

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.022

陈梦茹,邢英英,解云霞,等.有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):

CHEN Mengru, XING Yingying, XIE Yunxia, et al. Effects of organic manure and other nitrogen substitutes on spring maize growth, yield, and water and fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响

陈梦茹,邢英英,解云霞,刘栩柠,邵雅婷,李珊珊,赵天盛,卢杰,王秀康

(延安大学生命科学学院,陕西 延安 716000)

摘要: [目的] 为探究不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对陕北旱区春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响。[方法] 采用多元回归分析和三维拟合模型,以期建立陕北地区春玉米种植最佳氮肥管理模式。设置 3 个施氮水平(N1、N2、N3 分别为 240, 180, 120 kg/hm²)和 5 个有机肥等氮替代比例(R0、R12.5、R25、R37.5、R50 分别为 100% 化肥氮、12.5% 有机肥氮+87.5% 化肥氮、25% 有机肥氮+75% 化肥氮、37.5% 有机肥氮+62.5% 化肥氮、50% 有机肥氮+50% 化肥氮),共 15 个处理。在春玉米主要生育期测定春玉米生长、产量及产量构成要素,计算生育期耗水量(ET)、水分利用效率(WUE)、氮肥偏生产力(NPFP)及经济效益。[结果] Logistic 函数对春玉米干物质累积量具有较高的拟合度,R 12.5 软件处理可推迟干物质快速累积期的起点、终点和最大值出现的时间,N2 处理可提升干物质累积量的日最大增长速率。施氮量和替代比例对春玉米干物质累积量、产量及构成要素、ET、NPFP 和经济效益有显著影响($p < 0.05$),两者交互作用对穗长、穗粗、ET 的影响显著($p < 0.05$)。N2 处理的平均干物质累积量、产量、ET、净收入分别比 N1 和 N3 处理高 5.58% 和 15.80%, 4.25% 和 16.76%, 4.96% 和 3.41%, 8.76% 和 29.42%。有机替代比例为 12.5%~37.5% 的处理可显著提升干物质累积量、产量及构成要素、ET、WUE、NPFP、净收入、产投比。随着施氮量增加,WUE 上升,而 NPFP 降低。处理 N2R25 的干物质累积量、ET 最高,处理 N2R37.5 的产量、净收入、产投比最高。春玉米产量与干物质累积量、ET、WUE、净收入、产投比呈显著正相关。[结论] 综合分析得到,在施氮量和替代比例区间分别为 190~210 kg/hm² 和 17%~29% 时,可使春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP、净收入同时优化。

关键词: 春玉米; 产量; 有机肥; 水分利用效率; 多元回归分析

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

Effects of Organic Manure and Other Nitrogen Substitutes on Spring Maize Growth, Yield, and Water and Fertilizer Utilization Efficiency

CHEN Mengru, XING Yingying, XIE Yunxia, LIU Xuning, SHAO Yating,

LI Shanshan, ZHAO Tiansheng, LU Jie, WANG Xiukang

(College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to investigate the effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen under different nitrogen application rates on the growth, yield and water-fertilizer use efficiency of spring maize in the dry zone of northern Shaanxi. [Methods] Multiple regression analysis and three-dimensional fitting models were used to establishing an optimal nitrogen management model for spring maize cultivation in northern Shaanxi. In this experiment, three nitrogen application levels (240, 180, 120 kg/hm² for N1, N2, N3, respectively) and five organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen ratios (R0, R12.5, R25, R37.5, R50 for 100% chemical fertilizer nitrogen, 12.5% organic fertilizer nitrogen + 87.5% chemical fertilizer nitrogen, 25% organic fertilizer nitrogen + 75% chemical fertilizer nitrogen, 37.5% organic fertilizer nitrogen + 62.5% chemical fertilizer nitrogen, 50%

收稿日期:2023-11-09

修回日期:2023-12-06

录用日期:2024-01-10

资助项目:国家自然科学基金项目(52169014, 42107379);延安大学研究生教育创新计划项目(YCX2023077);延安大学大学生创新计划项目(S202310719019)

第一作者:陈梦茹(1999—),女,河南安阳人,硕士研究生,主要从事旱区水肥高效利用研究。E-mail:zgmgmcr123@163.com

通信作者:王秀康(1983—),男,陕西安康人,博士,教授,主要从事旱区水肥高效利用研究。E-mail:wangxiukang@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

organic fertilizer nitrogen + 50% chemical fertilizer nitrogen, respectively), a total of 15 treatments. During the main reproductive period of spring maize, spring maize growth and yield and yield components were measured, and water consumption (ET), water use efficiency (WUE), nitrogen fertilizer partial productivity ($NPFP$) and economic benefits were calculated. [Results] the Logistic function had a high fit for dry matter accumulation in spring maize, the R12.5 treatment delayed the start, the end and the appearance of the maximum value of the period of rapid dry matter accumulation, and the N2 treatment enhanced the maximum daily growth rate of dry matter accumulation. Nitrogen application and replacement ratio significantly affected dry matter accumulation, yield and components, ET , $NPFP$ and economic efficiency of spring maize ($p < 0.05$), and the interaction significantly affected ear length, ear coarse, and ET ($p < 0.05$). The average dry matter accumulation, yield, ET , and net income of N2 treatment were higher than those of the N1 and N3 treatment 5.58% and 15.80%, 4.25% and 16.76%, 4.96% and 3.41%, 8.76% and 29.42%, respectively. R12.5% ~ R37.5% treatment significantly enhanced dry matter accumulation, yield and components, ET , WUE , $NPFP$, net income and input/output. WUE continued to increase with increasing N application, while $NPFP$ continued to decrease. Treatment N2R25 had the highest dry matter accumulation and ET , and treatment N2R37.5 had the highest yield, net income, and input/output. Spring maize yield was significantly and positively correlated with dry matter accumulation, ET , WUE , net income and input/output. [Conclusion] The comprehensive analysis obtained showed that dry matter accumulation, yield, WUE , $NPFP$, and net income of spring maize could be optimized simultaneously at the N application and replacement ratio intervals of 190~210 kg/hm² and 17%~29%, respectively.

Keywords: spring maize; yield; organic fertilizer; water use efficiency; multiple regression analysis

Received: 2023-11-09

Revised: 2023-12-06

Accepted: 2024-01-10

玉米(*Zea Mays* L.)作为四大主粮作物之一,是我国重要的经济作物,不仅可用于粮食生产,而且在饲料使用方面也占据极大比例^[1]。陕北地区是我国重要的玉米生产区,玉米生产在保障当地粮食安全和缓解能源危机等方面发挥重要作用^[2]。在玉米生长过程中,氮素是所需最多的营养元素和主要的养分限制因子,也是决定玉米产量高低的关键。由于陕北地区土壤中氮素含量比较低,只依靠土壤中氮素供给不能满足作物生长过程中氮素需要,因此,必须通过增施氮肥来满足玉米整个生育期氮素需求,从而提升玉米产量^[3]。然而,在该地区春玉米种植过程中普遍存在不合理的氮肥管理、过量施氮肥等现象,严重限制玉米产量,降低资源利用效率,恶化区域环境,与“绿色农业”、“可持续发展”等观点背道而驰^[4],因此,探索一种合理的氮肥管理方式迫在眉睫。

有机肥等氮替代化肥技术是一种新型的氮肥施用技术,该技术广泛应用于作物生产实践中,相比于传统的单施化肥,该技术不仅提升作物的产量和氮素利用效率,而且节约资源,减少追肥及劳动力的投入成本。徐路路等^[5]通过多年定位大田试验发现,与单施化肥相比,有机肥部分替代化肥不仅不降低田间土壤养分和酶活性,且可在一定程度减小玉米的秃尖

长,增加籽粒的百粒重和产量,优化玉米穗部多个性状;LI等^[6]研究表明,无机化肥配施有机肥料可显著提升旱区小麦产量,其相比于全施化肥增产 8.7%,同时优化土壤质量;陈倩等^[7]通过研究多种比例有机肥替代化肥对玉米生长及水分利用效率发现,相比于全施化肥,有机肥 37.5%和 12.5%替代处理的籽粒产量和生物产量分别增加 100.6%,122.0%和 132.7%,156.8%,水分利用效率分别提升 73.1%,165.1%,另外,有机肥替代处理的氮肥利用效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率等也得到了不同程度的改善。

