积累量的影响

2.1.1 秋作物

由图2可知，随着施氮量的增加，各生育时期的玉米（M）、大豆（S）和花生（P）植株各部位氮积累量均呈现逐渐增加的趋势，且均在常规施氮处理达到最大。在秋作物成熟期，大豆减氮处理（RN_S）的植株氮积累量与常规施氮处理（CN_S）无显著差异，而减氮处理的玉米和花生植株的氮积累量均显著低



(a) 开花期 Flowering stage　(b) 灌浆期 Grain filling stage　(c) 成熟期 Maturity stage

N_0，秋作物不施用氮肥；RN 为减氮处理，RN_M、RN_S、RN_P 分别为玉米 120 kg/hm²、大豆 60 kg/hm²、花生 120 kg/hm²；CN 为常规施氮处理，CN_M、CN_S、CN_P 分别为玉米 225 kg/hm²、大豆 120 kg/hm²、花生 180 kg/hm²。不同字母表示同一作物、同一生育时期不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

N_0, no N application for autumn crops. RN, reduced N application for autumn crops; RN_M, RN_S, RN_P are 120 kg/hm² for maize, 60 kg/hm² for soybean, 120 kg/hm² for peanut, respectively. CN, conventional N application for autumn crops; CN_M, CN_S, CN_P are 225 kg/hm² for maize, 120 kg/hm² for soybean, 180 kg/hm² for peanut, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen treatments within the same crop ($P<0.05$). The same below.

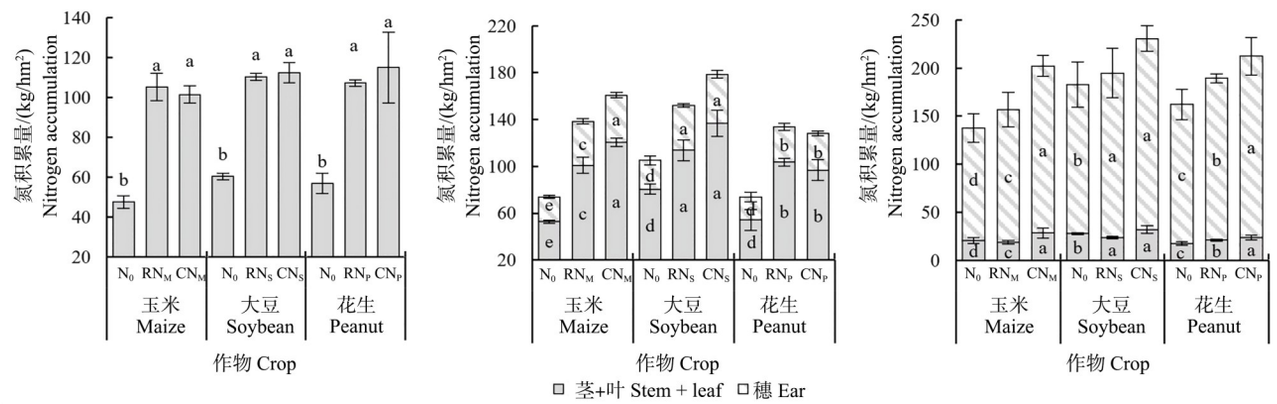
图 2　不同轮作模式下不同生育时期玉米、大豆和花生的植株氮素积累量

Fig. 2　Plant nitrogen accumulation of maize, soybean, and peanut at different growth stages under different cropping rotation patterns

于常规施氮处理。在玉米-小麦（M-W）轮作模式下，玉米成熟期减氮处理（RN_M）和常规施氮处理（CN_M）的植株氮积累量分别比不施氮处理的玉米高 19.18% 和 44.64%。在大豆-小麦（P-W）轮作模式下，大豆成熟期减氮处理（RN_S）和常规施氮处理（CN_S）的植株氮积累量分别较不施氮处理大豆增加 33.11% 和 42.37%。在花生-小麦轮作模式下，花生成熟期减氮处理（RN_P）和常规施氮处理（CN_P）的植株氮积累量分别比不施氮处理花生增加 61.55% 和 80.99%。

2.1.2　小麦

由图 3 可知，玉米-小麦（Z-W）、大豆-小麦（S-W）、花生-小麦（P-W）3 种轮作种植模式下的小麦植株氮积累量随着前茬作物施氮量的增加呈增加的趋势。减氮和常规施氮处理玉米的后茬小麦氮积累量比不施氮处理玉米的后茬小麦分别增加 17.23% 和 49.16%；减氮和常规施氮处理大豆的后茬小麦氮积累量比不施氮处理大豆的后茬小麦分别增加 11.41% 和 29.16%；减氮和常规施氮处理花生的后茬小麦氮积累量比不施氮处理花生的后茬



(a) 开花期 Flowering stage　(b) 灌浆期 Grain filling stage　(c) 成熟期 Maturity stage

图 3　不同轮作模式下不同生育时期小麦植株的氮素积累量

Fig. 3　Plant nitrogen accumulation of wheat at different growth stages under different crop rotation patterns

小麦分别增加15.95%和30.44%。

秋作物不施氮条件下，大豆后茬的小麦氮积累量较玉米后茬小麦增加31.83%，较花生后茬小麦增加7.81%；秋作物减氮条件下，大豆后茬小麦较玉米后茬小麦的氮积累量增加45.25%，较花生后茬小麦氮积累量增加20.09%；秋作物常规施氮条件下，大豆后茬小麦较玉米后茬小麦的氮积累量增加14.15%，较花生后茬小麦氮积累量增加8.64%。

2.2 不同轮作模式与施氮量对氮素利用效率的影响

由表1可知，随着施氮量的增加，秋作物的氮肥利用率（NUE）、氮肥偏生产力（NPFP）和氮素吸收效率（NUPE）均呈现下降的趋势，3种作物的NUE、NPFP和NUPE均在减氮处理达到最高。与常规施氮处理相比，减氮处理的玉米、大豆和花生的NUE分别升高28.70%、45.61%和13.39%，NPFP分别升高83.35%、95.23%和39.57%，NUPE分别增加61.48%、83.33%和33.06%。随着前茬玉米、大豆和花生作物施氮量的增加，后茬小麦的NPFP和NUPE均呈现增加趋势。另，秋作物施氮量相同（玉米、大豆、花生施氮量均为120 kg/hm^2）条件下，大豆的后茬小麦NPFP和NUPE均为最高，其中NPFP比玉米和花生后茬的小麦分别高11.95%和5.87%，NUPE比玉米和花生后茬的小麦分别高42.42%和17.50%。

