粮菇轮作模式对土壤养分及小麦生长特性的影响

宋 晓[1] 张珂珂[2] 关涵文[1] 李青欣[1] 孔维丽[2] 刘 芹[2] 张玉亭[2] 郑靖康[2]

（[1]河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所，450002，河南郑州；
[2]河南省农业科学院食用菌研究所/农业农村部黄淮海地区食用菌种质资源鉴定和利用重点实验室，450002，河南郑州）

摘 要 为明确不同粮菇轮作模式对土壤养分、小麦生理指标、生长动态及产量的影响，于2021-2024年设置4种种植模式，分别为T1处理：小麦—玉米复种（小麦—玉米—小麦—玉米—小麦）；T2处理：1年菇轮作（小麦—玉米—大球盖菇—玉米—小麦）；T3处理：隔年菇轮作（大球盖菇—玉米—小麦—玉米—小麦）；T4处理：连续2年菇轮作（大球盖菇—玉米—大球盖菇—玉米—小麦）。结果表明，粮菇轮作模式对土壤养分及作物生长表现出显著影响。粮菇轮作显著改善0~20 cm耕层土壤养分，与T1相比，T2、T3和T4处理的土壤全氮、速效磷、速效钾和有机质含量分别提高5.26%~11.65%、48.98%~74.61%、23.41%~48.21%和13.13%~23.99%，在20~40 cm土层养分优势仍明显。粮菇轮作显著增强了小麦的光合能力，净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度及蒸腾速率均以T4处理最高，分别为28.52 μmol/(m^2·s)、1.27 mmol/(m^2·s)、318.47 μmol/(m^2·s)和4.68 mmol/(m^2·s)。T4处理下小麦根系活力、根长、根表面积和根体积分别比T1处理提高37.98%、32.46%、58.87%和34.50%。粮菇轮作显著增加小麦群体数量与穗数，收获指数提高0.03~0.07，千粒重降低1.03~8.68 g。与T1处理相比，T4、T2和T3处理小麦产量分别提高68.38%、31.83%和29.39%。因此，粮菇轮作在土壤改良与增产方面具有潜力，其通过提升土壤肥力、增强根系能力及小麦冠层光合能力，促进光温水肥资源的高效利用及转化，最终达到调节小麦群体与提高产量的目的。

关键词 轮作模式；小麦；土壤养分；光合作用；根系

全球农业正面临土壤退化、资源约束与粮食安全等多重压力[1]。长期单一化种植导致土壤养分失衡、有机质含量下降，加剧了农业生产对化肥的依赖，进而引发粮食生产与生态安全的风险[2]。河南省作为我国粮食主产区，长期以小麦－玉米轮作为主要种植模式，然而这也伴随着因大量使用农药和化肥引发的环境问题，以及传统农业开发方式导致的资源过度消耗和生态压力增大等挑战[3]。为促进农业的绿色循环和可持续发展，需要探寻更为合理的栽培措施和田间管理方法。因此，构建实现土壤改良与作物产量提升协同的可持续轮作模式，已经成为农业可持续发展研究的重要方向。

“茬口效应”作为一种重要的农业实践策略，指的是前茬作物及其茬地对后茬作物产生的多种影响。通过合理的茬口搭配，可以改善土壤微生态环境和养分条件，增加农田生态系统中的生物多样性，从而协调作物与土壤的关系，促进作物的高产稳产[4-5]。在北方旱作两熟区，传统的“夏玉米－冬小麦”种植模式对土壤氮素养分消耗大，易导致土壤养分失衡和有机质减少，影响旱作农田的高效和绿色可持续发展[6]。近年来，粮菇轮作因其独特的生态效益受到广泛关注，菇渣还田不仅可替代部分化肥，其富含的纤维素、木质素及微量元素还能改善土壤结构，为作物生长创造更优的根际环境[7-8]。研究[9]表明，菇渣还田可显著提升土壤氮、磷、钾有效性，但关于其长期轮作效应、对作物生理功能的系统性影响及深层土壤养分动态变化，仍缺乏系统研究。当前，研究[10]发现不同地区的轮作模式不同，轮作对土壤环境及作物生理具有重要影响。大球盖菇－水稻轮作可改善土壤结构和肥力[11]。大球盖菇菇渣还田可提高土壤养分含量和土壤微生物群落多样性[12]。刘高远等[13]发现，大球盖菇－玉米轮作能促进秸秆降解并提高土壤肥力。但对不同轮作年限（如连续2年菇轮作和隔年菇轮作）的差异化影响机