然而,以上研究^[5-7]主要集中在施氮量或有机肥等氮替代比例单个因素对玉米生长和产量的影响,两者交互作用对春玉米生长、产量、水肥利用效率、经济效益的影响研究较少。另外,基于春玉米生长、产量、水肥利用效率、经济效益的多目标优化研究也较为缺乏,特别是在陕北旱作雨养区春玉米种植实践中。因此,结合当地农户生产实际情况,探讨施氮量水平、有机肥等氮替代化肥比例及其两者交互作用对陕北地区春玉米生长、产量、生育期耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力、经济效益的影响;同时,以施氮量和有机肥等氮替代化肥比例为自变量,以春玉米干物质累积量、产量、水分利用效率、氮肥偏生产力、经济效益

为因变量进行回归分析,以 5 重目标为出发点,采用三维空间拟合的方法,以期实现同一氮肥管理方案下多目标优化的效果。研究结果可为陕北旱作雨养区春玉米种植最佳氮肥管理技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 4—10 月在陕西省延安市安塞区高桥镇延安大学试验基地(109°11′ E,36°38′ N)进行,属于干旱半干旱大陆性季风气候,海拔高度为 1 109 m。年均气温和多年平均降水量分别为 8.7 ℃和 511 mm,降水量主要集中在 6—9 月,年蒸发量约为 1 800 mm。试验地土壤为黄绵土。采集耕层 0—60 cm,土壤容重为 1.39 g/cm³;pH 为 8.61;硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾含量分别为 9.83,2.80,45.7,113.7 mg/kg;有机质含量为 11.10 g/kg。该试验区在春玉米生长季节有效降雨量为 322.1 mm,具体降雨分布和气温概况见图 1。

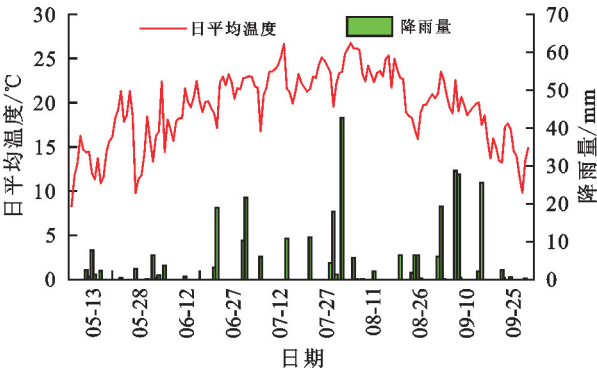


图 1 春玉米生育期降雨量和日平均温度

Fig. 1 Rainfall and daily mean temperature during spring maize growth stage

1.2 试验设计

试验设置施氮量(N)和有机肥等氮替代比例(R) 2 个因素。依据前期试验研究和当地农业生产实际情况调查结果,设置 3 个施氮量水平: N1 (240 kg/hm²)、N2(180 kg/hm²)和 N3(120 kg/hm²);设置 5 个有机肥等氮替代比例: R0(100%化肥氮)、R12.5(12.5%有机肥氮+87.5%化肥氮)、R25(25%有机肥氮+75%化肥氮)、R37.5(37.5%有机肥氮+62.5%化肥氮)和 R50(50%有机肥氮+50%化肥氮),共 15 个处理(表 1)。各小区随机区组排列且重复 3 次,每个小区长 7.5 m,宽 4 m,小区面积为 30 m²。为避免外界环境对试验的干扰,试验区周围布设 2 m 保护带。试验供试玉米品种为“郑单 958”,种植时行距为 60 cm、株距为 30 cm,播种密度为 55 000 株/hm²。春玉米于 4 月 28 日播种,10 月 3 日收获。整个生育期田间管理方式(杂草、病虫害防治等)与当

地田间管理方式相同。玉米收获后,将土地深耕。供试化肥为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和硫酸钾(含 K₂O 52%),供试有机肥由内蒙古青牧农业科技有限公司所生产的科学有机发酵纯羊粪,有机质、水、N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 53.1%,1.92%,3.89%,1.66%,2.34%。其中,氮肥以总氮量 40%作为基施,60%作为追施,于拔节期施入。磷肥、钾肥和有机肥料均作为基施,播种前 1 次性施入。各处理的施磷量和施钾量均为 100 kg/hm²。

表 1 试验处理
Table 1 Experimental treatment

处理	化肥施 N 量/ (kg · hm ⁻²)	有机肥施用量/ (kg · hm ⁻²)
N1R0	240.0	0
N1R12.5	210.0	771.2
N1R25	180.0	1 542.4
N1R37.5	150.0	2 313.6
N1R50	120.0	3 084.8
N2R0	180.0	0
N2R12.5	157.5	578.4
N2R25	135.0	1 156.8
N2R37.5	112.5	1 735.2
N2R50	90.0	2 313.6
N3R0	120.0	0
N3R12.5	105.0	385.6
N3R25	90.0	771.2
N3R37.5	75.0	1 156.8
N3R50	60.0	1 542.4

1.3 测定指标与方法

1.3.1 春玉米干物质累积量测定 分别在春玉米播种后 25,53,80,129,157 天采取植株样品,在每个小区随机选取长势良好的 5 株玉米植株,整株挖取后带回实验室,去除表面污垢,按照根、茎、叶、籽粒、苞叶和穗轴进行分离、装袋。将分装好的植株各器官组织样品分别置于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,并在 75 ℃下干燥至恒重。利用天平称取各样品干物质累积量,随后结合种植密度将其转化为群体干物质累积量。

采用 Logistic 函数对春玉米整个生育期干物质累积量动态变化进行非线性回归拟合,其表达式为^[8]:

$$Z = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \tag{1}$$

式中:Z、k、a、b、t 分别为干物质累积量(kg/hm²)、干物质累积量潜在最大值(kg/hm²)、与干物质相关的阻滞系数、干物质的增长率和生长时间(天)。

1.3.2 春玉米产量和构成要素测定 在春玉米收获时期,选取各小区春玉米种植中段区域,平行挖取 3

m 距离,测定面积为 9 m²,每个处理重复 3 次,风干后测定春玉米穗粒数、行粒数、穗长、穗粗和秃尖长,脱粒测定百粒重和总质量,最终折算为含水量 14% 的群体籽粒产量。

1.3.3 春玉米生育期耗水量和水分利用效率计算
春玉米生育期耗水量(ET , mm)的计算公式为^[9]:

$$ET = P + U + I - D - R - \Delta S \quad (2)$$

式中: P 为春玉米生育期有效降雨量(mm); U 为地下水补给量(mm); I 为灌溉用水量(mm); D 为深层水渗漏量(mm); R 为地面径流量(mm); ΔS 为相比种植前,0—60 cm 土层收获时土壤储水量的变化量(mm)。由于该试验区灌溉条件,同时该地区地下水埋藏较深,故 D 、 R 、 U 可忽略不计。

采用烘干称重法^[10]测定各土层土壤水分,分别在春玉米苗期(5月24日)、拔节期(6月21日)、吐丝期(7月18日)、灌浆期(9月5日)和成熟期(10月3日),在各小区随机选取 3 个样点,沿土壤垂直剖面取样,每 10 cm 为 1 层,深度为 60 cm,取其平均值作为该小区的土壤含水率(%)。

春玉米水分利用效率(WUE , kg/m³)的计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (3)$$

式中: Y 为春玉米产量(kg/hm²); ET 为春玉米生育期耗水量(mm)。

1.3.4 春玉米氮肥偏生产力计算 春玉米氮肥偏生产力($NPFP$, kg/kg)的计算公式为^[11]:

$$NPFP = \frac{Y}{F_N} \quad (4)$$

式中: Y 为春玉米产量(kg/hm²); F_N 为春玉米生育期施用的氮肥总量(kg/hm²)。

1.3.5 春玉米经济效益计算 总收益(G , 元/hm²)、净收入(N , 元/hm²)和产投比(II)的计算公式为:

$$G = Y \times 1.5 \quad (5)$$

$$N = G - F_i - O_i \quad (6)$$

$$II = \frac{G}{F_i + O_i} \quad (7)$$

式中: Y 、 F_i 、 O_i 和 1.5 分别为春玉米产量(kg/hm²)、肥料投入(元/hm²)、其他投入(元/hm²)和玉米籽粒价格(元/kg)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行收集和初步整理,采用 SPSS 23.0 软件进行方差分析,Duncan 新复极差法分析显著性。采用 Mathematica 9.0 软件对春玉米干物质累积量、产量、 WUE 、 $NPFP$ 和经济效益与施氮量和有机肥等氮替

代比例的关系进行回归分析并进行寻优。采用 R-studio 和 Origin 9.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米干物质累积量的影响及 Logistic 函数拟合

