

长期翻压绿肥河西绿洲灌区小麦的化肥减施潜力

崔 恒^{1,2,3}, 车宗贤^{1,2,3*}, 张久东^{1,2,3*}, 包兴国^{1,2,3}, 卢秉林^{1,2,3}, 吴科生^{1,2,3},
杨蕊菊^{1,2,3}, 樊志龙⁴, 曹卫东⁵

(1 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃兰州 730070; 2 农业农村部甘肃耕地保育与农业环境科学观测实验站, 甘肃兰州 730070; 3 国家土壤质量兰州观测实验站, 甘肃兰州 730070; 4 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; 5 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 【目的】研究长期翻压绿肥条件下减施化肥对小麦产量稳定性以及地力贡献的影响, 为甘肃省河西绿洲灌区高效施肥和可持续发展提供理论依据。【方法】2009—2020 年在河西绿洲灌区开展了 12 年的定位试验, 供试作物为春小麦。试验处理包括不施肥对照 (CK)、100% 化肥 (CF) 以及翻压绿肥后化肥分别减量 0%、10%、20%、30%、40%、100%。根据历年小麦产量, 计算累积增产率、产量可持续性指数和变异系数; 构建一元灰色线性模型, 计算不同施肥长期趋势产量; 计算累积土壤地力贡献率以及不同处理累积肥料贡献率。【结果】随着试验年限延长, 除减施 100% 化肥处理外, 各翻压绿肥处理肥料对小麦产量的累积贡献率均呈现增加的趋势, 且处理间肥料对产量的贡献率无显著差异, 2020 年均达到 60% 左右。不施肥处理 (CK) 土壤地力对小麦产量的累积贡献率不断下降, 从 2009 年的 57.41% 下降至 2020 年的 34.24%。翻压绿肥基础上化肥减量 40% 以内, 小麦 12 年平均产量高于 100% 化肥处理 (CF)。一元灰色线性模型显示化肥减量 40% 以内, 小麦产量变异系数随着化肥减施量的升高而不断升高, 产量可持续指数则不断下降。化肥减量 40% 处理的小麦产量于第 9 年开始低于 CF 处理。化肥减施量 (x) 与小麦产量 (y) 的回归方程为: $y = -0.292x^2 + 11.917x + 6667.34$, 达到理论最高产量的化肥减施比例为 20.41%。相关性分析发现, 不同施肥处理通过影响株高、穗长、小穗数以及穗粒数影响产量。【结论】在翻压绿肥 30000 kg/hm² 基础上, 将农民习惯化肥施用量减少 20%~30%, 不仅可以提高小麦的产量, 维持长期高产趋势, 还可以提升土壤地力对小麦产量的贡献率, 因而是甘肃农业可持续发展的有效措施。

关键词: 小麦; 施用绿肥; 化肥减施; 产量; 可持续指数

Potentials of chemical fertilizer reduction for wheat production in Hexi oasis irrigation area under long-term application of green manure

CUI Heng^{1,2,3}, CHE Zong-xian^{1,2,3*}, ZHANG Jiu-dong^{1,2,3*}, BAO Xing-guo^{1,2,3}, LU Bing-lin^{1,2,3}, WU Ke-sheng^{1,2,3},
YANG Rui-ju^{1,2,3}, FAN Zhi-long⁴, CAO Wei-dong⁵

(1 Institute of Soil, Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2 Gansu Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3 National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Liangzhou, Lanzhou 730070, China; 4 College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 5 Agricultural Resource and Regional Planning Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】We studied the effects of decreasing different ratios of chemical fertilizer on yield stability of wheat, and the changes in soil fertility contribution to crop yield under long-term application of green manure, to provide a scientific basis for the efficient and sustainable development of wheat production in Hexi oasis irrigation area in Gansu Province of China. 【Methods】Field experiments were conducted consecutively

收稿日期: 2022-07-07 接受日期: 2022-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700204); 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-22)。

联系方式: 崔恒 E-mail: 249966314@qq.com

* 通信作者 车宗贤 E-mail: chezongxian@163.com; 张久东 E-mail: 365122769@qq.com

for 12 years in Hexi oasis irrigation area from 2009 to 2020, the tested crop was spring wheat. The experimental treatments were composed of no fertilizer (CK), 100% chemical fertilizer (CF), and reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure 30000 kg/hm² per year. The cumulative yield, sustainable yield index (SYI) and its coefficient of variation (CV) were investigated. A grey linear model was used to quantitatively analyze the dynamics of yield and soil fertility contribution rate to yield under green manure application. 【Results】As the experiment progressed, the cumulative contribution rate of fertilizer to wheat yield exhibited an increasing trend under green manure application except for 100% reduction of fertilizer application, and there was no significant difference between treatments in the contribution rate of fertilizer to wheat yield, reaching about 60% in 2020. The cumulative soil fertility contribution rate of CK decreased from 57.41% in 2009 to 34.24% in 2020. Reducing less than 40% of chemical fertilizer did not decrease the average yield of entire 12 years, compared to 100% chemical fertilizer treatment (CF). However, higher chemical fertilizer reduction rate exhibited rising yield CVs and declining SYIs. The grey linear model revealed that the yield dynamics of chemical fertilizer reduction less than 40% was significantly higher than CF treatment. The 40% fertilizer reduction treatment recorded lower yield than CF from the ninth experimental year. Wheat yield (y) and chemical fertilizer reduction rate (x) had the regression relationship of $y = -0.292x^2 + 11.917x + 6667.34$, with the theoretical maximum yield at the reduction rate of 20.41%. The yield was mainly correlated positively with plant height, spike length, fertile spikelet number, and grain number per spike. 【Conclusions】On the basis of continuous application of green manure at 30000 kg/hm² per year, reducing 20%~30% of local chemical fertilizer input will increase wheat yield, enhance the yield stability, and the soil fertility contribution to yield, that will increase the chemical fertilizer efficiency and the sustainability of wheat production in Hexi oasis area of Gansu.