表1 不同轮作模式与施氮处理下秋作物和小麦的氮素利用率

Table 1 Nitrogen use efficiency of autumn crop and wheat under different rotation patterns and nitrogen treatments kg/kg

秋作物 Autumn crop	氮处理 Nitrogen treatment	秋作物 Autumn crop			小麦季 Wheat season	
		氮肥利用率 NUE	氮肥偏生产力 NPFP	氮素吸收效率 NUPE	氮肥偏生产力 NPFP	氮素吸收效率 NUPE
玉米 Maize	RN_M	73.86±2.35^a	96.24±2.81^a	1.97±0.12^a	66.12±1.98^b	1.32±0.10^c
	CN_M	45.15±3.83^b	52.49±1.52^b	1.22±0.17^b	69.73±1.29^a	1.68±0.21^b
大豆 Soybean	RN_S	128.98±6.87^a	67.96±1.96^a	3.19±0.31^a	71.77±2.11^a	1.62±0.22^b
	CN_S	83.37±4.62^b	34.81±1.92^b	1.74±0.11^b	74.18±3.17^a	1.88±0.19^a
花生 Peanut	RN_P	82.07±2.12^a	39.96±2.15^a	1.65±0.22^a	69.91±2.95^a	1.60±0.14^b
	CN_P	68.68±1.18^b	28.63±1.83^b	1.24±0.18^b	72.96±2.03^a	1.78±0.18^a

2.3 不同轮作模式与施氮处理下不同轮作生长季土壤硝态氮的时空分布特征

2.3.1 秋作物

由图4可知，随着土层深度的增加，各处理土壤硝态氮含量呈现逐渐降低趋势，在0—40 cm土层的含量最高，>80—100 cm最低，且0—40 cm土层硝态氮含量均显著高于>40—100 cm。同时，玉米、大豆和花生土壤硝态氮的含量均随着施氮量的增加而增加。

玉米成熟期，减氮和常规施氮处理的0—40 cm土壤硝态氮含量分别比不施氮处理增加50.73%和242.76%；大豆成熟期，减氮和常规施氮处理的0—40 cm土壤硝态氮含量分别比不施氮处理增加3.55%和21.51%；花生成熟期，减氮和常规施氮处理的0—40 cm土壤硝态氮含量分别比不施氮处理增加65.88%和174.34%。

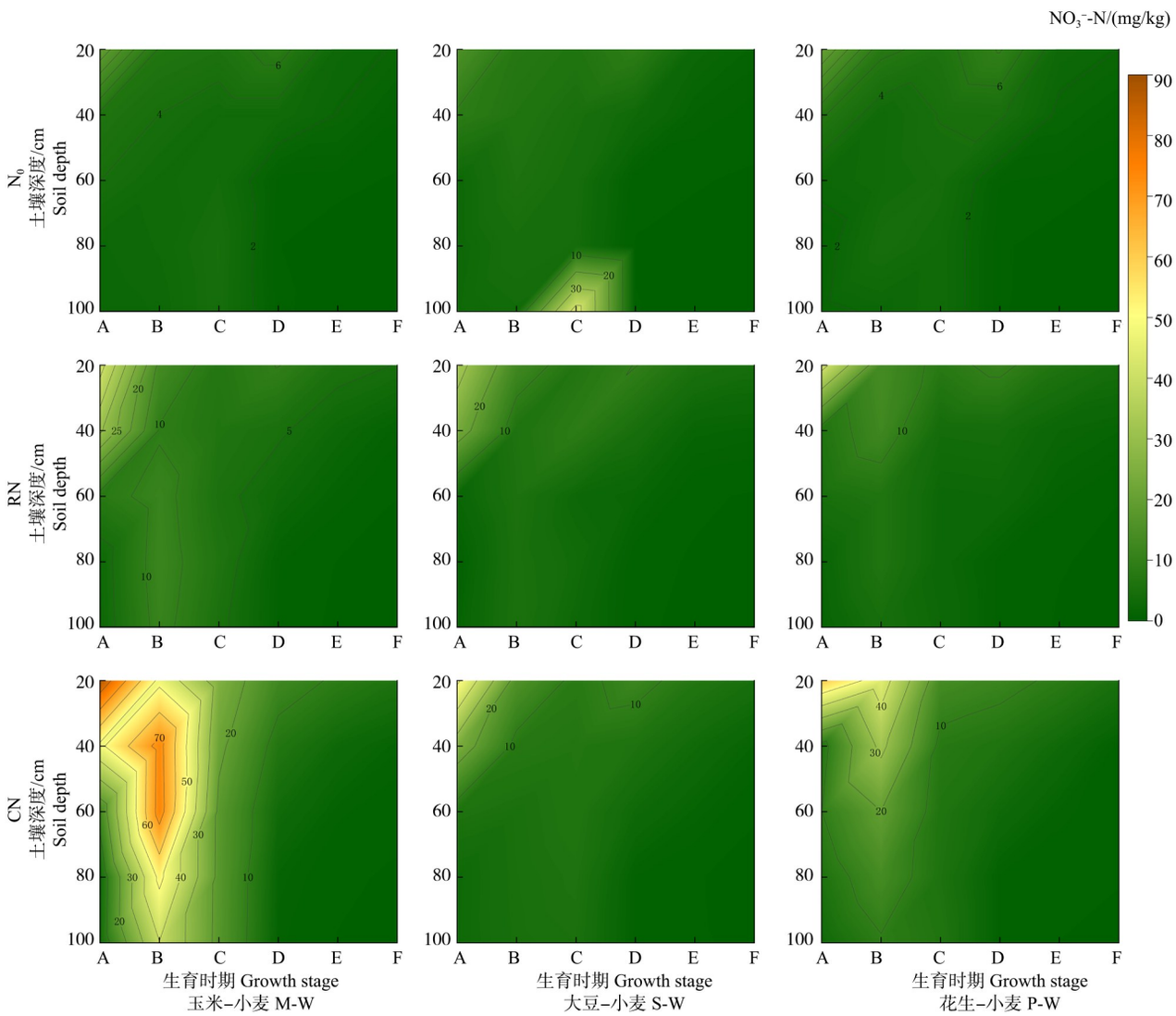
常规施氮条件下，玉米在营养生长期的0—100 cm土层整体硝态氮含量均高于大豆和花生，0—40 cm土层硝态氮含量较同期大豆和花生常规施氮处理分别高68.86%和44.35%。因此，相比高氮投入的玉米-小麦轮作，大豆-小麦、花生-小麦轮作均可显著减少0—100 cm土体硝态氮积累，降低淋失风险。