由图 2、表 2 可知,干物质累积量与生长时间的 Logistic 函数拟合方程和特征值,各处理拟合方程的 R^2 均 > 0.987 ,说明 Logistic 函数对单个处理干物质累积量随时间的动态变化过程具有较高的拟合度。有机肥等氮替代化肥可推迟春玉米干物质累积量快速增长期的起始时间(t_1)和终止时间(t_2),以及日最大增长量出现的时间(t_m),相比于 R_0 处理, $R_{12.5}$ 处理的平均 t_1 、 t_2 、 t_m 的时间分别推迟 1.2、1.6、1.4 天左右。随着施氮量增加,日最大增长量(V_M)和平均增长速率(G_T)呈先增加后降低趋势, N_2 处理的平均 V_M 分别比 N_1 和 N_3 处理高 6.39%、11.08%。适当的增加有机肥替代比例可提升 V_M 和 G_T , R_{25} 处理的平均 G_T 最高,分别比 R_0 、 $R_{12.5}$ 、 $R_{37.5}$ 、 R_{50} 处理高 15.31%、4.84%、12.90%、14.05%。适量的施肥也可提前 t_1 、 t_2 、 t_m 的时间,相比于 N_1 和 N_3 处理, N_2 处理的平均 t_1 、 t_2 、 t_m 时间分别提前 0.6、1、0.9 天和 0.5、1、0.8 天左右。

各处理的干物质累积速率均随生长时间呈“慢—快—慢”趋势,于播种后 80 天左右干物质累积量的日生长速率最大,其中,处理 N_2R_{25} 的达 1.13×10^4 kg/hm²(图 3)。处理 N_2R_{25} 的干物质累积量最高(3.39×10^4 kg/hm²),相比于其余处理高出 2.54%~30.94%。施肥可改善春玉米干物质累积量,随着施氮量增加,春玉米干物质累积量呈先上升后下降趋势, N_2 处理的平均干物质累积量分别比 N_3 和 N_1 高 15.80%、5.58%。不同的有机肥等氮替代化肥比例对干物质累积量的影响有所差异,过高或过低的有机肥等氮替代比例均对春玉米干物质累积量产生不利影响, R_{25} 处理的平均干物质累积量最高,分别比 R_0 、 $R_{12.5}$ 、 $R_{37.5}$ 、 R_{50} 高 11.59%、1.62%、7.48%、11.42%。

2.2 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米产量及其构成要素的影响

施氮量和替代比例对春玉米产量及其构成要素各指标有显著影响($p < 0.05$),施氮量和替代比例两者交互对春玉米穗长和穗粗的影响分别达到极显著($p < 0.01$)和显著水平($p < 0.05$)(表 3)。各处理间春玉米产量及其构成要素存在显著差异($p < 0.05$)。处理 $N_2R_{37.5}$ 的产量最高(1.59×10^4 kg/hm²),比处理 N_3R_0 高 33.80%。施氮量并非与春玉米产量始终

呈正相关关系,随着施氮量增加,产量呈先增加后降低趋势,N2 处理的平均产量分别比 N1 和 N3 处理高 4.25%,16.76%。适量的有机肥替代化肥比例可促进作物产量的形成,R25 处理下的平均产量分别比 R0、R12.5、R37.5、R50 处理高 10.75%,1.47%,7.28%,15.80%。

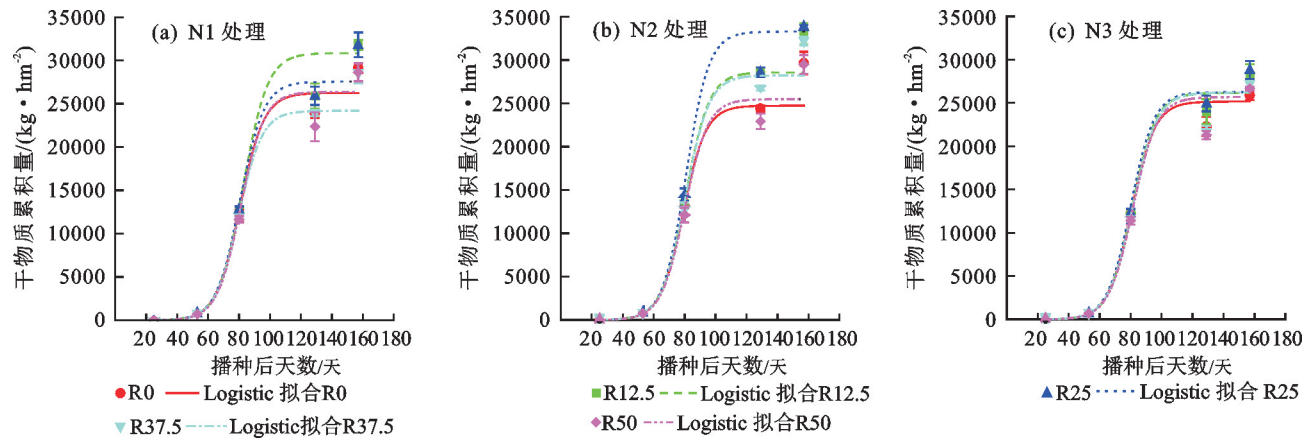


图 2 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米干物质累积量的影响

Fig. 2 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring maize dry matter accumulation under different nitrogen application rates

表 2 干物质累积量与生长时间的 Logistic 函数拟合

Table 2 Logistic function fitting of dry matter accumulation and growth time

处理	t_1 /d	t_2 /(d)	t_m /(d)	V_M / (kg·hm ⁻²)	G_T / (kg·d ⁻¹)	回归方程	R^2	p
N1R0	70.44	90.81	80.63	848.31	743.79	$y = 26\ 243.15 / (1 + 33\ 702.01e^{-0.129\ 3t})$	0.991	0.014
N1R12.5	72.20	93.07	82.64	973.50	853.56	$y = 30\ 855.72 / (1 + 33\ 822.03e^{-0.126\ 2t})$	0.990	0.007
N1R25	70.51	90.76	80.63	896.40	785.96	$y = 27\ 560.42 / (1 + 35\ 973.37e^{-0.130\ 1t})$	0.993	0.009
N1R37.5	69.81	89.76	79.78	798.44	700.07	$y = 24\ 195.09 / (1 + 37\ 468.63e^{-0.132\ 0t})$	0.997	0.003
N1R50	71.15	91.21	81.18	865.95	759.26	$y = 26\ 380.82 / (1 + 42\ 550.89e^{-0.131\ 3t})$	0.992	0.008
N2R0	69.15	88.69	78.92	833.67	730.96	$y = 24\ 737.94 / (1 + 41\ 693.66e^{-0.134\ 8t})$	0.998	0.002
N2R12.5	70.47	90.69	80.58	931.27	816.53	$y = 28\ 588.52 / (1 + 36\ 304.08e^{-0.130\ 3t})$	0.999	<0.001
N2R25	71.10	90.57	80.83	1\ 126.11	987.37	$y = 33\ 292.26 / (1 + 56\ 199.31e^{-0.135\ 3t})$	0.997	0.004
N2R37.5	70.53	90.56	80.54	928.33	813.95	$y = 28\ 238.10 / (1 + 39\ 792.10e^{-0.131\ 5t})$	0.993	0.011
N2R50	70.01	89.91	79.96	843.25	739.35	$y = 25\ 494.95 / (1 + 39\ 290.97e^{-0.132\ 3t})$	0.987	0.019
N3R0	70.41	90.52	80.47	823.65	722.17	$y = 25\ 149.61 / (1 + 37\ 842.29e^{-0.131\ 0t})$	0.999	<0.001
N3R12.5	70.93	91.15	81.04	850.98	746.13	$y = 26\ 143.79 / (1 + 38\ 231.03e^{-0.130\ 2t})$	0.999	<0.001
N3R25	70.15	90.09	80.12	866.62	759.85	$y = 26\ 241.31 / (1 + 39\ 504.63e^{-0.132\ 1t})$	0.997	0.004
N3R37.5	71.08	91.80	81.44	832.23	729.69	$y = 26\ 191.30 / (1 + 31\ 278.80e^{-0.127\ 1t})$	0.997	0.005
N3R50	71.27	91.79	81.53	824.08	722.54	$y = 25\ 672.14 / (1 + 35\ 183.76e^{-0.128\ 4t})$	0.994	0.009

注: t_1 和 t_2 分别为春玉米干物质累积量快速增长期的起始时间和终止时间; t_m 为日最大增长量出现的时间; V_M 为日最大增长量; G_T 为 t_1 到 t_2 的春玉米干物质累积量平均增长率。