Key words: wheat; green manure application; chemical fertilizer reduction; yield; sustainable yield index

化肥是农业生产的基础,在粮食增产和农业发展过程中起到至关重要的作用^[1-2],这也导致化肥的施用量急剧增加,已有研究表明我国化肥用量为 531.9 kg/hm²,是世界平均水平的 3.9 倍^[3]。化肥的不合理施用不仅会导致养分的浪费及肥料的增产效应降低^[4],也会造成土壤酸化、养分失调、养分淋失以及大气污染等一系列环境问题^[5-6]。甘肃河西绿洲灌区是小麦的高产区,该区域小麦种植面积占全省的 18%,但其产量占全省的 30%,过分追求产量导致该区域化肥过量施用现象严重^[7]。

绿肥是我国传统农业的精华,作为一种优质、清洁成本又相对低廉的有机肥源养分含量全面,除大量元素外还具有丰富的中微量元素,同时还具有无抗生素、重金属等次生环境威胁的优点^[8-10];此外,翻压绿肥还可以培肥土壤,改善土壤理化性状及土壤微生态环境,进而提高作物的产量^[11-15]。近年来将其作为有机肥还田减少化肥用量的研究不断增加,廖育林等^[16]的研究表明翻压紫云英后化肥减量 20% 及 40% 均能提高早稻产量;杨璐等^[17]研究发现,翻压二月兰化肥减量 15% 产量有提高趋势,减量 30% 能基本维持产量。研究结果会因主作物及绿

肥作物等因素存在一定的差异。且前人研究多集中在短期田间试验上^[18],而化肥当季利用率较低,前季肥料的后效以及年际气候变异对作物产量影响显著^[19],而长期定位试验同时具备时间上的长期性和气候上的代表性,具有克服这些不稳定因素的优势。

为此,本研究选取北方地区广为种植的豆科绿肥箭筈豌豆 (*Vicia sativa* L.) 及毛叶苕子 (*Vicia villosa* L.), 通过始于 2009 年的长期定位试验,综合分析翻压绿肥后不同的化肥减施量下小麦的产量及其稳定性和可持续性、土壤养分含量等指标,以期为该地区绿肥资源的利用以及翻压绿肥后化肥的合理减量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

定位试验设置于甘肃省武威市凉州区永昌镇白云村武威绿洲农业综合试验站 (38°04' N, 102°35' E), 试验区位于河西走廊东段,属于温带大陆性干旱气候,海拔 1504 m,一年内无霜期 150 天左右。年降雨量 150 mm,年蒸发量 2021 mm,年平均气温 7.7℃,

≥10℃ 的有效积温为 3016℃。年太阳辐射总量 140~158 kJ/cm², 麦收后 ≥10℃ 有效积温为 1350℃, 属于典型的两季不足、一季有余的自然生态区。土壤为灌漠土, 试验开始时, 0—20 cm 耕层土壤基本理化性状为: 有机质 19.1 g/kg, 速效氮 74.3 mg/kg, 速效磷 9.9 mg/kg, 速效钾 169.7 mg/kg, pH 8.31。

1.2 试验设计

定位试验始于 2009 年, 至 2020 年已有 12 年。试验共设置 8 个处理, 不同处理的施肥量如表 1 所示, 每个处理设置 3 次重复, 小区之间打宽 50 cm、高 30 cm 的地埂, 小区面积为 20 m² (4 m×5 m)。100% 化肥处理 (CF) 的施肥量是根据农户常年的施肥习惯确定。各处理中化学氮肥 70% 作为底肥施入, 30% 作为苗期追肥; 磷肥作为底肥一次性施入。绿肥为小麦收割前套种混播的箭筈豌豆和毛叶苕子于盛花期收割的混合样, 其含水率为 75%, 风干样含氮 35 g/kg、磷 8.2 g/kg、钾 33 g/kg, 绿肥于小麦播种前翻入土壤作为底肥。小麦品种每 5 年更换 1 次, 分别为‘陇春 26’、‘陇春 30’、‘宁春 53’, 于每年 3 月中下旬播种, 7 月上中旬收获, 播种量为 450 kg/hm²。毛叶苕子品种为‘土库曼毛叶苕子’, 播种量为 30 kg/hm²; 箭筈豌豆为‘陇箭一号’, 播种量为 60 kg/hm²。氮肥为尿素 (含 N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (含 P₂O₅ 43%)。

表 1 不同处理化肥减施比例及养分和绿肥施用量
Table 1 Chemical fertilizer reduction rate, and nutrient and green manure input in different treatments

处理 Treatment	减施比例 (%) Reduction rate	投入量 Input (kg/hm ²)		绿肥 (kg/hm ²) Green manure
		N	P ₂ O ₅	
CK		0	0	0
CF		225	150	0
T ₋₀	0	225	150	30000
T ₋₁₀	10	202.5	135	30000
T ₋₂₀	20	180	120	30000
T ₋₃₀	30	157.5	105	30000
T ₋₄₀	40	135	90	30000
T ₋₁₀₀	100	0	0	30000

注: CK 为不施肥对照; CF 为 100% 化肥; T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀、T₋₁₀₀ 代表翻压绿肥后化肥分别减量 0%、10%、20%、30%、40%、100%。
Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₋₀, T₋₁₀, T₋₂₀, T₋₃₀, T₋₄₀, T₋₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure.

1.3 样品采集与分析

小麦成熟后, 避开边行以及测产带, 均匀选取整株小麦 20 株用于小麦考种。各小区小麦收获后通风阴干称重, 然后用脱粒机脱粒, 分别计算小麦籽粒产量。

小麦收获后, 各小区按照 5 点取样法采集 0—20 cm 耕层土壤样品, 通风阴干、过筛后用于理化性状的分析。土壤样品通风阴干后磨细过 1 mm 筛用于速效养分指标的测定, 过 0.149 mm 筛用于测定土壤有机质含量。土壤速效氮含量采用碱解—扩散法测定; 土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定。

1.4 数据处理与计算方法

累积增产率 (%)=(减施化肥处理产量-CF 处理产量)/CF 处理产量×100^[20]

累积土壤地力贡献率 (%)=(CK 产量/施肥处理最高产量)×100^[21]

累积肥料贡献率 (%)=(施肥处理产量-CK 产量)/施肥处理产量×100^[21]