2.3.2 小麦

在不同轮作模式和施氮量处理下，小麦生长季的土壤硝态氮含量均随土层深度的增加而减少，硝态氮整体迁移不明显，仅拔节至开花期的0—40 cm土层变化幅度相对较大。在小麦成熟期，减氮和常规施氮处理的玉米后茬小麦0—40 cm土壤硝态氮含量分别较不施氮处理的玉米后茬小麦增加158.15%和176.69%；减氮和常规施氮处理大豆后

茬小麦 0—40 cm 土壤硝态氮含量分别较不施氮处理的大豆后茬小麦增加 162.77% 和 182.74%；减氮和常规施氮处理花生的后茬小麦 0—40 cm 土壤硝态氮含量分别较不施氮处理的花生后茬小麦增加 141.47% 和 173.08%。

施氮量相同条件下，大豆后茬小麦的土壤硝态氮含量显著高于玉米和花生后茬，其中大豆后茬小麦全生育期 0—40 cm 土层硝态氮含量较玉米后茬小麦平均增加 14.77%，较花生后茬小麦平均增加 3.86%。



A、B、C为2022年秋作物营养生长期、开花期、成熟期；D、E、F分别为2022—2023年小麦季拔节期、开花期、成熟期。

A, B, C are vegetative growth, flowering and maturing stages of 2022 autumn crops, respectively; D, E, F refer to the jointing, flowering and maturing stages of wheat in 2022-2023, respectively.

图 4　不同轮作模式和施氮处理下不同土层土壤硝态氮含量动态变化

Fig. 4　Dynamic changes of soil nitrate nitrogen content in different soil layers under different rotation patterns and nitrogen treatments

2.4　不同轮作模式与施氮量对作物-土壤氮平衡的影响

由表 2 可知，氮输入项主要包括土壤起始氮、肥料施用和土壤氮素矿化量 3 项，其中，肥料施用是氮素输入的主要来源，占氮输入总量的 40.60%～72.96%；氮输出量为周年植株氮积累量，两季作物收获累积带走的总氮量为 313.33～475.84 kg/hm^2，土壤残留氮量为 43.93～73.30 kg/hm^2。土壤氮盈

余>0,说明轮作模式为氮素盈余;土壤氮盈余<0,则为氮素亏损。整体来看,不同施氮量和轮作模式的氮平衡在周年生产中均有盈余,盈余量为20.38~78.78 kg/hm^2,只有玉米-小麦轮作模式下不施氮处理有亏缺。随施氮量的增加,氮盈余呈现增加的趋势,3种轮作模式均在常规施氮条件下达到最大。与常规施氮相比,玉米-小麦、大豆-小麦、花生-小麦轮作模式在减氮处理下的氮盈余分别降低31.04%、17.00%、17.55%。

2.5 不同轮作模式与施氮量对作物产量的影响

2.5.1 秋作物

由表3可知,3种轮作模式下秋作物产量均随施氮量增加而增加,产量由高到低为常规施氮>减氮>不施氮;常规施氮和减氮处理的作物产量均显著高于不施氮处理,而常规施氮和减氮处理间均无显著差异,说明减氮能一定程度保持秋作物产量稳定。从产量构成看,施氮显著提高了玉米的穗粒数和百粒重,但对单位面积株数影响不显著;大豆和花生的单株粒数在减氮和常规施氮下亦显著高于不施氮处理。

减氮和常规施氮处理的玉米穗粒数较不施氮处理分别增加9.74%和11.21%,百粒重分别增加6.88%和8.44%,产量分别增加10.67%和14.13%。减氮和常规施氮处理的大豆荚粒数较不施氮处理分别增加24.00%和22.67%,百粒重无显著差异,产量增幅分别为33.55%和34.22%。减氮和常规施氮处理的花生单株粒数较不施氮处理分别增加20.00%和25.00%,百粒重分别增加2.40%和4.20%,产量分别增加26.95%和40.13%。

2.5.2 小麦

小麦的产量均随前茬作物施氮量的增加而增加。减氮和常规施氮处理的玉米后茬小麦产量较玉米不施氮处理后茬分别增加13.03%和19.27%。减氮和常规施氮处理的大豆后茬小麦产量较大豆不施氮处理后茬分别增加14.79%和18.38%;减氮和常规施氮处理的花生后茬小麦产量较花生不施氮处理后茬分别增加12.07%和16.87%。不施氮处理下,大豆后茬的小麦产量较玉米和花生后茬的产量分别增加6.94%和0.21%。在秋作物施氮量相同条件下,大豆后茬小麦较玉米和花生后茬的产量分别增加11.99%和5.85%。整体来看,玉米-小麦、大豆-小麦、花生-小麦轮作模式的籽粒产量总和均随着施氮量的增加而增加,均为常规施氮处理最大,但3种轮作模式的常规施氮处理籽粒产量总和与减氮处理差异均不显著(表3)。