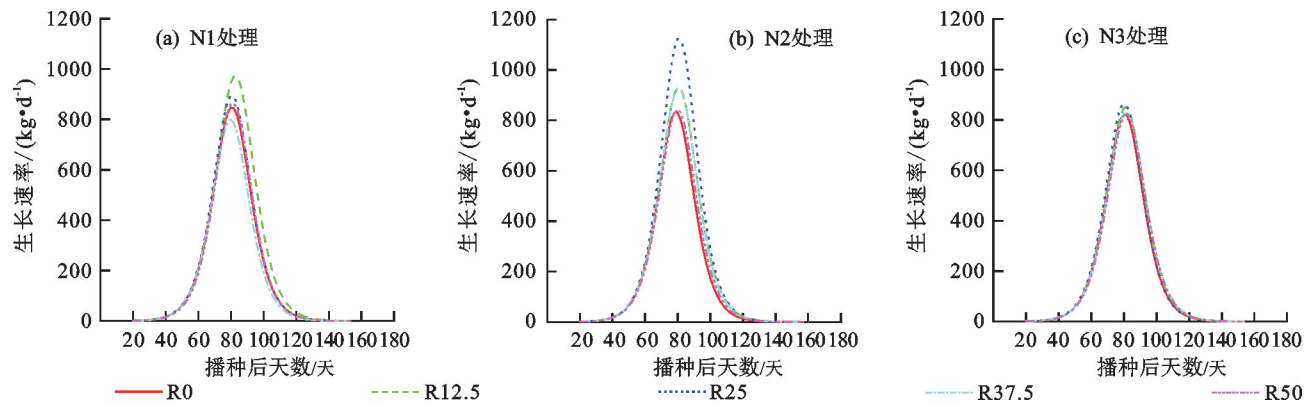


图 3 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米干物质累积量增长速率的影响

Fig. 3 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring maize dry matter accumulation growth rate under different nitrogen application rates

处理 N2R25 的穗粒数、穗长、穗粗最高(672.00 粒、25.50 cm、58.32 mm), 分别比其余处理高 0.30%~23.83%、5.81%~35.64% 和 0.75%~16.07%。

随着施氮量增加, 春玉米百粒重、穗粒数、行粒

数、穗长和穗粗呈先增加后降低趋势, 适量的施肥将显著降低春玉米的秃尖长。适量的有机肥等氮替代化肥比例将显著改善春玉米各构成要素, R25 处理的平均百粒重、穗粒数、行粒数、穗长、穗粗分别比 R0 高 8.14%、11.13%、6.82%、10.53%、4.63%。

表 3 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米产量及其构成要素的影响

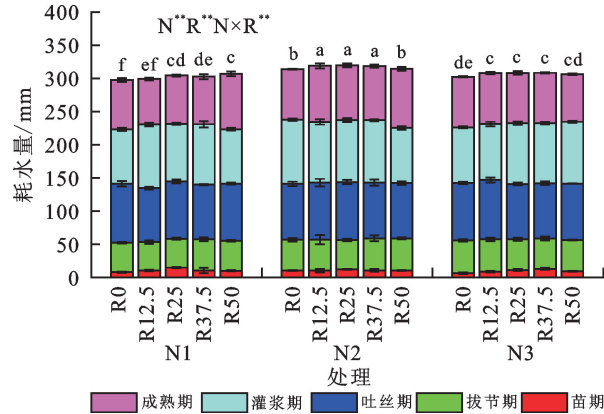
Table 3 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring maize yield and its components under different nitrogen application rates

处理	产量/ ($\times 10^4$ kg $\cdot$ hm $^{-2}$)	百粒重/g	穗粒数	行粒数	穗长/cm	穗粗/mm	秃尖长/mm
N1R0	1.47abc	41.26c	609.33abcd	40.33abcd	21.37cde	53.04cdef	13.39a
N1R12.5	1.51ab	46.06a	650.67ab	44.33abc	24.10ab	54.81bcd	10.68bcd
N1R25	1.58a	46.40a	670.03a	40.33abcd	22.33bcd	56.70ab	8.62de
N1R37.5	1.42abc	43.40abc	627.00abc	39.67bcd	20.40def	55.36bc	10.73bcd
N1R50	1.40abcd	43.06abc	592.67bcd	39.33bcd	20.60def	52.69defg	11.88abc
N2R0	1.48abc	44.68abc	624.67abc	40.33abcd	21.57cde	54.22cde	10.02bcde
N2R12.5	1.56a	47.27a	655.33ab	43.00abc	22.33bcd	57.88a	8.52de
N2R25	1.58a	47.01a	672.00a	44.67ab	25.50a	58.32a	7.59e
N2R37.5	1.59a	45.65ab	614.67abc	45.33a	23.27bc	54.92bcd	9.67cde
N2R50	1.48abc	44.39abc	590.33bcd	39.00cd	21.53cde	53.23cdef	10.52bcd
N3R0	1.19d	41.76bc	542.67d	36.67d	18.80f	51.28fg	12.50ab
N3R12.5	1.44abc	44.03abc	613.33abc	39.33bcd	20.07ef	52.25efg	9.87cde
N3R25	1.42abc	44.67abc	632.33abc	40.33abcd	20.40def	50.85fg	9.37cde
N3R37.5	1.26cd	41.76bc	584.67bcd	37.33d	19.67ef	51.13fg	10.39bcd
N3R50	1.28bcd	41.26c	576.67cd	36.00d	19.27f	50.25g	11.74abc
方差分析							
N	**	**	**	**	**	**	**
R	*	**	**	*	**	**	**
N $\times$ R	ns	ns	ns	ns	**	*	ns

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$); *, ** 和 ns 分别表示效应在 0.05, 0.01 水平显著和不显著。下同。

2.3 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米 ET 和 WUE 的影响

施氮量、替代比例以及两者交互作用对春玉米生育期耗水量有极显著影响 ($p < 0.01$, 图 4)。



注: 图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。*, ** 和 ns 分别表示效应在 0.05, 0.01 水平显著和不显著。下同。

图 4 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米耗水量的影响

Fig. 4 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring maize water consumption under different nitrogen application rates

从整体上来看, 春玉米各阶段耗水量表现为灌浆期>吐丝期>成熟期>拔节期>苗期。处理 N2R25 的耗水量最高(319.56 mm), 相比处理 N1R0 的高 7.50%, 但与处理 N2R12.5 和 N2R37.5 间无显著差异。适量的施氮量可改善作物生育期内耗水量, 随着施氮量增加, 作物耗水量呈先上升后下降趋势, N2 处理的平均耗水量分别比 N1 和 N3 处理高 4.96% 和 3.41%。不同施氮量水平下, 有机肥等氮替代化肥表现出不同变化趋势。N1 和 N2 水平下, R25 处理的平均耗水量最高, 但是与 R37.5 间无显著差异, 然而, 在 N3 水平下, R37.5 处理的平均耗水量最高, 但与 R25 间无显著差异。

施氮量对 WUE 有极显著影响 ($p < 0.01$), 替代比例及两者交互作用对 WUE 的影响未达到显著水平 ($p > 0.05$, 图 5)。处理 N1R25 的 WUE 最高(5.20 kg/m 3), 比处理 N3R0 高 32.18%。施氮量与 WUE 呈正相关。随着施氮量增加, WUE 持续上升, N1 处理的平均 WUE 分别比 N2 和 N3 处理高 0.75%, 13.80%。随着有机肥替代比例的提高, WUE 呈先升高后降低趋势, R25 处理的平均 WUE 分别比 R0、R12.5、R37.5、

R50 处理高 8.51%,0.77%,7.03%,9.54%。

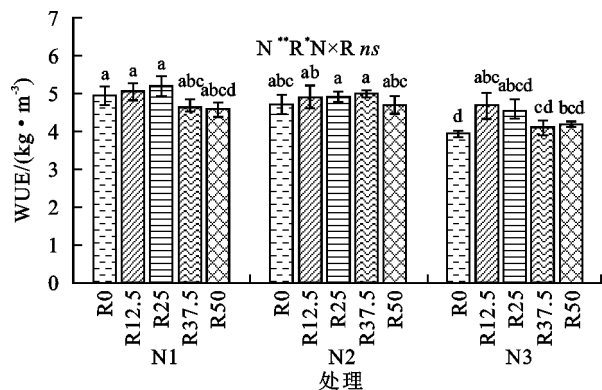


图 5 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米 WUE 的影响
Fig. 5 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring WUE under different nitrogen application rates

2.4 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米 NPFP 的影响

施氮量和替代比例对春玉米 NPFP 的影响分别达到极显著($p<0.01$)和显著水平($p<0.05$),两者交互作用对 NPFP 的影响不显著($p>0.05$,图 6)。不同处理下春玉米 NPFP 存在显著差异($p<0.05$)。NPFP 为 58.43~120.02 kg/kg,处理 N3R12.5 达到最大值,但与处理 N3R25 和 N3R50 间无显著差异。施氮量与 NPFP 存在极显著负相关,随着施氮量增加,NPFP 持续降低,与 N3 处理相比,N1 和 N2 处理的平均 NPFP 分别降低 43.99%,22.16%。适量的增加有机肥替代比例可改善春玉米的 NPFP,与 R0 处理相比,R12.5 和 R25 处理的平均 NPFP 分别增加 11.32%,12.15%。