式中: CF 为当地化肥施用量处理, CK 为不施肥处理。

产量可持续性指数 (sustainable yield index, SYI) 是衡量系统是否能持续生产的重要参数, SYI 越大, 系统的可维持性越好, 计算方法为:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max} \tag{1}$$

以统计学上的变异系数 (coefficient of variation, CV) 来衡量年际间产量的变异程度, CV 值越大则说明产量的稳定性越低。计算方法为:

$$CV = \sigma / \bar{Y} \times 100\% \tag{2}$$

式 (1) 和式 (2) 中, $\bar{Y}$ 表示某一处理的平均产量, σ 是标准差, $Y_{\max}$ 是该试验点的最高产量^[22-23]。

产量变化趋势是根据产量随着时间 (年) 的变化做成散点图, 依据散点图拟合的直线作为其趋势线 (一元一次方程), 并依据其斜率 (年际变化值) 大小来评定产量随着时间的变化情况^[23]。但产量的诸多不可控因子的影响导致产量的年际变化出现较大的波动, 因此将年际作物产量看成灰色量, 应用灰色系统理论^[24]的一次累加生成理论建立一元灰色线性趋势线。假设 Y 是一次累加生成的作物产量 (kg/hm²), t 为对应试验的时间, 建立一元线性回归模型:

$$y = a + bt \quad (3)$$

根据微积分的原理, 式中 b 的倒数为年际趋势产量均值, 通过对其置信区间的计算, 可以对不同施肥模式的作物趋势产量进行定量评价^[25]。

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行汇总整理, 采用 SPSS 25.0 统计分析软件对测得的数据进行差异显著性检验, 采用 origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦产量的影响

由历年小麦产量 (图 1) 可以看出, 翻压绿肥后, 不同化肥减施量处理小麦产量随着试验年限增加整体表现为波动下降的趋势。不施肥处理 (CK) 在 2~3 年内产量快速下降, 然后基本稳定在最低水平。除不施肥处理, 翻压绿肥后不施用化肥处理 (T_{-100}) 产量快速下降, 其余处理多年来变化趋势较为一致。且从图 1 可以明显看出, 产量年际变化较大, 因此选择 3 年滑动平均的方法进行比较, 可以更好的研究产量的变化规律^[26]。

多年平均产量以及累积增产率结果 (表 2) 显示, T_{-0} 、 T_{-10} 、 T_{-20} 、 T_{-30} 处理的小麦 12 年平均产量均高于 CK 处理, 提高幅度分别为 6.28%、6.65%、6.51%、8.13%。而 T_{-40} 的平均产量为 6683 kg/hm², 仍高于 CK 处理 5.93%。从 3 年的滑动平均产量来看, 在 2009—2011 及 2012—2014 年小麦的平均产

量以及累积增产率 T_{-40} 处理高于 CK 处理, 但从第 2015—2017 年开始, 两处理产量已基本持平, 2018 年后 T_{-40} 处理产量要低于 CK 处理。

2.2 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦产量稳定性及可持续性的影响

小麦产量的变异系数 (CV) 和可持续性指数 (SYI) 结果 (表 3) 显示, CK 处理以及翻压绿肥后化肥减量 100% 处理 (T_{-100}) 的变异系数较高, 分别为 25.00% 和 24.72%; T_{-0} 、 T_{-10} 处理的产量变异系数均小于 CK 处理。选择翻压绿肥的 6 个处理进行回归, 化肥减施量与变异系数的回归方程为: $y=0.1191x+12.37$ ($R^2=0.962$), 说明变异系数随着化肥减施量的提高不断增大, 当化肥减施量为 20.23% 时, 产量变异系数和 CK 处理的持平。SYI 与 CV 相反, 其与化肥减施量比例之间的回归方程为: $y=-0.0026x+0.7174$ ($R^2=0.899$), 两者呈负相关关系。根据方程计算可得, 化肥减量 34.38% 时的 SYI 与 CK 处理持平。

2.3 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦产量趋势的影响

高产稳产是农业生产追求的目标, 产量变化趋势是用产量随着时间 (年) 做成散点图, 依据散点图拟合的简单的直线作为其趋势线 (一元一次方程), 并依据其斜率 (年际变化值) 大小来评定产量随着时间的变化情况^[23]。但产量的诸多不可控因子的影响导致产量的年际变化出现较大的波动, 因此将年际作物产量看成灰色量, 应用灰色系统理论的一次累加

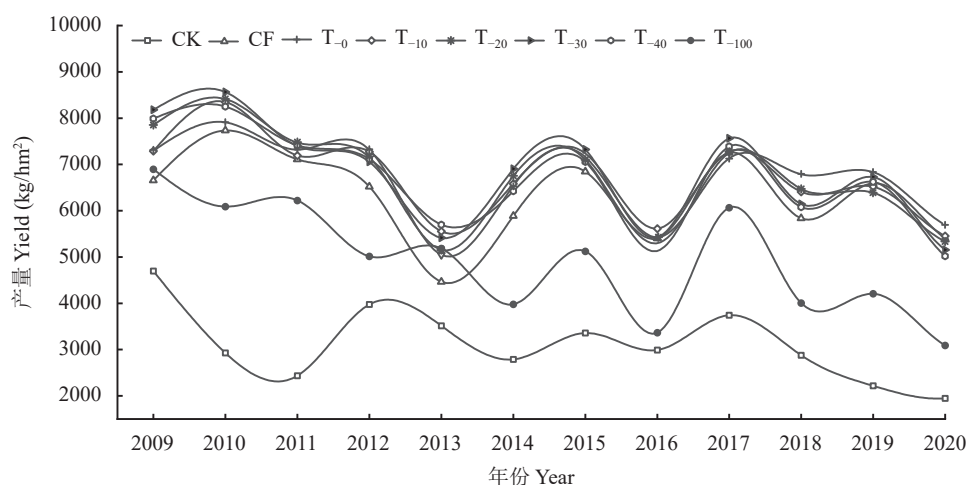


图 1 2009—2020 年不同处理小麦产量年际变化

Fig. 1 Dynamics of annual wheat yield in different treatments from 2009 to 2020

注: CK 为不施肥对照; CF 为 100% 化肥; T_{-0} 、 T_{-10} 、 T_{-20} 、 T_{-30} 、 T_{-40} 、 T_{-100} 代表翻压绿肥后化肥分别减量 0%、10%、20%、30%、40%、100%。

Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T_{-0} , T_{-10} , T_{-20} , T_{-30} , T_{-40} , T_{-100} are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure.