作者简介：宋晓，主要从事作物栽培和土壤肥料研究，E-mail：songxiao401@126.com
孔维丽为通信作者，主要从事食用菌育种研究，E-mail：kongweili2005@126.com
基金项目：国家重点研发计划（2023YFE0105003）；河南农科院基础科研项目（2025ZC90）；河南省国际合作重点项目（251111520600）；河南省自然科学基金项目（242300420174）
收稿日期：2025-06-19；修回日期：2025-07-14；网络出版日期：2026-02-03

制尚未明晰[14-15]。此外，传统研究多聚焦于土壤养分或产量等单一角度，而忽视了对土壤、根系及冠层的系统性分析，难以全面解析其增产的生物学基础[16]。因此，本研究通过分析不同粮菇复种模式与常规小麦－玉米轮作的长期效应，系统评估其对土壤耕层养分、小麦根系发育、冠层光合生理特性及群体产量的影响，为突破传统种植模式瓶颈及构建资源高效型农业体系提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于河南省商丘市虞城县闻集乡金隆菇业基地进行，该地属东部暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候，年均气温 14 ℃，年日照率 53%，年均无霜期 216 d。供试土壤为中壤质潮土，基础理化性质为有机质 14.53 g/kg、全氮 0.85 g/kg、碱解氮 78.30 mg/kg、速效磷 13.30 mg/kg、速效钾 79.87 mg/kg、pH 7.83。

1.2　试验设计

试验于 2021−2024 年进行，共设置 4 种轮作模式，分别为小麦－玉米复种（T1）、1 年菇轮作（T2）、隔年菇轮作（T3）和连续 2 年菇轮作模式（T4）（图 1）。每种轮作模式重复 3 次，共 12 个试验小区，小区面积 140 m²（7 m×20 m），随机区组排列。供试小麦品种为百农 307，玉米为郑单 958，大球盖菇（*Stropharia rugosoannulata*）为兴农 1 号。供试化肥分别为尿素（含 N 46%）、过磷酸钙（含 P_2O_5 12%）和硫酸钾（含 K_2O 52%），小麦和玉米施肥同小麦－玉米复种，大球