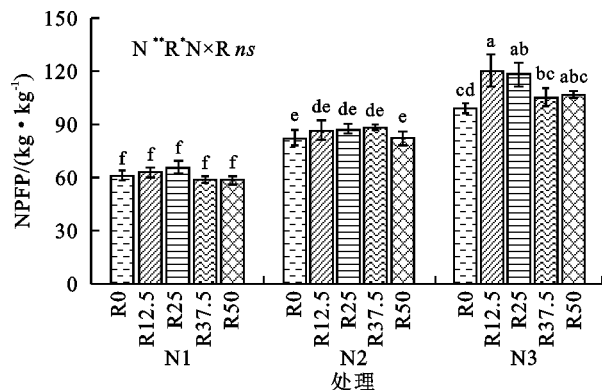


图 6 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米 NPFP 的影响
Fig. 6 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on spring NPFP under different nitrogen application rates

2.5 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米经济效益的影响

施氮量对春玉米总收益、净收入和产投比有极显著影响($p<0.01$),替代比例对 3 个指标有显著影响

($p<0.05$),然而两者交互作用对 3 个指标的影响不显著($p>0.05$,表 4)。不同处理下春玉米总收益、净收入和产投比存在显著差异($p<0.05$)。处理 N2R37.5 的总收益、净收入和产投比最高,分别为 2.39,1.46 万元/hm²和 2.58。随着施氮量增加,净收入呈先上升后下降趋势,N2 处理下的平均净收入分别比 N1 和 N3 处理高 8.76%,29.42%。不同施氮水平下,最优替代比例处理略有差异。在 N1 处理下,R25 处理的净收入最高(1.43 万元/hm²);在 N2 处理下,R37.5 处理的净收入最高(1.46 万元/hm²);在 N3 处理下,R12.5 处理的净收入最高(1.25 万元/hm²)。施氮量对春玉米产投比有极显著影响($p<0.01$),N2 处理下的平均产投比分别比 N1 和 N3 处理高 6.19%,14.59%。随着有机肥替代比例增加,春玉米产投比呈先升后降趋势,于 R25 处理达最高值。

2.6 相关性分析

春玉米 DMA 与 MY、ET、WUE、NC、II 分别在 0.001,0.01,0.001,0.001,0.001 级别呈显著正相关,相关系数为 0.473~0.878。MY 与 ET、WUE、NC、II 分别在 0.05,0.001,0.001,0.001 级别呈显著正相关,相关系数分别为 0.375,0.974,0.998,0.991。ET 与 NPFP、NC、II 分别在 0.05,0.01,0.01 级别呈显著正相关,相关系数分别为 0.304,0.403,0.441。WUE 与 NC、II 分别在 0.001,0.001 级别呈显著正相关,相关系数分别为 0.965,0.948。NC 与 II 在 0.001 级别呈显著正相关,相关系数为 0.997。NPFP 与 DMA、MY、WUE 呈负相关,但均未达到显著水平(图 7)。

2.7 基于春玉米生长、产量、WUE、NPFP 和经济效益的多目标优化

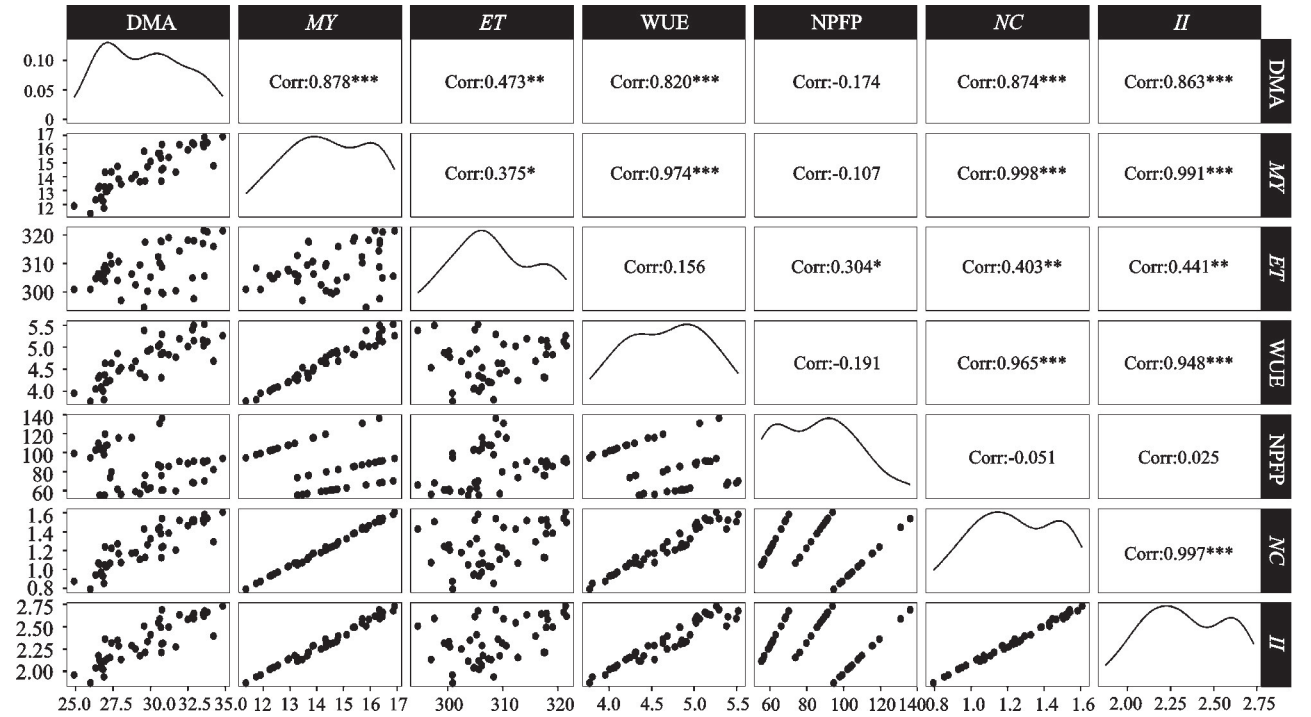
在实际农业生产实践中,增加肥料施用量可有效改善春玉米生长和产量,但也提高生产实践中的投入成本,减少经济效益,甚至降低水肥利用效率。而当肥料施用量降低时,虽然农业生产过程投入成本减少,有效提升资源利用效率,但春玉米产量和经济效益将显著下降。因此,如何同时优化作物生长、产量、水肥利用效率和经济效益对当地春玉米生产可持续发展至关重要。以施氮量和替代比例为自变量,以春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP、净收入为因变量进行多元回归分析(表 5),拟合方程拟合优度的 R^2 均 >0.827 。采用 Matlab 分析可得各回归方程的最大值以及其相应的施氮量 N 和替代比例 R,春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP、净收入难以在同一施氮量和有机肥替代比例下同时得到最优值(表 6),例如,当施氮量为 194 kg/hm²,有机肥替代比例为 23%时,虽然春玉米干物质累积量获得最大值

($3.33 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$), 但春玉米产量、WUE、NPFP、净收入均未能达到最优。

表 4 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米经济效益的影响

Table 4 Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on economic benefits of spring maize under different nitrogen application rates

处理	投入/(万元·hm ⁻²)			总收益/ (万元·hm ⁻²)	净收入/ (万元·hm ⁻²)	产投比
	肥料	其他	总投入			
N1R0	0.15	0.80	0.95	2.20abc	1.26ab	2.33ab
N1R12.5	0.15	0.80	0.95	2.26ab	1.32ab	2.39ab
N1R25	0.14	0.80	0.94	2.37a	1.43a	2.51a
N1R37.5	0.14	0.80	0.94	2.13abc	1.19abc	2.26abc
N1R50	0.14	0.80	0.94	2.10abcd	1.17abc	2.24abc
N2R0	0.13	0.80	0.93	2.22abc	1.29ab	2.39ab
N2R12.5	0.13	0.80	0.93	2.35a	1.42a	2.53a
N2R25	0.13	0.80	0.93	2.37a	1.45a	2.56a
N2R37.5	0.13	0.80	0.93	2.39a	1.46a	2.58a
N2R50	0.12	0.80	0.92	2.22abc	1.29ab	2.40ab
N3R0	0.11	0.80	0.91	1.78d	0.87c	1.96c
N3R12.5	0.11	0.80	0.91	2.16abc	1.25ab	2.37ab
N3R25	0.11	0.80	0.91	2.13abc	1.22ab	2.34ab
N3R37.5	0.11	0.80	0.91	1.89cd	0.98bc	2.08bc
N3R50	0.11	0.80	0.91	1.92bcd	1.02bc	2.12bc
方差分析						
N	/	/	/	* *	* *	* *
R	/	/	/	*	*	*
N×R	/	/	/	ns	ns	ns