表 2 不同处理 3 年期的平均产量及累积增产率

Table 2 Average yield of 3-year-period and cumulative yield increase under different treatments from 2009 to 2020

指标 Index	处理 Treatment	2009—2011	2012—2014	2015—2017	2018—2020	2009—2020
产量 Yield (kg/hm ²)	CK	3353±1190 c	3426±599.3 b	3363±374.6 b	2347±477.8 c	3122±517.9 c
	CF	7168±541.8 ab	5624±1054 a	6501±972.2 a	5942±605.1 a	6309±677.7 a
	T ₋₀	7509±347.5 ab	6299±1154 a	6573±994.3 a	6437±647.9 a	6705±547.9 a
	T ₋₁₀	7608±641.3 a	6469±865.5 a	6709±949.5 a	6126±585.1 a	6728±633.3 a
	T ₋₂₀	7912±474.1 a	6352±1056 a	6550±1087 a	6064±634.9 a	6719±819.3 a
	T ₋₃₀	8046±598.2 a	6459±907.1 a	6771±1170 a	6009±796.2 a	6821±874.5 a
	T ₋₄₀	7884±427.4 a	6413±710.5 a	6527±1219 a	5906±816.6 a	6683±845.4 a
	T ₋₁₀₀	6402±432.9 b	4725±652.3 ab	4853±1370 ab	3768±595.9 b	4937±1090 b
相比于CF的累积增产率 Cumulative yield increase rate over CF (%)	CK	-53.23	-39.08	-48.26	-60.50	-50.51
	T ₋₀	4.76	12.00	1.12	8.33	6.28
	T ₋₁₀	6.14	15.03	3.21	3.09	6.65
	T ₋₂₀	10.38	12.94	0.76	2.05	6.51
	T ₋₃₀	12.26	14.84	4.16	1.13	8.13
	T ₋₄₀	10.00	14.02	0.40	-0.60	5.93
	T ₋₁₀₀	-10.68	-15.98	-25.35	-36.59	-21.74

注: CK为不施肥对照; CF为100%化肥; T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀、T₋₁₀₀代表翻压绿肥后化肥分别减量0%、10%、20%、30%、40%、100%。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₋₀, T₋₁₀, T₋₂₀, T₋₃₀, T₋₄₀, T₋₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure. Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 3 不同处理小麦产量变异系数 (CV) 和
可持续性指数 (SYI)

Table 3 Coefficient of variation (CV) and sustainable
index (SYI) of wheat yield under different treatments

处理 Treatment	变异系数 CV (%)	产量可持续性指数 SYI
CK	25.00	0.273
CF	14.78	0.628
T ₋₀	13.05	0.681
T ₋₁₀	13.00	0.683
T ₋₂₀	15.48	0.663
T ₋₃₀	16.09	0.668
T ₋₄₀	15.70	0.658
T ₋₁₀₀	24.72	0.434

注: CK为不施肥对照; CF为100%化肥; T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀、T₋₁₀₀代表翻压绿肥后化肥分别减量0%、10%、20%、30%、40%、100%。

Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₋₀, T₋₁₀, T₋₂₀, T₋₃₀, T₋₄₀, T₋₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure.

生成理论建立一元灰色线性趋势线^[24-25], 表明产量与试验年限存在的典型的关系, 应用式 (3) 模型对种植年限与产量进行一元线性回归分析。回归分析结果 (表 4) 表明, 小麦累加产量的回归模型 F 值均达到极显著的水平。且其拟合度 R^2 均在 0.995 以上, 表明拟合效果极佳。一元回归模型中, b 表示年际趋势产量, 从表 4 可以看出其大小为 T₋₃₀ (6644.51 kg/hm²)>T₋₁₀ (6619.57 kg/hm²)>T₋₀ (6572.26 kg/hm²)>T₋₂₀ (6540.24 kg/hm²)>T₋₄₀ (6504.47 kg/hm²)>CF (6184.30 kg/hm²)>T₋₁₀₀ (4736.55 kg/hm²)>CK (3101.18 kg/hm²), 而从 b 值 95% 置信区间我们可以看到, T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀ 处理均与 CF 处理不重叠, 说明以上处理其趋势产量均显著高于 CF 处理, 而 T₋₁₀₀ 以及 CK 处理的趋势产量显著低于 CF 处理。

2.4 翻压绿肥后不同化肥减施量与小麦产量回归分析

翻压绿肥后小麦 12 年平均产量随着化肥减施量的增加而改变。选择翻压绿肥后不同化肥减施量的 T₋₀~T₋₁₀₀ 处理, 以不同处理化肥减施比例为横坐

表 4 2009—2020 年不同处理小麦产量趋势灰色线性模型

Table 4 Linear grey model of wheat yield trends as affected by different treatments from 2009 to 2020

处理 Treatment	$y=a+bt$	F 值 F -value	R^2	b 的95%置信区间 95% confidence interval of b
CK	$y=1624.49+3101.18t$	3164.70**	0.997	3046.05~3156.31
CF	$y=1876.12+6184.30t$	8339.83**	0.999	6116.58~6252.02
T ₋₀	$y=2120.21+6572.26t$	10991.98**	0.999	6509.57~6634.95
T ₋₁₀	$y=2423.34+6619.57t$	9173.61**	0.999	6550.46~6688.68
T ₋₂₀	$y=3315.46+6540.24t$	6780.90**	0.999	6460.81~6619.66
T ₋₃₀	$y=3465.46+6644.51t$	7301.78**	0.999	6566.75~6722.27
T ₋₄₀	$y=3506.76+6504.47t$	6333.11**	0.998	6422.74~6586.21
T ₋₁₀₀	$y=4358.45+4736.55t$	2137.46**	0.995	4634.10~4839.00

注：CK为不施肥对照；CF为100%化肥；T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀、T₋₁₀₀代表翻压绿肥后化肥分别减量0%、10%、20%、30%、40%、100%。 y 是一次累加生成的作物产量， t 为对应试验的时间。**— $P<0.01$ 。
Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₋₀, T₋₁₀, T₋₂₀, T₋₃₀, T₋₄₀, T₋₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure. y is accumulated generating operation of crop yield, t is the corresponding time of the experiment. **— $P<0.01$.