2.6 不同轮作模式与施氮量对经济效益的影响

由表4可知,玉米、大豆、花生和小麦的产值、投入的总成本和经济效益均随施氮量增加而递增。秋作物施氮量相同条件下,大豆-小麦周年经济效益最高(35 992.3元/hm^2),显著高于玉米-小麦轮作。不同作物间,花生常规施氮下的产值和经济效益均最高,显著高于同处理下的大豆和玉米;而在秋作物施氮量相同条件下,大豆与花生的经济效益无显著差异。对于玉米而言,与不施氮处理相比,减氮处理的产量提升了15.6%,产值增加2 656.1元/hm^2,经济效益提高了2 046.5元/hm^2;而常规氮处理则分别提升了18.2%、3 092.7元/ hm^{2}和1 949.7元/hm^2。对于大豆而言,与不施氮处理相比,减氮处理使产量、产值和经济效益分别提升了27.7%、4 602.0元/hm^{2}和4 334.3元/hm^2;常规氮处理则相应提高30.9%、5 120.7元/hm^{2}和4 583.0元/hm^2。对于花生而言,与不施氮处理相比,减氮处理使得产量、产值和经济效益分别增加了29.9%、3 942.8元/hm^{2}和3 404.5元/hm^2;而常规氮处理则分别实现了39.6%、6 169.3元/hm^{2}和5 362.7元/hm^{2}的增幅。

小麦的产值和经济效益均随秋作物施氮增加而提高,常规施氮处理的大豆后茬小麦最高,分别为21 841.1和18 858.2元/hm^2。秋作物施氮量相同条件下,大豆后茬小麦的产量、产值和经济效益均高于其他后茬小麦,较玉米后茬小麦分别提高30.8%和2 339.4元/hm^2,较花生后茬小麦分别提高13.6%和1 206.6元/hm^2。

3 讨 论

3.1 豆科作物-小麦轮作配合减氮对作物产量、氮素利用及经济效益的协同效应

种植制度的优化是协调粮食增产、资源高效利用与环境可持续的重要路径[26-28],其中轮作模式调整和氮肥管理是关键调控手段[29]。围绕轮作模式与施氮量对作物产量及氮素利用的影响已开展了大量研究。已有研究证实,与前茬玉米相比,大豆前茬可显著提高后茬小麦的氮积累量和产量[15];豆

表 2　不同轮作模式和施氮量处理下作物-土壤的氮平衡状态

Table 2　Nitrogen balance of crop-soil system under different rotation patterns and nitrogen application treatments　kg/hm²

轮作模式 Crop rotation	氮处理 Nitrogen treatment	氮输入 N-input				氮输出 N-output		氮盈余 N surplus
		土壤起始氮 Initial soil N	秋作物施氮量 N- Autumn crops	小麦施氮量 N-Wheat	氮矿化量 N-mineralization	周年植株氮积累量 Annual plant N accumulation	土壤残留氮 Soil residual N	
玉米-小麦 M-W	N_0	81.78±2.16^{a}	0	120	127.84±3.38^{a}	339.14±8.97^{d}	49.69±1.30^{cd}	−9.53±0.25^{e}
	RN_M	81.78±2.16^{a}	120	120	127.84±3.38^{a}	395.28±10.46^{bc}	57.10±1.51^{bc}	54.33±1.44^{bc}
	CN_M	81.78±2.16^{a}	225	120	127.84±3.38^{a}	475.84±12.59^{a}	73.30±1.94^{a}	78.78±2.08^{a}
大豆-小麦 S-W	N_0	79.62±2.11^{ab}	0	120	175.56±4.65^{b}	352.26±9.32^{cd}	43.93±1.16^{d}	22.93±0.61^{d}
	RN_S	79.62±2.11^{ab}	60	120	175.56±4.65^{b}	385.29±10.19^{bc}	47.18±1.25^{cd}	49.9±1.32^{c}
	CN_S	79.62±2.11^{ab}	120	120	175.56±4.65^{b}	435.06±11.51^{b}	53.65±1.42^{c}	60.12±1.59^{b}
花生-小麦 P-W	N_0	74.3±1.96^{b}	0	120	139.42±3.69^{b}	313.33±8.29^{d}	47.22±1.25^{cd}	20.38±0.54^{d}
	RN_P	74.3±1.96^{b}	120	120	139.42±3.69^{b}	390.61±10.33^{bc}	55.73±1.48^{bc}	63.10±1.67^{b}
	CN_P	74.3±1.96^{b}	180	120	139.42±3.69^{b}	437.19±11.57^{b}	63.53±1.68^{b}	76.53±2.03^{a}

表 3　不同轮作模式与施氮量下秋作物和小麦的产量及产量构成

Table 3　Yield and yield components of autumn crops and wheat under different rotation patterns and nitrogen application rates

轮作模式 Crop rotation	氮处理 Nitrogen treatment	秋作物（2022年） Autumn crops				小麦（2022—2023年） Wheat				周年产量/（kg/hm²） Annual yield
		单位面积穗（株）数/（10^4 株/hm²） Spikes (plant) per unit area	穗（株）粒数 Grains per spike (plant)	百粒重/g 100-grain weight	产量/（kg/hm²） Yield	单位面积穗数/（10^4 个/hm²） Spikes number per unit area	穗粒数 Grains per spikes	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/（kg/hm²） Yield	
M-W	N_0	6.36±0.25^{a}	544.24±14.46^{b}	32.01±0.74^{b}	9 964.49±263.54^{b}	537.02±15.50^{b}	39.24±1.04^{a}	39.44±1.03^{b}	7 014.03±185.57^{b}	16 978.52±449.20^{b}
	RN_M	6.37±0.26^{a}	597.53±16.54^{a}	34.22±0.79^{a}	11 028.03±291.85^{a}	553.53±15.98^{b}	41.22±1.12^{a}	41.11±1.09^{a}	7 927.52±209.74^{b}	18 955.05±501.50^{a}
	CN_M	6.69±0.22^{a}	605.11±16.87^{a}	34.71±0.81^{a}	11 371.45±301.45^{a}	609.02±17.58^{a}	41.07±1.08^{a}	40.43±1.07^{a}	8 365.51±221.99^{a}	19 737.53±522.21^{a}
S-W	N_0	16.07±0.65^{a}	74.88±3.35^{b}	26.27±0.61^{a}	3 147.04±83.26^{b}	568.46±16.41^{b}	39.45±1.05^{a}	39.78±1.11^{b}	7 500.03±198.43^{b}	10 647.49±281.70^{b}
	RN_S	17.06±0.72^{a}	93.34±4.19^{a}	26.29±0.62^{a}	4 171.51±110.36^{a}	631.47±18.23^{a}	40.67±1.09^{a}	40.13±1.06^{a}	8 610.04±227.80^{a}	12 781.51±338.16^{a}
	CN_S	17.64±0.82^{a}	92.55±4.16^{a}	26.23±0.59^{a}	4 224.03±111.56^{a}	648.04±18.71^{a}	40.89±1.06^{a}	40.25±1.12^{a}	8 878.45±234.90^{a}	13 102.49±346.66^{a}
P-W	N_0	22.73±1.12^{a}	20.34±0.92^{b}	83.46±2.03^{a}	3 790.45±100.84^{b}	549.02±15.85^{b}	39.85±0.98^{a}	40.08±1.06^{a}	7 485.04±197.84^{b}	11 275.49±298.32^{b}
	RN_P	23.48±1.42^{a}	24.32±1.09^{a}	85.41±2.19^{a}	4 812.04±126.84^{a}	580.49±16.75^{b}	40.12±1.21^{a}	42.45±1.13^{a}	8 388.01±221.93^{a}	13 200.05±349.24^{a}
	CN_P	24.43±1.33^{a}	25.76±1015^{a}	86.93±2.76^{a}	5 311.47±140.59^{a}	586.46±16.93^{b}	41.10±1.09^{a}	42.78±1.25^{a}	8 748.00±231.45^{a}	14 059.47±371.98^{a}