注: DMA、MY、ET、WUE、NPFP、NC、II 分别为春玉米干物质累积量、产量、耗水量、水分利用效率、氮肥偏生产力、净收入和产投比。*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 级别(双尾)相关性显著。

图 7 春玉米各指标的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of various indicators of spring maize

进一步分析考虑将五者最大值的 80% 以上的置信区间设为可接受的优化范围,随着置信区间范围的扩大,春玉米干物质累积量、产量、WUE、净收入重叠区域也逐渐增加,NPFP 与干物质累积量、产量、

WUE、净收入的变化规律完全相反,即得到的 NPFP 最大值的置信区间与干物质累积量、产量、WUE、净收入的置信区间均无重叠区域,一旦继续扩大优化置信区间的范围,所得到的优化结果将会严重降低春玉米干物质累积量、产量、WUE、净收入,违背春玉米生产的高产、高效益的目标,因此,优先考虑春玉米干物质累积量、产量、WUE、净收入的优化。当干物质累积量达到最优值 99% 的置信区间内时,所需的施氮量和替代比例区间分别为 174~212 kg/hm² 和 15%~31%;当产量达到最优值 99% 的置信区间内时,所需的施氮量和替代比例区间分别为 178~216 kg/hm² 和 15%~32%;当 WUE 达到最优值 99% 的置信区间内时,所需施氮量和替代比例区间分别为 190~242 kg/hm² 和 11%~29%;当净收入达到最优值 99% 的置信区间内时,所需的施氮量和替代比例区间分别为 180~210 kg/hm² 和 17%~30%。因此,当以干物质累积量、产量、WUE 和净收入最优值 99% 的置信区间为目标时,符合条件的施氮量和替代比例区间分别为 190~210 kg/hm² 和 17%~29%,此时,NPFP 为 77.05~85.27 kg/kg,约为 NPFP 最大值的 65%(图 8)。

表 6 最优春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP、净收入所对应的施氮量和替代比例

Table 6 Nitrogen application and replacement ratio corresponding to optimal spring maize dry matter accumulation, yield, WUE, NPFP and net income

因变量	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	替代比例/(%)	干物质累积量/ (×10 ⁴ kg·hm ⁻²)	产量/ (×10 ⁴ kg·hm ⁻²)	WUE/ (kg·m ⁻³)	NPFP/ (kg·kg ⁻¹)	净收入/ (万元·hm ⁻²)
最优干物质累积量	194	23	3.328	1.614	5.094	83.990	1.491
最优产量	198	23	3.327	1.615	5.105	82.391	1.490
最优 WUE	216	20	3.284	1.600	5.131	75.069	1.460
最优 NPFP	100	26	2.604	1.246	4.178	122.162	0.965
最优净收入	195	23	3.328	1.615	5.097	83.590	1.491

3 讨论

3.1 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米干物质累积量、产量和经济效益的影响

干物质累积量是衡量作物生长状况优劣的重要指标之一,干物质累积量高低直接影响作物产量形成和经济效益^[12]。本研究发现,单个处理的干物质累积量随时间的动态变化规律采用 Logistic 模型拟合后具有较好的效果,各处理干物质累积速率均随生长时间呈“慢—快—慢”变化趋势,与前人^[13]研究结果基本一致。拟合结果表明,N2(中肥)处理下干物质累积快速增长期的起始、结束和日最大增长量出现的时间均提前,有效提升干物质的日最大增长量和平均增长速率,促进干物质累积量的形成,与严富来等^[14]研究结果相同。适当的有机肥替代比例可提升干物

表 5 施氮量和替代比例的耦合效应对春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP、净收入的回归关系

Table 5 Regression relationships of the coupled effects of nitrogen application and replacement ratio on dry matter accumulation, yield, WUE, NPFP, and net income of spring maize

因变量	回归方程	R ²
干物质累积量	$y = -1\,916.212 + 329.880 \times N - 0.832\,21 \times N^2 + 282.010 \times R - 0.329\,37 \times NR - 4.711\,03 \times R^2$ $y = -954.528 + 158.824 \times N - 0.393\,82 \times N^2 + 125.497 \times R - 0.154\,57 \times NR - 2.056\,41 \times R^2$ $y = 1.208\,96 + 0.032\,654 \times N - 7.224 \times 10^{-5} \times N^2 + 0.038\,290 \times R - 6.839 \times 10^{-5} \times NR - 5.789 \times 10^{-4} \times R^2$ $y = 152.929 - 0.403\,69 \times N + 4.919 \times 10^{-5} \times N^2 + 0.760\,18 \times R - 6.677 \times 10^{-4} \times NR - 0.013\,19 \times R^2$ $y = -10\,181.792 + 235.237 \times N - 0.590\,73 \times N^2 + 188.246 \times R - 0.226\,86 \times NR - 3.084\,62 \times R^2$	0.903
产量		0.845
WUE		0.827
NPFP		0.966
净收入		0.831

注:N和R分别代表施氮量和替代比例。

质累积的日最大增长量,促进作物生物量的形成,R25(替代 25%)处理的平均日最大增长量最高,分别比 R0(无替代)、R12.5(替代 12.5%)、R37.5(替代 37.5%)、R50(替代 50%)处理高 15.31%,4.84%,12.90%,14.05%,原因可能是当生育期施用的肥料为化肥时,其施入土壤后由于快速水解,导致春玉米生育期后期氮素供应受阻,而有机肥的施入可克服化肥肥效后劲不足的缺点,使得春玉米生育期后期氮素持续供应,促进春玉米干物质持续累积,有利于产量形成^[15]。在本研究中,不同有机肥等氮替代化肥比例对干物质累积量的影响不同,过高或过低的有机肥等氮替代比例均对春玉米干物质累积量产生不利影响,R25(替代 25%)处理的平均干物质累积量的最优。土壤中氮素的供应量高低是影响干物质累积量的另一重要因素。

在本研究中,施氮肥是提升春玉米干物质累积量的重要手段,随着施氮量的增加,春玉米干物质累积量呈先上升后下降趋势,与 ZHANG 等^[16] 研究结果相似,可能有两个方面的原因,首先,施氮肥是农业生产实践中促进作物生长、改善产量的重要方式,合理的施氮量可增加作物叶表面光合色素的形成,改善植株光合作用速率,提升春玉米根系生长,加速干物质质量的累积,然而,一旦施氮量超过作物所需养分的阈值,严重的根系盐害胁迫将阻碍根系养分吸收,引起玉米叶片发黄,抑制作物干物质质量的形成,不利于作物生长;其次,合理的施氮量可维持春玉米营养器官和生殖器官正常的养分循环,但过量施氮打破平衡,造成营养器官产生“徒长”现象,从而推迟作物成熟期,增加病虫害发生的可能性,不利于春玉米干物质的累积^[17]。

科学合理的氮肥管理措施对作物增产极其重要,适当增加有机肥等氮替代化肥比例可显著提升作物产量。赵吉霞等^[18] 研究发现,与单施化肥相比,多个有机肥替代化肥的处理提高玉米籽粒 6.07%~19.53%,提高秸秆生物量 2.16%~21.76%。吕梦等^[19] 通过多年定位试验对减氮配施有机肥条件下旱区玉米生长和产量的影响研究发现,相比于不施肥和单个施用化肥,化肥减氮配施有机肥处理可显著提升玉米干物质累积量和籽粒产量。本研究表明,有机肥替代比例对春玉米籽粒产量有显著影响($p<0.05$),随着有机肥替代比例的升高,玉米籽粒产量和部分产量构成要素(百粒重、穗粒数、行粒数、穗长、穗粗)呈先上升后降低趋势,产生此现象的原因可能是陕北地区土壤贫瘠,土壤中氮素含量较低,化肥施用后可迅速补充土壤中的速效养分,对春玉米产量产生积极效应,适量的有机肥等氮代替化肥后,可有效改善春玉米生育期根部氮素的循环和供应过程,既可确保春玉米整个生育期根部土壤氮素的持续供应,又可满足生长发育期间作物的氮素需求,有利于作物产量形成,因此,适量增加有机肥替代比例可有效提升产量,增加经济效益,虽然有机肥中富含大量的养分和有机质,对作物提产增效至关重要,但有机肥中养分的矿化速率缓慢,在单位时间内所释放的养分含量有限,所以,当有机肥等氮替代比例过高时,对作物生长和产量产生不利影响。有机无机配施可有效提升作物产量和经济效益,并且当有机肥等氮替代比例在 25% 左右时效果最佳^[20],与本试验结果基本相同,R25(替代 25%)处理下的平均产量、净收入、产投比最优。施氮量对春玉米产量、净收入、产投比有极显著影响($p<0.01$),说明 N1(高肥)、N2(中肥)、N3(低