标，以 12 年平均产量为纵坐标可以得到 (0, 6704.64)、(10, 6727.93)、(20, 6719.36)、(30, 6821.39)、(40, 6682.55)、(100, 4936.92) 6 个坐标点，构建回归方程，分析结果表明：两者之间回归方程达到统计学极显著水平 ($P<0.01$)，两者的回归方程为： $y=-0.292x^2+11.917x+6667.34$ (4672.21~6998.32)，描述产量变异方差解释能力的拟合度 R^2 达 0.996。根据二次方程的特性，我们可以求出翻压绿肥后化肥减施量为 20.41% 情况下，产量达到多年平均产量的理论最高值。

2.5 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦农艺性状的影响

2020 年不同处理下小麦农艺性状的统计结果 (表 5) 表明，不同施肥处理主要通过影响小麦的株高、穗长、结实小穗数以及穗粒数，进而影响作物产量。本研究还发现，翻压绿肥后在化肥减量低于 30% 的情况下，各指标基本保持稳定，当化肥减量 40%，小麦株高、穗长以及结实小穗数均有下降趋势，但差异未达到显著水平。当翻压绿肥后化肥减量 100%，无论是株高、穗长还是结实小穗数均显著

表 5 2020 年不同处理小麦农艺性状

Table 5 Agronomic properties of wheat under different treatments in 2020

处理 Treatment	株高 (cm) Plant height	穗长 (cm) Spike length	结实小穗数 Fertile spikelet number	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight
CK	50.15±3.11 c	5.81±0.48 c	8.28±1.01 c	9.12±1.94 c	55.90±5.22 a
CF	66.17±1.36 a	8.64±0.32 ab	13.55±1.15 ab	28.95±1.62 a	52.04±2.76 a
T ₋₀	69.82±0.55 a	9.13±0.07 a	15.53±0.03 a	28.73±1.53 a	51.68±2.64 a
T ₋₁₀	69.37±1.23 a	9.16±0.23 a	15.30±0.58 a	29.87±3.32 a	51.91±0.59 a
T ₋₂₀	68.90±0.43 a	9.02±0.39 a	15.78±0.71 a	31.55±3.61 a	52.99±2.16 a
T ₋₃₀	68.30±0.74 a	8.60±0.09 ab	14.27±0.39 ab	27.45±0.38 a	57.74±0.49 a
T ₋₄₀	66.22±1.81 a	8.99±0.15 a	13.92±0.94 ab	28.47±0.96 a	54.89±2.00 a
T ₋₁₀₀	60.17±1.86 b	7.83±0.51 b	12.30±1.22 b	18.93±1.28 b	53.33±1.20 a

注：CK为不施肥对照；CF为100%化肥；T₋₀、T₋₁₀、T₋₂₀、T₋₃₀、T₋₄₀、T₋₁₀₀代表翻压绿肥后化肥分别减量0%、10%、20%、30%、40%、100%。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₋₀, T₋₁₀, T₋₂₀, T₋₃₀, T₋₄₀, T₋₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure. Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 6 不同指标间的相关系数
Table 6 Correlation coefficients among different indexes

指标 Index	株高 Plant height	穗长 Spike length	结实小穗数 Fertile spikelet number	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield
株高 Plant height	1					
穗长 Spike length	0.950**	1				
结实小穗数 Fertile spikelet number	0.945**	0.942**	1			
穗粒数 Grain number per spike	0.919**	0.921**	0.874**	1		
千粒重 1000-grain weight	-0.037	-0.091	-0.059	-0.061	1	
产量 Yield	0.898**	0.828**	0.809**	0.885**	-0.166	1

Note: **— $P<0.01$.

降低。各项指标相关性分析结果 (表 6) 也表明, 小麦产量与株高、穗长、结实小穗数以及穗粒数表现为极显著的正相关关系, 小麦株高、穗长、结实小穗数以及穗粒数之间也存在极显著的正相关关系。

2.6 翻压绿肥后不同化肥减施量对累积土壤地力贡献率及累积肥料贡献率的影响

土壤地力贡献率是土壤肥力的重要指示指标, 值越高说明土壤养分供应能力越强。累积土壤地力贡献率变化曲线 (图 2) 显示, 累积土壤地力贡献率前期波动幅度较大, 整体表现为波动下降的趋势, 由 2009 年的 57.41% 下降至 2020 年的 34.24%。肥料贡献率则反映施肥在作物增产中作用的大小。不同处理累积肥料贡献率变化曲线 (图 3) 显示, 随着试验年限的增加, 累积肥料贡献率整体表现为波动上升的趋势, 至 2020 年达 60% 左右。且翻压绿肥后化肥减量 40% 以内, 累积肥料贡献率与 CF 处理基本持平。T₋₁₀₀ 处理累积肥料贡献率自 2014 年起明显低于其他处理, 至 2020 年仅为 36.95%。

2.7 翻压绿肥后不同化肥减施量对土壤养分含量的影响

对 2020 年对不同处理土壤养分含量 (表 7) 进行测定, 结果表明, 相较于未翻压绿肥处理, 长期翻压绿肥可以显著提高土壤中的有机质含量以及土壤速效氮含量, 且翻压绿肥后土壤有机质含量基本不受化肥减施量的影响, 仅翻压绿肥处理土壤有机质含量与翻压绿肥后化肥不减量土壤有机质含量基本持平, 这也为翻压绿肥后土壤地力贡献率相对较高提供了佐证。但土壤速效磷含量则随着化肥减施量的提高整体呈现下降的趋势, 以不施肥处理以及仅施用绿肥处理含量最低; 土壤速效钾含量除不施肥处理显著降低外, 其他处理之间均无显著差异。