表4　不同轮作模式和施氮量的周年产量及经济效益(2022—2023)

Table 4　Annual yield and economic benefits under different rotation patterns and nitrogen application rates (2022-2023)

轮作模式 Crop rotation	氮素处理 Nitrogen treatment	产值/(元/hm²) Output value		成本/(元/hm²) Cost		经济效益/(元/hm²) Economic benefits		周年经济效益/(元/hm²) Annual economic benefit
		秋作物 Autumn crops	小麦 Wheat	秋作物 Autumn crops	小麦 Wheat	秋作物 Autumn crops	小麦 Wheat	
M-W	N_0	17 017.6±450.24^{d}	17 254.4±456.51^{c}	2 053.7±54.33^{d}	2 982.9	14 963.9±395.91^{c}	14 271.6±377.59^{c}	29 235.4±773.50^{d}
	RN_M	19 673.7±520.52^{c}	19 501.7±515.97^{a}	2 663.3±70.47^{c}	2 982.9	17 010.4±450.05^{b}	16 518.8±437.05^{b}	33 529.2±887.10^{c}
	CN_M	20 110.3±532.07^{b}	20 579.1±544.47^{a}	3 196.7±84.58^{c}	2 982.9	16 913.6±447.49^{b}	17 596.3±465.55^{a}	34 509.8±913.04^{b}
S-W	N_0	16 598.4±439.15^{d}	18 450.0±488.14^{b}	4 047.3±107.08^{b}	2 982.9	12 551.1±332.07^{c}	15 467.1±409.22^{b}	28 018.2±741.29^{d}
	RN_S	21 200.4±560.91^{b}	21 180.6±560.39^{a}	4 315.0±114.16^{b}	2 982.9	16 885.4±446.75^{b}	18 197.7±481.47^{a}	35 083.1±928.21^{b}
	CN_S	21 719.1±574.63^{b}	21 841.1±577.86^{a}	4 585.0±121.31^{b}	2 982.9	17 134.1±453.32^{b}	18 858.2±498.94^{a}	35 992.3±952.26^{b}
P-W	N_0	23 210.0±614.08^{b}	18 413.1±487.16^{b}	8 520.1±225.42^{a}	2 982.9	14 693.3±388.75^{c}	15 430.2±408.25^{b}	30 120.1±796.90^{c}
	RN_P	27 152.8±718.40^{a}	20 634.5±545.94^{a}	9 057.8±239.65^{a}	2 982.9	18 097.8±478.82^{b}	17 651.6±467.02^{a}	35 746.6±945.77^{b}
	CN_P	29 379.3±777.30^{a}	21 520.1±569.37^{a}	9 326.7±246.82^{a}	2 982.9	20 056.0±530.63^{a}	18 537.2±490.45^{a}	38 589.8±820.99^{a}

科-小麦轮作体系能够在减少化肥投入的同时维持较高的周年经济效益[17]；不同轮作模式下，冬小麦的氮肥利用率存在显著差异，其中豆科前茬更有利于提高后茬小麦的氮吸收效率[20]。在减量施氮的效果方面，玉米-大豆套作系统中的研究显示，减量施氮可促进土壤氮素转化并维持较高的作物产量[4]。然而，现有研究多集中于单一轮作模式或单一减氮措施，缺乏对玉米-小麦、大豆-小麦、花生-小麦3种典型一年两熟模式在不同氮水平下产量、氮效率、经济效益及环境效益的系统比较。适宜的施氮量能促进作物生长发育和产量提高，但过量的氮肥不仅不会持续增加产量反而会导致土壤硝态氮累积，造成氮淋失风险[30]。在本试验条件下，减氮处理未显著降低秋作物产量，且提高了氮利用效率、降低了氮盈余（表1，表2和表3）。但该结论尚需多年多点试验进一步验证。此外，不同的轮作茬口会显著影响后茬作物的生长、氮吸收和产量。相对于玉米，大豆和花生的后茬小麦有更高的产量和氮积累量（图3和表3）。已有研究表明，豆科作物作为前茬除了可提供氮素外，还可能通过改善土壤结构、增强生物多样性等机制促进后茬作物生长[15,31]。本研究中大豆和花生后茬的小麦增产效应（表3）可能与此类非氮效应有关，但具体内在机制尚待进一步研究。

从经济效益来看，豆科作物因氮肥需求量低、经济价值较高，以其为基础的轮作系统在周年经济效益上具有明显优势。秋作物施氮量相同时（120 kg/hm^2），大豆-小麦轮作的经济效益最高，达到了35 992.3元/hm^2（表4）。综上，本研究在同一试验条件下系统比较了3种一年两熟模式（M-W、S-W、P-W）在不同氮水平下的产量、氮利用效率、经济效益及土壤硝态氮动态变化，明确了豆科作物-小麦轮作配合减氮在稳产、提升氮素利用效率和降低环境风险方面的综合优势，为华北平原构建高产、高效、绿色的种植制度提供了多目标优化的理论依据。此外本研究的不同作物在氮肥需求上存在差异，未来可进一步针对不同氮肥利用类型的作物确定最优施氮量，并开展多年多点验证，以支撑华北不同生态区可持续轮作模式的精准构建。