肥)处理下春玉米平均产量、净收入、产投比存在显著差异。随着施氮量增加,春玉米产量、净收入和产投比呈单峰变化趋势,在 N2(中肥)处理下达到最优值,与前人^[21] 研究相似,原因可能是当施氮量由 N2(中肥)增加到 N1(高肥)时,过量的氮肥投入将抑制春玉米根部生长和发育,减少作物根部对土壤水分和养分的吸收能力,造成作物减产;另外,在玉米灌浆期合理的根部土壤氮素供应将减少春玉米营养器官(叶和茎)氮素向生殖器官(籽粒)的转运,延缓叶片衰老速率,延长作物生物量形成时间,从而提高产量,YAN 等^[22] 的研究结果可验证此观点。

3.2 不同施氮量下有机肥等氮替代化肥对春玉米 WUE 和 NPFP 的影响

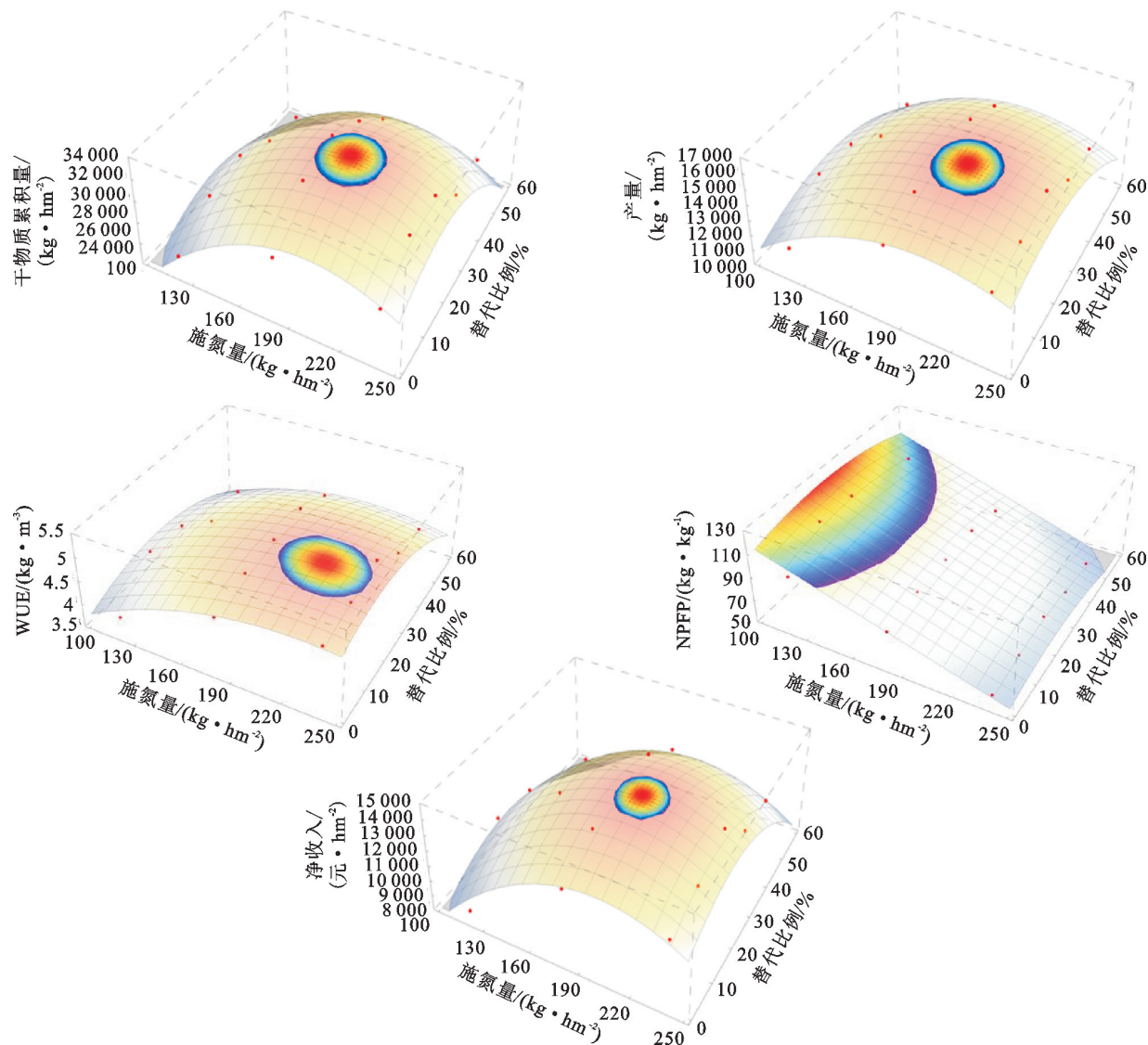
提高水肥利用效率是旱区农业高效利用、可持续发展的关键。本研究发现,施氮量、替代比例以及两者交互对春玉米 ET 有极显著影响($p<0.01$),说明有机肥替代比例对春玉米 ET 的响应因施氮量不同将有所差异。对春玉米各生育阶段耗水量分析发现,春玉米在灌浆期和吐丝期耗水量最高,与焦智辉等^[23] 研究结果相同。处理 N2R25 的耗水量最高(319.56 mm),但与处理 N2R12.5 和 N2R37.5 间无显著差异,原因可能是 N2(中肥)和 R25(替代 25%)处理下可有效提升春玉米的根部生长性状,促使根部向更加深层的土壤移动,以致消耗更多土壤水分,提高 ET 。WUE 是反映作物产量和水分消耗量动态变化的另一种表现形式。在本研究中,施氮量对 WUE 有极显著影响($p<0.01$),N1(高肥)、N2(中肥)和 N3(低肥)处理的平均 WUE 存在显著差异,随着施氮量增加,WUE 持续上升,但从 N3(低肥)增加到 N2(中肥)处理的平均 WUE 增幅明显高于 N2(中肥)增加到 N1(高肥)处理,可能是适量的氮肥投入将促进根系生长和冠层发育,提高作物蒸腾能力,加速作物生育期新陈代谢,进而促使作物从根区持续吸收水分,在供水恒定或略微增加的情况下显著提升 WUE,然而,当施肥量过多时将引起根区盐离子浓度骤增,其将显著提升作物无效的水分消耗,同时影响春玉米产量的形成,降低 WUE。减氮配施有机肥是提升 WUE 的另外一种手段,在本研究中,R25(替代 25%)处理的平均 WUE 显著高于其余处理,与张作为等^[24] 研究相同,可能是适量的有机肥施入可明显优化土壤物理性质,提高降雨入渗同时抑制土壤水分的蒸发,有效改善作物水分利用效率,对实现旱地农业可持续发展具有重要意义。

NPFP 是衡量作物氮肥利用效率高低的的重要指标之一。本研究表明,施氮量与 NPFP 存在极显著

负相关,随着施氮量增加,NPFP 持续降低,可能是由于产量的边际效应而引起,春玉米产量并非与施氮量呈正相关,当施氮量超过一定阈值时,产量不增加,甚至降低,最终降低 NPFP。另外,虽然施氮提升土壤中速效养分的含量,但由于作物对土壤中速效养分吸收能力有限,因此,吸收养分引起的春玉米产量的增加量明显低于春玉米整个生育期氮肥的施用量,也是导致 NPFP 随施氮量的增加持续降低的另一原因^[25]。有机肥等氮替代化肥比例对春玉米 NPFP 有显著影响($p<0.05$),适量增加有机肥替代比例可改善春玉米的 NPFP,R25(替代 25%)处理最优,与 LI 等^[26]研究结果相似,分析其原因可能是有机肥与化肥适宜比例配施可显著提升土壤中速效养分的吸附能力,提高土壤肥力,改善土壤质地状况,从而提升春玉米 PFP。

3.3 基于春玉米生长、产量、WUE、NPFP 和经济效益的多目标优化

单一处理无法同时兼顾多个指标同时最优,有必要采用多目标优化。在选择同时兼顾多个目标的最佳氮肥管理方案时,考虑到 NPFP 最大值的 80%置信区间与干物质累积量、产量、WUE 和净收入无重叠区域,一旦继续扩大优化区间范围将造成干物质累积量、产量、WUE 和净收入大大降低,故先考虑基于春玉米干物质累积量、产量、WUE 和净收入进行多目标优化,通过探讨干物质累积量、产量、WUE 和净收入与施氮量和替代比例间的关系得到,施氮量和替代比例区间分别为 190~210 kg/hm² 和 17%~29% 时,优化区间所得到的 NPFP 在 77.05~85.27 kg/kg,春玉米干物质累积量、产量、WUE 和净收入均可达到最优值的 99% 以上。