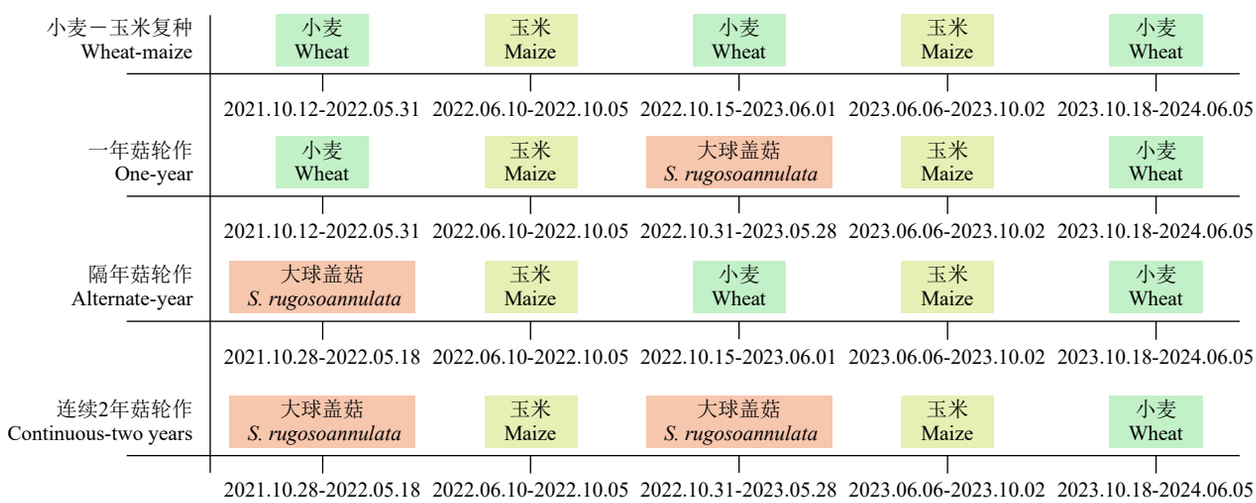


图 1　不同轮作模式的种植时间分布

Fig.1　Distribution of planting time in different rotation patterns

盖菇不施肥。田间管理措施同当地高标准良田。

T1 处理（小麦－玉米－小麦－玉米－小麦）管理措施：小麦季的氮、磷和钾肥用量分别为 225、90 和 150 kg/hm²，其中磷肥和钾肥作为基施一次性施入，氮肥 60%基施，其余于起身期追施；播种时间分别为 2021 年 10 月 12 日、2022 年 10 月 15 日和 2023 年 10 月 18 日；收获时间分别为 2022 年 5 月 31 日、2023 年 6 月 1 日和 2024 年 6 月 5 日；玉米季的氮、磷和钾肥用量分别为 225、90 和 150 kg/hm²，种肥同播。播种时间分别为 2022 年 6 月 10 日和 2023 年 6 月 6 日；收获日期分别为 2022 年 10 月 5 日和 2023 年 10 月 2 日。

T2 处理（小麦－玉米－大球盖菇－玉米－小麦）所用大球盖菇菌种由河南省食用菌种质资源库提供，编号 YDS-1。培养料配方为玉米秸秆 58%、玉米芯 25%及其他辅料。大球盖菇栽培参考许彬等[17]、马瑜等[18]和刘高远等[13]的报道，并结合当地露地栽培的简便性与可行性原则调整。首先，用搅拌机将培养料混匀，并在搅拌过程中补水，使含水量维持在 65%以上；其次，将混匀培养料运至田间作畦，畦宽 60 cm，畦距 80 cm，畦高因用量而异；之后采用人工接种，接种方式为上下层点播，深度 5 cm，同一层穴距 10 cm，上下层行距因菌种量而异；最后，用覆土机覆土 2~3 cm，并加覆 2 cm 的玉米秸秆。培养料水分、培养料温度、病虫害防控、采收等其他管理措施

均保持一致。2021 年 10 月 12 日种植小麦，2022 年 5 月 31 日收获结束。2022 年 6 月 10 日接茬种植玉米，于同年 10 月 5 日收获；2022 年 10 月 31 日接茬种植大球盖菇，于 2023 年 5 月 28 日收获，菇渣全部覆盖还田。2023 年 6 月 6 日种植玉米，同年 10 月 2 日收获，同年 10 月 18 日接茬种植小麦。

T3 处理（大球盖菇－玉米－小麦－玉米－小麦）管理措施：2021 年 10 月 28 日接茬种植大球盖菇，2022 年 5 月 18 日采收，菇渣全部覆盖还田。2022 年 6 月 10 日接茬种植玉米，同年 10 月 15 日接茬种植小麦。2023 年 6 月 6 日种植玉米，同年 10 月 18 日接茬播种小麦。

T4 处理（大球盖菇－玉米－大球盖菇－玉米－小麦）管理措施：2021 年 10 月 28 日接茬种植大球盖菇。大球盖菇采收结束后，菇渣全部覆盖还田。2022 年 6 月 10 日接茬种植玉米，同年 10 月 31 日接茬种植大球盖菇。2023 年 6 月 6 日种植玉米，同年 10 月 18 日接茬播种小麦。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 *土壤养分指标* 于每季玉米收获后当天，采用五点取样法，以 20 cm 为 1 层，使用土钻采集 0~100 cm 土样，同一小区内 5 个采样点的同层土样充分混合，剔除杂质，作为 1 个分析样本；室内自然风干后，一部分过 20 目筛，用于测定速效磷和速效钾含量，一部分过 100 目筛，用于测定全氮和有机质含量。参考《土壤农业化学分析方法》[19]，采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量，采用高锰酸钾法测定有机质含量，采用盐酸－硫酸浸提、钼锑抗比色法测定有效磷含量，采用醋酸铵浸提、火焰光度计测定速效钾含量。