3 讨论

3.1 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦产量及其农艺性状的影响

绿肥作为一种优质、清洁同时成本又相对较为

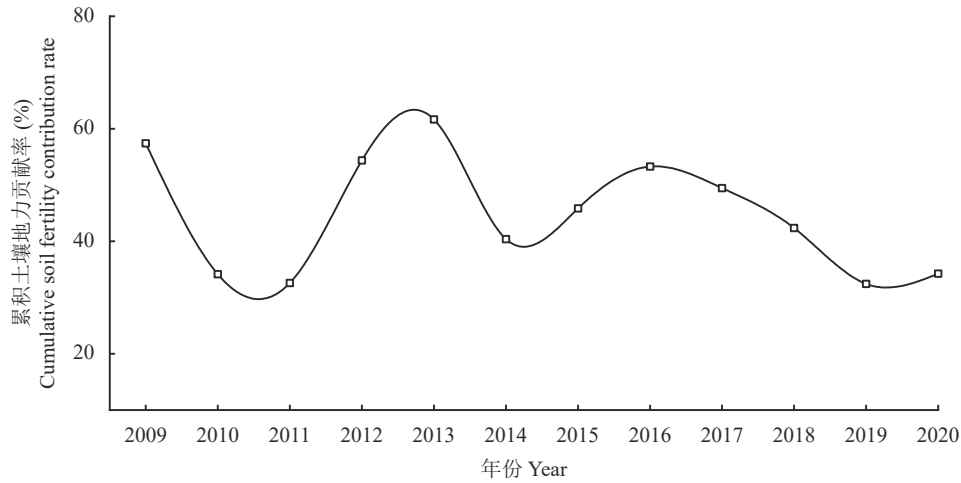


图 2 2009—2020 年累积土壤地力贡献率变化
Fig. 2 Cumulative soil fertility contribution rate in different treatments from 2009 to 2020

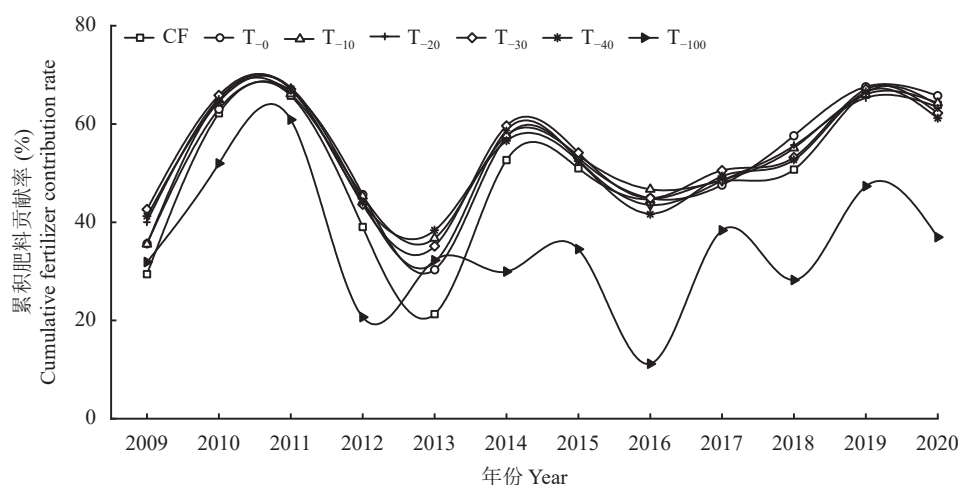


图 3 2009—2020 年不同处理累积肥料贡献率

Fig. 3 Cumulative fertilizer contribution rate in different treatments from 2009 to 2020

注：CK 为不施肥对照；CF 为 100% 化肥；T₀、T₁₀、T₂₀、T₃₀、T₄₀、T₁₀₀ 代表翻压绿肥后化肥分别减量 0%、10%、20%、30%、40%、100%。

Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₀, T₁₀, T₂₀, T₃₀, T₄₀, T₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure.

表 7 2020 年不同处理土壤养分含量

Table 7 Soil nutrient contents in different treatments in 2020

处理 Treatment	有机质 (g/kg) Organic matter	速效氮 (mg/kg) Available N	速效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
CK	21.90±0.17 b	86.87±5.44 c	7.10±2.86 e	134.3±5.77 b
CF	23.00±0.61 b	93.40±2.75 c	38.13±5.24 ab	169.3±14.43 a
T ₀	27.63±2.07 a	120.2±11.48 ab	37.17±3.07 ab	173.3±17.79 a
T ₁₀	29.73±2.32 a	126.2±5.44 a	42.53±3.76 a	162.7±15.28 a
T ₂₀	30.07±3.22 a	122.0±3.75 ab	33.30±9.29 bc	157.7±2.89 a
T ₃₀	28.30±1.74 a	110.7±6.18 b	28.13±3.91 c	159.3±7.64 a
T ₄₀	28.27±0.46 a	114.0±5.50 b	19.43±3.36 d	156.0±5.00 a
T ₁₀₀	28.27±1.08 a	121.4±6.18 ab	6.53±0.64 e	156.0±8.66 a

注：CK 为不施肥对照；CF 为 100% 化肥；T₀、T₁₀、T₂₀、T₃₀、T₄₀、T₁₀₀ 代表翻压绿肥后化肥分别减量 0%、10%、20%、30%、40%、100%。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK is no fertilizer control; CF is 100% chemical fertilizer; T₀, T₁₀, T₂₀, T₃₀, T₄₀, T₁₀₀ are reducing the chemical fertilizer rate by 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 100% respectively at the base of applying green manure. Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

低廉的有机肥源，相较于化肥提供的养分更为全面，同时又能够改土培肥。相较于牛羊粪等有机肥源没有重金属以及抗生素等二次污染的风险。豆科绿肥又以其独特的根瘤固氮作用，碳氮比较低，施入土壤后养分释放速度快等特点使其成为减肥试验中经常选用的一种绿肥。刘思超等^[27]通过两年的田间试验发现，与习惯施肥相比，翻压紫云英后化肥氮减量 28.98% ~ 39.68% 仍能提高水稻产量。张璐等^[18]的研究发现，翻压绿肥紫云英后化肥减量 20% 水稻