注:图中红点代表各处理指标实测值的平均值;蓝色区域分别表示春玉米干物质累积量的 99% 置信区间,产量最优值的 99% 置信区间,WUE 最优值 99% 置信区间,NPFP 最优值 80% 置信区间和净收入最优值 99% 置信区间;图中的颜色由蓝变红,表示数值距离最优值越来越近。

图 8 春玉米干物质累积量、产量、WUE、NPFP 和净收入与施氮量和替代比例的关系

Fig. 8 Relationship between spring maize dry matter accumulation, yield, WUE, NPFP and net income and nitrogen application and replacement ratio

4 结 论

(1) Logistic 函数对春玉米干物质累积量具有较高的拟合度, 有机肥等氮替代 12.5% 处理可推迟干物质快速积累期的起点、终点、最大值出现的时间, 中肥 (180 kg/hm²) 处理可提升干物质累积量的日最大增长速率。施氮量和替代比例对春玉米干物质累积量、产量及构成要素、经济效益有显著或极显著影响, 两者交互作用对穗长和穗粗的影响显著。中肥 (180 kg/hm²) 和有机肥等氮替代 25% 处理的平均干物质累积量、产量及构成要素和经济效益最高。

(2) 施氮量对生育期耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力有极显著影响, 替代比例对耗水量和水分利用效率有显著影响, 两者交互作用对耗水量有显著影响。随着施肥量的增加, 水分利用效率上升, 而氮肥偏生产力呈下降趋势。有机肥等氮替代 12.5%, 25%, 37.5% 处理的平均水分利用效率和氮肥偏生产力显著高于无替代处理。

(3) 在施氮量和替代比例区间分别为 190~210 kg/hm² 和 17%~29% 时, 可使春玉米干物质累积量、产量、水分利用效率、氮肥偏生产力、净收入得到同步优化, 为陕北旱作雨养区最适宜的氮肥管理区间。

参考文献:

- [1] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, et al. Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122(2): 157-171.
- [2] 吴希, 王家瑞, 郝森艺, 等. 种植密度对不同生育期玉米品种光温资源利用率和产量的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(4): 1065-1078.
WU X, WANG J R, HAO M Y, et al. Effects of planting density on solar and heat resource utilization and yield of maize varieties at different growth stages[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(4): 1065-1078.
- [3] WANG X K, LI Z B, XING Y Y. Effects of mulching and nitrogen on soil temperature, water content, nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161: 53-64.
- [4] 李荣, 勉有明, 侯贤清, 等. 施氮对还田秸秆腐解及养分释放、土壤肥力与玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(7): 2012-2022.
LI R, MIAN Y M, HOU X Q, et al. Effects of nitrogen application on decomposition and nutrient release of returning straw, soil fertility, and maize yield[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(7): 2012-2022.
- [5] 徐路路, 王晓娟. 有机肥等氮量替代化肥对土壤养分及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(1): 23-29.
- XU L L, WANG X J. Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1): 23-29.
- [6] LI P, LI Y B, XU L Y, et al. Crop yield-soil quality balance in double cropping in China's upland by organic amendments: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 403: e115197.
- [7] 陈倩, 谢军红, 李玲玲, 等. 不同比例有机肥替代化肥对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 162-170.
CHEN Q, XIE J H, LI L L, et al. Effects of different proportions of organic fertilizer substitutes for chemical fertilizer on growth characteristics and water use efficiency of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 162-170.
- [8] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes to enhance winter wheat grain yield by improving post-anthesis dry matter accumulation and translocation in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: e107782.
- [9] 张帆, 陈梦茹, 邢英英, 等. 基于熵权法和 TOPSIS 对马铃薯施肥和滴灌量组合的优化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 732-744.
ZHANG F, CHEN M R, XING Y Y, et al. Optimization of fertilizer and drip irrigation levels for efficient potato production based on entropy weight method and TOPSIS[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 732-744.
- [10] HOU X H, FAN J L, HU W H, et al. Optimal irrigation amount and nitrogen rate improved seed cotton yield while maintaining fiber quality of drip-fertigated cotton in northwest China[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 170: e113710.
- [11] ZOU H Y, FAN J L, ZHANG F C, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: e105986.
- [12] 李澳旗, 张俊, 崔晓路, 等. 不同灌水量下尿素添加适宜氮肥增效剂促进夏玉米灌浆增产[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 99-110.
LI A Q, ZHANG J, CUI X L, et al. Nitrogen fertilizer synergist in urea under irrigation for high yield of summer maize at the filling stage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 99-110.
- [13] CHENG M H, WANG H D, ZHANG F C, et al. Effects of irrigation and fertilization regimes on tuber yield, water-nutrient uptake and productivity of potato

- under drip fertigation in sandy regions of northern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287: e108459.
- [14] 严富来,张富仓,范兴科,等.基于空间分析的宁夏沙土春玉米滴灌水氮管理模式研究[J].*农业机械学报*,2019,50(11):219-228.
- YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Optimal irrigation and nitrogen management model under drip fertigation system based on spatial analysis of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(11):219-228.
- [15] 裴雪霞,党建友,张定一,等.化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响[J].*水土保持学报*,2021,35(4):250-258.
- PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield, quality, and water use efficiency of dryland wheat[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2021,35(4):250-258.
- [16] ZHANG F, CHEN M R, FU J T, et al. Coupling effects of irrigation amount and fertilization rate on yield, quality, water and fertilizer use efficiency of different potato varieties in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023,287:e108446.
- [17] 吴金芝,肖慧淑,郭锦花,等.秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 化肥对旱地玉-麦产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响[J].*水土保持学报*,2023,37(4):319-326.
- WU J Z, XIAO H S, GUO J H, et al. Effects of straw returning combined with organic fertilizer replacing 1/3 chemical fertilizer on grain yield, grain protein and chemical fertilizer use efficiency in dayland maize-wheat double cropping system[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(4):319-326.
- [18] 赵吉霞,禹妍彤,周芸,等.有机肥等氮替代化肥对玉米产量和氮素吸收利用效率的影响[J].*水土保持研究*,2022,29(5):374-381.
- ZHAO J X, YU Y T, ZHOU Y, et al. Effect of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on main yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J].*Research of Soil and Water Conservation*,2022,29(5):374-381.
- [19] 吕梦,黄明,侯园泉,等.减氮配施有机肥对豫西旱区玉米产量及氮肥利用率的影响[J].*玉米科学*,2023,31(4):158-164.
- LÜ M, HUANG M, HOU Y Q, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer application on maize yield and nitrogen use efficiency in western Henan arid region[J].*Journal of Maize Sciences*,2023,31(4):158-164.
- [20] ZHAI L C, WANG Z B, ZHAI Y C, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer benefits grain yield, water use efficiency, and economic return of summer maize[J].*Soil and Tillage Research*, 2022,217:e105287.
- [21] LAI Z L, FAN J L, YANG R, et al. Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*,2022,263:e107453.
- [22] YAN F L, LIU X Q, BAI W Q, et al. Multi-objective optimization of water and nitrogen regimes for drip-fertigated sugar beet in a desert climate[J].*Field Crops Research*,2022,288:e108703.
- [23] 焦智辉,陈桂平,范虹,等.绿洲灌区密植减量施氮玉米的水分利用特征[J].*中国农业科学*,2023,56(16):3088-3099.
- JIAO Z H, CHEN G P, FAN H, et al. Water use characteristics of increased plant density and reduced nitrogen application maize in oasis irrigated area[J].*Scientia Agricultura Sinica*,2023,56(16):3088-3099.
- [24] 张作为,李宏宇,付强,等.化肥有机肥配施对河套灌区土壤盐分及玉米水肥利用的影响[J].*应用基础与工程科学学报*,2023,31(5):1170-1182.
- ZHANG Z W, LI H Y, FU Q, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on soil salinity and corn water and fertilizer utilization in Hetao irrigation district[J].*Journal of Basic Science and Engineering*,2023,31(5):1170-1182.
- [25] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2018,34(22):111-120.
- ZHANG F C, YAN F L, FAN X K, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2018,34(22):111-120.
- [26] LI X Y, LI B, CHEN L, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer over seven years increases yields and restores soil bacterial community diversity in wheat-rice rotation[J].*European Journal of Agronomy*,2022,133:e126445.