1.3.2 *光合特性指标* 选择晴朗无云的上午 9∶00-11∶30，使用 LI-6400 光合测定仪（美国 LI-COR 公司）测量孕穗期（2022 年 4 月 12 日、2023 年 4 月 10 日和 2024 年 4 月 11 日）、开花期（2022 年 4 月 21 日、2023 年 4 月 20 日和 2024 年 4 月 19 日）、花后 7 d（2022 年 4 月 28 日、2023 年 4 月 27 日和 2024 年 4 月 26 日）及花后 14 d（2022 年 5 月 5 日、2023 年 5 月 4 日和 2024 年 5 月 3 日）旗叶的净光合速率（P_n）、蒸腾速率（T_r）、气孔导度（G_s）和胞间 CO_2 浓度（C_i）。每个小区测定 3 片叶，3 次重复。

1.3.3 *根系特性指标* 于 2021-2024 年小麦的越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期和花后 14 d，选取长势一致且具有代表性的麦行为中心，左右各延伸 10 cm，采集长、宽和深均为 20 cm 的土块，装于 70 目的筛网袋中，每个处理重复 3 次。在实验室用蒸馏水浸泡根系，将根际土洗净后，使用 Epson Expression 10000XL 根系扫描仪（日本 Epson 公司）进行图像扫描，接着利用 WinRHIZO 根系分析系统（加拿大 Sainte Foy 公司）获取根长、根表面积和根体积等指标[20]。

1.3.4 *群体指标* 出苗后在每个小区选择长势均匀一致的 1 m 双行标记，于越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期分别统计分蘖情况。

1.3.5 *产量及其相关指标* 不同轮作模式下，每个小区人工收获未受取样影响的 7 m×10 m 小麦，晒干后（含水量 12%左右）分别称重并计产。同时，调查每个小区 1 m 双行的穗数，并随机选取 20 株测定穗粒数。从测产的籽粒样品中随机选取 1000 粒测定千粒重，每个处理重复 3 次。

1.3.6 *收获指数* 收获指数（harvest index，*HI*）是作物收获时经济产量与生物产量之比，又名经济系数。其计算公式为：$HI=GY/DMW$，式中，*GY* 为成熟期单位面积籽粒干重，*DMW* 为地上部单位面积干物质积累量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析，采用 Origin 2023 软件作图。T1 处理开展了为期 3 年的小麦田间数据测定，T2 和 T3 处理菇轮作模式下进行了 2 年的小麦数据采集，T4 处理进行了 1 年的小麦数据测定。分别对 T1、T2 和 T3 处理不同年份的各项指标进行方差分析（ANOVA），结果发现各处理的各项指标在年份间均无显著差异，因此对不同年份的数据进行平均后用于后续分析。

2 结果与分析

2.1 不同粮菇轮作模式对土壤耕层养分的影响

随着土壤深度的增加，各种轮作模式下的土壤全氮、速效磷、速效钾及有机质含量均呈现下降趋势（表 1，图 2）。在 0~20 cm 土层，与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理下土壤全氮含量分别提升了 8.29%、5.26%和 11.65%；速效磷含量分别提升 53.25%、48.98%和 74.61%；速效钾含量分