产量还有提高的趋势，化肥减量 40% 水稻依然可以基本维持产量^[28]。这与本研究结果相似，翻压绿肥后化肥减量 40%，前期产量高于仅施用化肥处理。但随着试验年限的增加，该处理产量与仅施用化肥处理逐渐持平，最终低于仅施用化肥处理。这可能与前期土壤养分含量较高，可保证当年作物需求，而绿肥翻埋入土后改善土壤理化性状，提高了有机质含量，进而提高了产量；而定位 7 年后产量与单施化肥基本持平，至第 9 年产量低于单施化肥，这可

能与土壤中磷元素的消耗有关,从 2020 年土壤养分含量可以看出,土壤速效磷含量随着化肥减施比例的提高不断下降,当化肥减施量超过一定限度时会导致磷的消耗量大于投入量,土壤中的磷素就会被不断消耗,导致试验后期产量随着年限的增加表现为下降的趋势。这也进一步体现了化肥减施试验长期定位的必要性。但在本试验条件下,翻压绿肥后化肥减量在 30% 以内处理的产量相较于单施化肥处理一直处于优势地位。而从 12 年小麦整体的趋势可以发现,小麦产量随着试验年限增加整体表现为波动下降的趋势,这可能是由于试验长期单一种植小麦,导致作物产生连作障碍,小麦生长期病虫害随连作年限的增加逐渐严重,最终导致产量下降。本研究还发现,小麦的产量与株高、穗长、结实小穗数、穗粒数呈显著正相关,说明本研究中不同的处理主要是通过提高株高以及穗长,进而提高小麦穗粒数,最终提高产量,这与王璐等^[29]的研究结果基本一致。

3.2 翻压绿肥后不同化肥减施量对小麦产量稳定性和可持续性的影响

产量的稳定性以及可持续性指数(SYI)是农田生态系统质量以及不同养分管理系统可持续性的重要评价标准^[30-31],而产量可持续性指数则是不同养分管理系统可持续性的重要评价指标。与前人研究结果一致,不同处理中长期不施肥变异系数(CV)最大,产量可持续性指数最低,这可能与施肥可以提高小麦的抗逆性,降低外界环境、人为等因素对产量的影响有关^[32]。且大量研究证明施用化肥后翻压绿肥效果更佳,张帆^[33]发现施用绿肥黑麦草促进早、晚稻产量的稳定性与可持续性提高。且由于绿肥作为一种优质的有机肥源,本身就含有大量植物生长所需养分,翻压绿肥后适量减施化肥依然可以提高作物产量。张璐等^[18]为期 9 年的定位试验发现,翻压绿肥后化肥减量 20%~40% 不仅可以提高作物产量,且产量变异系数降低,可持续指数升高,这与本研究结果一致。本研究还发现,翻压绿肥后随着化肥减少量的提升产量可持续性指数表现为先升高后降低的趋势,翻压绿肥后化肥减量 20% 效果最佳,减施量高于该比例变异系数开始增大,产量可持续性指数降低。

3.3 翻压绿肥后不同化肥减施量对累积地力贡献率以及累积肥料贡献率的影响

土壤地力贡献率是反映土壤肥力的重要指标,

随着种植年限的变化反映了不同时间土壤养分的供应情况,地力贡献率越低,种植作物对施肥的依赖作用越强^[21]。陈欢等^[21]的研究结果显示,随着试验年限的增加,土壤的养分的供应能力不断下降,相应的累积地力贡献率不断降低,这与本研究结果一致。这是由于土壤养分在作物种植过程中不断被带走,长期处于消耗状态^[34]。本研究中定位 12 年后,累积土壤地力贡献率下降至 30% 左右,而陈欢等^[21]通过 30 多年的定位试验发现,累积地力贡献率最终降至 10% 后趋于稳定,这可能与试验年限不同,土壤类型及降水、农事等因素不同有关。但相关研究均表明,土壤基础地力贡献率下降到一定程度后会维持在较稳定的水平,该水平与灌水等农事因素的养分携入有关^[34]。肥料贡献率则反映施肥对小麦增产作用的大小^[30]。按照养分来源可将作物产量分为基础地力产量和施肥产量^[34]。本研究中随着种植年限的增长,基础地力不断下降,基础地力产量相应降低,施肥在增产中的作用不断增强,最终导致累积肥料贡献率随着种植年限的增加不断提高。但基于累积土壤基础贡献率会在下降到一定程度后维持稳定,相应的累积肥料贡献率最终也会稳定在某一水平,该水平与累积土壤地力贡献率高度相关。

4 结论

随着小麦种植年限的增加,土壤地力对小麦产量的累积贡献率不断下降,而连续翻压绿肥 30000 kg/hm² 可有效提高土壤地力贡献率。在翻压绿肥基础上,将农民习惯化肥用量减少 20%~30%,可以提高小麦的产量,维持高产趋势,是甘肃农业可持续发展的有效措施。

参 考 文 献:

- [1] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学,2010,43(19):3997-4007.
Wang W N, Lu J W, Li Y S, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997-4007.
- [2] 付浩然,李婷玉,曹寒冰,等.我国化肥减量增效的驱动因素探究[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):561-580.
Fu H R, Li T Y, Cao H B, et al. Research on the driving factors of fertilizer reduction in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 561-580.
- [3] 麻坤,刁钢.化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):1113-1120.
Ma K, Diao G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018,