3.2　豆科作物-小麦轮作配合减氮对土壤硝态氮积累及氮淋失风险的调控效应

施氮量不仅显著影响作物产量，也显著影响农田氮肥利用效率[7]；而氮肥偏生产力、氮素吸收效率以及氮肥利用率，这些均是衡量氮肥利用效率的量化标准，间接地展现了作物对氮肥的利用情况[32]。许多研究已经证实，长期过量施用氮肥对作物的产量没有显著的提升效果，反而会造成氮肥利用率降低[33-35]。本研究结果表明，玉米、大豆和花生的NUE、NPFP和NUPE均随施氮量的增加呈现下降的趋势，三者均在减氮处理达到最高值，这与已有文献[21-24,35]研究结果一致。此外，以豆科作物作为前茬同样可提高后茬小麦的氮肥利用率，但是，花生-小麦轮作在常规施氮条件下同样造成了较高的氮盈余和土壤硝态氮含量，表明减氮措施对该轮作模式的环境效益提升尤为关键[36]。随施氮量的增加，各土层硝态氮含量均呈上升趋势，且向深层迁移的特征愈发明显[37-38]。在华北平原，全年降雨主要集中在秋作物生长季，高湿的土壤环境条件极大地增加了硝态氮随水分向下运移的淋失风险[18]。因此，降低秋作物生育期内土壤硝态氮的积累量是降低氮淋失风险的关键环节。已有研究指出，通过引入对外部养分和水分需求更低的豆科作物并配合优化施氮，可有效降低土壤氮淋失风险，提高氮肥利用效率[39]。本研究结果证实，与传统玉米-小麦轮作相比，大豆-小麦和花生-小麦轮作模式可显著降低秋作物季0—100 cm土层土壤的硝态氮含量，其中大豆-小麦轮作在不同施氮水平下均表现稳定，而花生-小麦轮作则需在减氮条件下方能发挥显著的降氮效果（图4）。同时，减氮处理下大豆-小麦和花生-小麦轮作模式的后茬小麦氮供应得到改善，氮素利用效率显著提高（表1）。

4　结　论

减氮处理下各轮作模式的秋作物（玉米、大豆和花生）产量与常规施氮均无显著差异，但可显著提高氮肥利用率（分别提高28.7%、45.6%和13.4%），并显著降低土壤氮盈余。减氮处理的大豆-小麦和花生-小麦轮作的周年经济效益分别为35 083.1和35 746.6元/hm^2，均显著高于玉米-小麦轮作（33 529.2元/hm^2），且大豆和花生后茬小麦的产量和氮积累量均显著高于玉米茬口。大豆-小麦轮作在不同施氮水平下均能显著降低土壤硝态氮积累，而花生-小麦轮作需配合减氮措施方可显著降低淋失风险。综上，在华北平原潮土区，推荐采用

豆科作物-小麦轮作并配合减氮措施,可实现高产高效与绿色可持续发展。

参考文献 References

[1] Zhao H X, Qin J H, Gao T P, Zhang M K, Sun H C, Zhu S W, Xu C L, Ning T Y. Immediate and long-term effects of tillage practices with crop residue on soil water and organic carbon storage changes under a wheat-maize cropping system[J/OL]. *Soil & Tillage Research*, (2021-12-27). DOI: 10.1016/j.still.2021.105309

[2] 王怀苹, 杨明达, 张素瑜, 李帅, 关小康, 王同朝. 不同节水灌溉方式对夏玉米生长、产量及水分利用的影响[J]. 作物杂志, 2024(2): 206-212
Wang H P, Yang M D, Zhang S Y, Li S, Guan X K, Wang T C. Effects of different water-saving irrigation modes on growth, yield and water utilization of summer maize[J]. *Crops*, 2024(2): 206-212 (in Chinese)

[3] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿. 小麦模型算法集成平台在华北平原区的适应性评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 128-136
Chen X G, Feng L P, Bai H Q. Adaptability of wheat model algorithms integration platform in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7): 128-136 (in Chinese)

[4] Lu J S, Geng C M, Cui X L, Li M Y, Chen S H, Hu T T. Response of drip fertigated wheat-maize rotation system on grain yield, water productivity and economic benefits using different water and nitrogen amounts[J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2021-12-01). DOI: doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107220

[5] Zhuang H, Wang J. Research progress of phosphorus fertilizer utilization efficiency in soil[J/OL]. *Frontiers in Sustainable Development*, (2023-10-23). DOI: doi.org/10.54691/fsd.v3i10.5675

[6] 金书秦,张惠,唐佳丽. 化肥使用量零增长实施进展及"十四五"减量目标和路径[J]. 南京工业大学学报:社会科学版,2020,19(3):66-74
Jin S Q, Zhang H, Tang J L. On progress in implementing zero growth of chemical fertilizer use and the target & path of fertilizer reducing in the "14th Five-Year Plan"[J]. *Journal of Nanjing Tech University: Social Science Edition*, 2020, 19(3): 66-74 (in Chinese)

[7] 曲文凯, 徐学欣, 郝天佳, 刘帅, 赵金科, 孟繁港, 赵长星. 施氮量对滴灌冬小麦-夏玉米周年产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1271-1282
Qu W K, Xu X X, Hao T J, Liu S, Zhao J K, Meng F G, Zhao C X. Effects of nitrogen application rate on annual yield and N-use efficiency of winter wheat-summer maize rotation under drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1271-1282 (in Chinese)

[8] 张田野. 化肥零增长行动实施效果及问题研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2020
Zhang T Y. Research on implementation effects and issues of the zero growth action of fertilizer use[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)

[9] 徐明杰. 不同轮作体系作物-土壤-肥料氮素特征研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014
Xu M J. Study on nitrogen characteristics of crop-soil-fertilizer in different rotation systems[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014 (in Chinese)

[10] 李玉东, 谭德水, 李子双, 李洪杰, 张灵菲, 马垒, 刘兆辉. 长期施用控释氮肥对潮土区麦-玉轮作作物产量的影响及土壤氮素供应特征研究[J]. 山东农业科学, 2024, 56(1): 119-125
Li Y D, Tan D S, Li Z S, Li H J, Zhang L F, Ma L, Liu Z H. Effects of long-term application of controlled release nitrogen fertilizer on crop yield and soil nitrogen supply characteristics of wheat-maize rotation system in fluvo-aquic soil area[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(1): 119-125 (in Chinese)

[11] 李文瑄, 戴孚岳, 王洪媛, 李俊改, 王震, 翟丽梅, 樊秉乾, 刘宏斌. 麦玉轮作体系下秸秆还田和有机替代对作物产量及农田氮损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(3): 442-457
Li W X, Dai F Y, Wang H Y, Li J G, Wang Z, Zhai L M, Fan B Q, Liu H B. Effects of straw returning and organic substitution on crop yield and field nitrogen loss under wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(3): 442-457 (in Chinese)

[12] 赵亚南, 徐霞, 黄玉芳, 孙笑梅, 叶优良. 河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2747-2757
Zhao Y N, Xu X, Huang Y F, Sun X M, Ye Y L. Nitrogen requirement and saving potential for wheat and maize in Henan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2747-2757 (in Chinese)

[13] 李凌云, 和爱玲, 杨焕焕, 刘高远, 郭中义, 杜君. 氮肥减施对黄褐土区小麦-玉米轮作体系产量和氮素吸收利用的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(11): 21-32
Li L Y, He A L, Yang H H, Liu G Y, Guo Z Y, Du J. Effect of reduction of nitrogen fertilizer rate on yield and nitrogen utilization of wheat-maize rotation system in yellow-cinnamon soil area[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(11): 21-32 (in Chinese)

[14] 杜思垚,方娅婷,鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. 华中农业大学学报,2023,42(2):147-157
Du S Y, Fang Y T, Lu J W. Progress on effects of root exudates on nutrient uptake and utilization of crops[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(2): 147-157 (in Chinese)

[15] 邵云, 李昊烨, 翁正鹏, 王璐, 李斯斯, 刘晴. 不同茬口对小麦养分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 356-363
Shao Y, Li H Y, Weng Z P, Wang L, Li S S, Liu Q. Effects of different previous crops on nutrient utilization and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(3): 356-363 (in Chinese)

[16] 徐英. 大豆病虫草害发生规律及综合防治技术[J]. 农业工程技术, 2018, 38(5): 25-26
Xu Y. Occurrence regularity and integrated control technology of diseases, insect pests and weeds in soybean[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(5): 25-26 (in Chinese)

[17] 马小艳, 杨瑜, 黄冬琳, 王朝辉, 高亚军, 李永刚, 吕辉. 小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(8): 1589-1603
Ma X Y, Yang Y, Huang D L, Wang Z H, Gao Y J, Li Y G, Lv, H. Annual nutrients balance and economic return analysis of wheat with fertilizers reduction and different rotations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(8): 1589-1603 (in Chinese)

[18] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 徐久飞, 石立委, 李俊良. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2227-

2232

Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, Xu J F, Shi L W, Li J L. Appropriate soil nitrate N content for a winter wheat/summer maize rotation system in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2227-2232 (in Chinese)

[19] 刘梦. 减施氮肥对穗/粒收夏玉米-冬/春小麦周年产量、氮素及光温水资源利用的影响[D]. 天津：天津农学院, 2023

Liu M. Effects of nitrogen reduction on annual yield, utilization of nitrogen, radiation, thermal and water resources among ear / grain harvest summer maize-winter / spring wheat[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2023 (in Chinese)

[20] 郭金梁, 周月凤. 不同作物的茬口特性与轮作[J]. 现代化农业, 2013(2): 27-28

Guo J L, Zhou Y F. Stubble characteristics and rotation of different crops [J]. *Modernizing Agriculture*, 2013(2): 27-28 (in Chinese)

[21] 史校艳, 王志强, 谷庆昊, 常明娟, 胡俊杰, 任永哲, 辛泽毓, 林同保. 施氮量对不同茬口冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2041-2048

Shi X Y, Wang Z Q, Gu Q H, Chang M J, Hu J J, Ren Y Z, Xin Z Y, Lin T B. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat with different former crops[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2041-2048 (in Chinese)

[22] 蔡晓, 王东, 吴祥运, 吴雨晴, 林祥, 张俊鹏. 氮肥减施对夏玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30 (1): 158-165

Cai X, Wang D, Wu X Y, Wu Y Q, Lin X, Zhang J P. Effects of nitrogen reduction on growth and water-nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 158-165 (in Chinese)

[23] 雍太文, 陈平, 刘小明, 周丽, 宋春, 王小春, 杨峰, 刘卫国, 杨文钰. 减量施氮对玉米-大豆套作系统土壤氨素氨化、硝化及固氮作用的影响[J]. 作物学报, 2018, 44 (10): 1485-1495

Yong T W, Chen P, Liu X M, Zhou L, Song C, Wang X C, Yang F, Liu W G, Yang W Y. Effects of reduced nitrogen on soil ammonification, nitrification, and nitrogen fixation in maize-soybean relay intercropping systems[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(10): 1485-1495 (in Chinese)

[24] 袁光, 张冠初, 丁红, 徐扬, 李泽伦, 梁新波, 慈敦伟, 秦斐斐, 石书兵, 张智猛. 减施氮肥对旱地花生农艺性状及产量的影响[J]. 花生学报, 2019, 48 (3): 30-35

Yuan G, Zhang G C, Ding H, Xu Y, Li Z L, Liang X B, Ci D W, Qin F F, Shi S B, Zhang Z M. Effect of reducing nitrogen fertilizer application on agronomic traits and yield of peanut in dry land [J]. *Journal of Peanut Science*, 2019, 48(3): 30-35 (in Chinese)

[25] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002,22(7): 1122-1128

Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N Application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1122-1128 (in Chinese)