- 24(4): 1113–1120.
- [4] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 304–312.
Wei M, Zhang A J, Zhuge Y P, *et al.* Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(2): 304–312.
 - [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008–1010.
 - [6] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615–1621.
Zhou X Y, Xu M G, Zhou S W, *et al.* Soil acidification characteristics in southern China's croplands under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1615–1621.
 - [7] 卢秉林, 包兴国, 车宗贤, 等. 长期留茬免耕对河西绿洲灌区春小麦产量及稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 117–126.
Lu B L, Bao X G, Che Z X, *et al.* Effects of long-term no-tillage with crop stubbles on yield and stability of spring wheat in Hexi Oasis Irrigated Areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(7): 117–126.
 - [8] 陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 282–289.
Chen J R, Qin W J, Wang S X, *et al.* Effect of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch incorporation on rice yield and nitrogen use efficiency in double-rice cropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 282–289.
 - [9] 谢志坚, 周春火, 贺亚琴, 等. 21世纪我国稻区种植紫云英的研究现状及展望[J]. 草业学报, 2018, 27(8): 185–196.
Xie Z J, Zhou C H, He Y Q, *et al.* A review of *Astragalus sinicus* in paddy fields in south China since 2000s[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(8): 185–196.
 - [10] 刘佳, 张杰, 秦文婧, 等. 红壤旱地毛叶苕子不同翻压量下腐解及养分释放特征[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 66–76.
Liu J, Zhang J, Qin W J, *et al.* Decomposition and nutrient release characteristics of different *Vicia villosa* green manure applications in red soil uplands of south China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 66–76.
 - [11] 倡国涵, 赵书军, 王瑞, 等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 905–912.
Si G H, Zhao S J, Wang R, *et al.* Effects of consecutive overturning of green manure on soil physical and biological characteristics in tobacco-planting fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 905–912.
 - [12] 万水霞, 朱宏斌, 唐彬, 等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 387–395.
Wang S X, Zhu H B, Tang S, *et al.* Effects of *Astragalus sinicus* manure and fertilizer combined application on biological properties of soil in Anhui double cropping rice areas along the Yangtze River [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(2): 387–395.
 - [13] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657–669.
Liu C Z, Chang D N, Li B Y, *et al.* Effects of planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on active organic carbon and nitrogen in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 657–669.
 - [14] 刘苡轩, 黄冬琳, 刘娜, 等. 渭北旱塬豆科绿肥提高冬小麦籽粒锌的效应与影响因素研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4030–4039.
Liu Y X, Huang D L, Liu N, *et al.* The increasing effect and influencing factors of leguminous green manure on wheat grain Zn in Weibei highland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(21): 4030–4039.
 - [15] 高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 472–480.
Gao J S, Huang J, Yang Z C, *et al.* Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 472–480.
 - [16] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 190–196.
Liao Y L, Lu Y H, Xie J, *et al.* Effects of combined application of controlled release nitrogen fertilizer and Chinese milk vetch on yield and nitrogen nutrient uptake of early rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 190–196.
 - [17] 杨璐, 曹卫东, 白金顺, 等. 种植翻压二月兰配施化肥对春玉米养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 799–807.
Yang L, Cao W D, Bai J S, *et al.* Effect of combined application of February Orchid (*Orychophragmus violaceus* L.) and chemical fertilizer on nutrient uptake and utilization of spring maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(4): 799–807.
 - [18] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 106–112.
Zhang L, Huang J, Gao J S, *et al.* Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 106–112.
 - [19] 柳开楼, 韩天富, 黄庆海, 等. 鄱阳湖流域长期施肥下双季稻田的土壤基础地力[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 209–216.
Liu K L, Han T F, Huang Q H, *et al.* Basic soil productivity in the double rice cropping system under long-term fertilization regimes in the Poyang Lake region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 209–216.
 - [20] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥下作物产量演变特征的研究进展[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2387–2392.
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, *et al.* Summarize of crop yield dynamic under long-term fertilization[J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 2012, 25(6): 2387–2392.
 - [21] 陈欢, 曹富富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(13): 2580–2590.
Chen H, Cao C F, Kong L C, *et al.* Study on wheat yield stability in Huaibei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(13): 2580–2590.
 - [22] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, *et al.* Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2): 264–280.
 - [23] 王婷, 丁宁平, 李利利, 等. 化肥与有机肥或秸秆配施提高陇东旱塬

- 黑垆土上作物产量的稳定性和可持续性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1817–1826.
- Wang T, Ding N P, Li L L, *et al.* Combining chemical fertilizer with organic manure or straw increase the yield stability and sustainability of maize and wheat in Loess Plateau of east Gansu Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1817–1826.
- [24] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用(第七版)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Liu S F, Yang Y J, Wu L F, *et al.* Grey system theory and its application (7th edition)[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [25] 李娟, 张立成, 章明清, 等. 长期不同施肥模式下赤红壤旱地花生—甘薯轮作体系产量稳定性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 179–190.
- Li J, Zhang L C, Zhang M Q, *et al.* Yield stability in peanut–sweet potato rotation system under long-term combined application of chemical and organic fertilizers in latosolic red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 179–190.
- [26] Chauhan S K, Chauhan C, Minhas P S. Effect of cyclic use and blending of alkali and good quality waters on soil properties, yield and quality of potato, sunflower and *Sesbania*[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1): 81–89.
- [27] 刘思超, 唐利忠, 李超, 等. 不同混作方式绿肥替代部分基施化学氮肥对双季稻产量形成特性的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(5): 218–225.
- Liu S C, Tang L Z, Li C, *et al.* Impact of substitution of green manure under different mixed cropping modes to chemical N fertilizer on yield formation characters of double cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(5): 218–225.
- [28] 王飞, 林诚, 林新坚, 等. 连续翻压紫云英对福建单季稻产量与化肥氮素吸收、分配及残留的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 896–904.
- Wang F, Lin C, Lin X J, *et al.* Effects of continuous turnover of *Astragalus sinicus* on rice yield and N absorption, distribution and residue in single-cropping rice regions of Fujian Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 896–904.
- [29] 王璐, 吴建富, 潘晓华, 等. 紫云英和稻草还田免耕抛栽对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(20): 299–303.
- Wang L, Wu J F, Pan X H, *et al.* Effects of no-tillage and cast-transplanting with milk vetch and straw incorporation on rice yield and soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(20): 299–303.
- [30] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 597–606.
- Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, *et al.* Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 597–606.
- [31] 门明新, 李新旺, 许峰. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2339–2346.
- Men M X, Li X W, Xu H. Effects of long-term fertilization on crop yields and stability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2339–2346.
- [32] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期不同施肥模式对我国玉米产量可持续性的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(6): 82–87.
- Li Z F, Xu M G, Zhang H M, *et al.* Effect of different long-term fertilization on sustainability of maize yield in China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(6): 82–87.
- [33] 张帆. 冬季作物–双季稻轮作种植模式氮、磷、钾养分循环与产量可持续性特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(5): 705–716.
- Zhang F. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and sustainability of rice yield in a winter crop-double cropping rice rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5): 705–716.
- [34] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2043–2052.
- Yang S M, Li F M, Suo D R, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2043–2052.