[26] 李琳凤, 李孟刚. 提高复种指数是保障我国粮食安全的有效途径[J]. 管理现代化, 2012,32(3): 26-28

Li L F, Li M G. Improving multiple cropping index is an effective way to ensure China's food security[J]. *Modernization of Management*, 2012, 32(3): 26-28 (in Chinese)

[27] 朱孝林, 李强, 沈妙根, 陈晋, 吴锦. 基于多时相NDVI数据的复种指数提取方法研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 534-544

Zhu X L, Li Q, Shen M G, Chen J, Wu J. A methodology for multiple cropping index extraction based on NDVI time-series[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 534-544 (in Chinese)

[28] Maitra S, Hossain A, Brestic M, Skalicky M, Ondrisik P, Gitari H, Brahmachari K, Shankar T, Bhadra P, Palai J B, Jena J, Bhattacharya U, Duvvada S K, Lalichetti S, Sairam M. Intercropping:A low input agricultural strategy for food and environmental security[J/OL]. *Agronomy-Basel*, (2021-02-14). DOI: doi. org/10. 3390/agronomy11020343

[29] 赵邦庆. 轮作模式对胡麻生长发育及土壤-作物氮平衡的影响[D]. 兰州：甘肃农业大学, 2022

Zhao B Q. Effects of different crop rotation on the growth and development of oilseed flax and soil-crop nitrogen balance [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022 (in Chinese)

[30] 张经廷, 王志敏, 周顺利. 夏玉米不同施氮水平土壤硝态氮累积及对后茬冬小麦的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6):1182-1190

Zhang J T, Wang Z M, Zhou S L. Soil nitrate N accumulation under different N-fertilizer rates in summer maize and its residual effects on subsequent winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1182-1190 (in Chinese)

[31] 杨宁. 豆科绿肥-冬小麦轮作提高小麦产量和营养元素含量的效应与土壤机制[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2012

Yang N. The effect and soil mechanism of improving wheat yield and nutrients content with legume-winter wheat rotations [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese)

[32] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, Shi Y F, Zhu Q, Sun Y B, Zhou H Y, Li C L, Yang Y C, Geng J B. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205:106-115

[33] 郑浩宇. 减施氮肥条件下接种根瘤菌对大豆生长和产量的影响[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学, 2018

Zheng H Y. Effects of rhizobium inoculation on growth and yield of soybean under reduced nitrogen application condition[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018 (in Chinese)

[34] 赵耀东, 侯江涛. 减氮配施生物炭对花生—油菜轮作系统土壤肥力和花生产量与氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(23): 81-87

Zhao Y D, Hou J T. Impacts of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on soil fertility, peanut yield, and nitrogen utilization in peanut-rape rotation system[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(23): 81-87 (in Chinese)

[35] 宋世浩, 李滨键, 王景旭. 氮肥减施对夏玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 南方农机, 2023, 54(17): 45-48

Song S H, Li B J, Wang J X. The effect of reducing nitrogen fertilizer application on the yield and water and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. *South Agricultural Machinery*, 2023, 54(17): 45-48 (in Chinese)

[36] 程娟, 付莉, 翟中葳, 肖能武, 杨柳, 刘福元, 杜会英, 杜连柱, 张克强. 化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2551-2558

Cheng J, Fu L, Zhai Z W, Xiao N W, Yang L, Liu F Y, Du H Y, Du L Z, Zhang K Q. Effects of fertilizer reduction on Chinese cabbage yield and soil

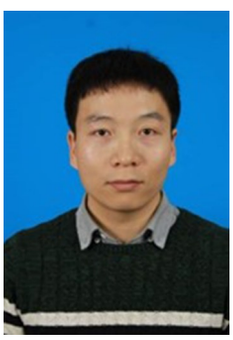
nitrogen surplus[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2551-2558 (in Chinese)

[37] 孙世友, 刘孟朝, 张国印, 茹淑华, 韩宝文, 王凌, 贾良良. 不同氮肥措施对小麦-玉米轮作农田无机氮分布和累积的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(S1): 94-98
Sun S Y, Liu M C, Zhang G Y, Ru S H, Han B W, Wang L, Jia L L. Effects of different fertilizations on soil nitrate-N distribution and accumulation under winter wheat summer maize cropping system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S1): 94-98 (in Chinese)

[38] Li W G, Ma L, Shi F, Wang S T, Zhao J R, Zheng W, Li Z J, Li Z Y, Zhai B N. Regulation of soil water and nitrate by optimizing nitrogen fertilization and the addition of manure based on precipitation: An 8-year field record[J/OL]. *Agriculture, Ecosystems& Environment*, (2023-09-15). DOI: doi.org/10.1016/j.agee.2023.108586

[39] 刘蕾, 王凌, 肖广敏, 茹淑华, 孙世友, 郜静, 李玭, 赵欧亚, 张国印. 引入豆角的轮作模式对设施土壤硝态氮淋失的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 129-136
Liu L, Wang L, Xiao G M, Ru S H, Sun S Y, Gao J, Li P, Zhao O Y, Zhang G Y. Effects of crop rotation with bean on the nitrate leaching in greenhouse soils[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 129-136 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 韦一昊,博士,河南农业大学农学院讲师,硕士生导师。主要从事作物氮素高效利用和农作物秸秆综合利用等方向研究。主持完成中国博士后科学基金面上项目、“十四五”国家重点研发项目子课题、河南省自然科学基金、河南省科技攻关等项目多项,在《作物学报》、《农业工程学报》、*International Journal of Molecular Sciences* 等期刊发表学术论文 10 余篇。



通讯作者简介: 熊淑萍,博士,河南农业大学农学院教授、博士生导师,智慧农业系系主任,河南省教学名师,中国农学会耕作制度分会常务理事/副秘书长、中国作物学会智慧农业分会副会长、河南省农学会智慧农业专业委员会秘书长。主要从事智慧农业专业教学工作与作物氮素高效利用和智慧农业方向研究。主持完成多项国家自然科学基金、河南省重点研发等项目,在 *Computers and Electronics in Agriculture*、*Field Crops Research*、*European Journal of Agronomy* 等期刊发表学术论文 30 余篇。