表 1　不同轮作模式的指标差异分析

Table 1　Analysis of differences in the indicators of different rotation patterns

指标 Index	T1	T2	T3
土壤全氮 Soil total nitrogen (g/kg)	0.49	0.53	0.50
土壤速效磷 Soil available phosphorus (mg/kg)	7.14	9.73	9.87
土壤速效钾 Soil available potassium (mg/kg)	64.10	70.27	77.87
土壤有机质 Soil organic matter (g/kg)	6.84	7.83	7.42
P_n [μmol/(m²·s)]	21.58	22.85	25.50
G_s [mmol/(m²·s)]	0.98	1.13	1.05
C_i [μmol/(m²·s)]	280.64	304.18	299.76
T_r [mmol/(m²·s)]	3.45	4.12	3.77
根系活力 Root vigor [μg/(g·h)]	92.20	111.32	96.83
根长 Root length (cm)	334.49	392.98	361.24
根表面积 Root surface area (cm²)	63.07	99.87	88.38
根体积 Root volume (cm³)	1.72	2.25	1.91
群体 Population (×10⁴/hm²)	51.40	52.30	56.75
穗数 Spike number (×10⁴/hm²)	338.40	417.45	536.25
穗粒数 Grain number per spike	40.42	44.50	39.92
千粒重 1000-grain weight (g)	49.48	47.90	40.80
产量 Yield (kg/hm²)	5737.36	7563.43	7423.36
HI	0.45	0.52	0.48

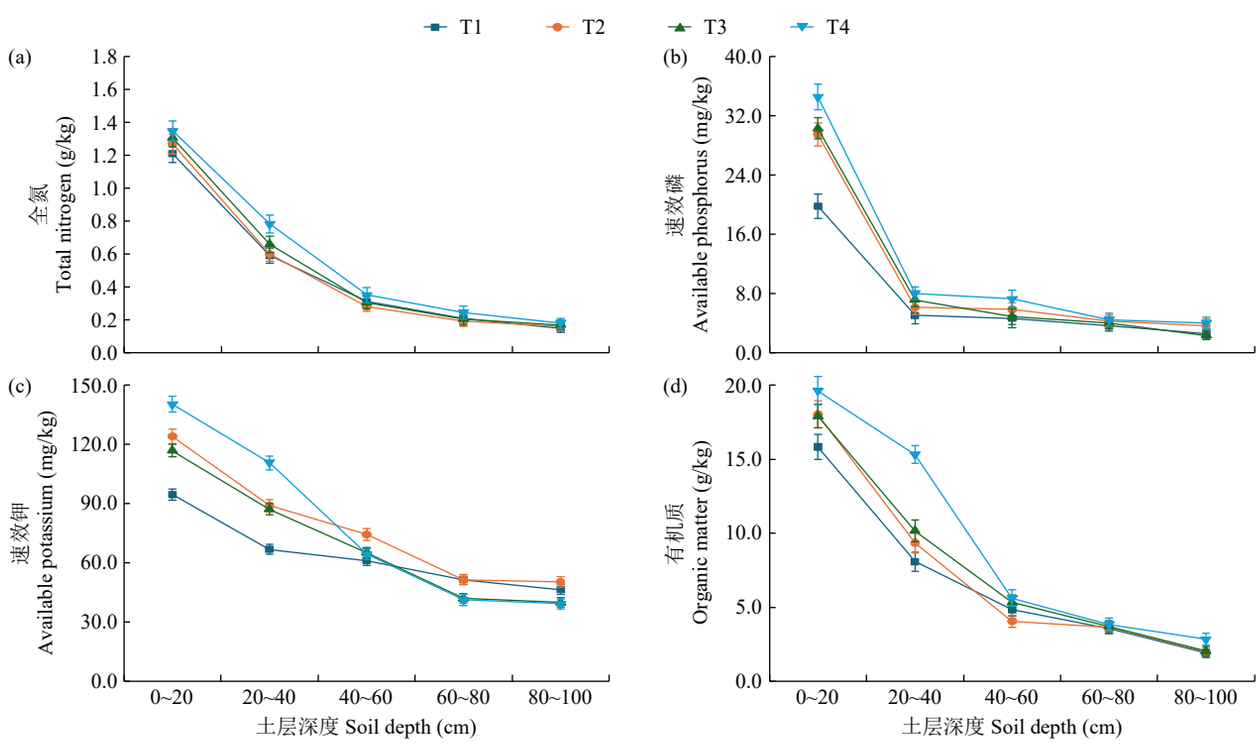


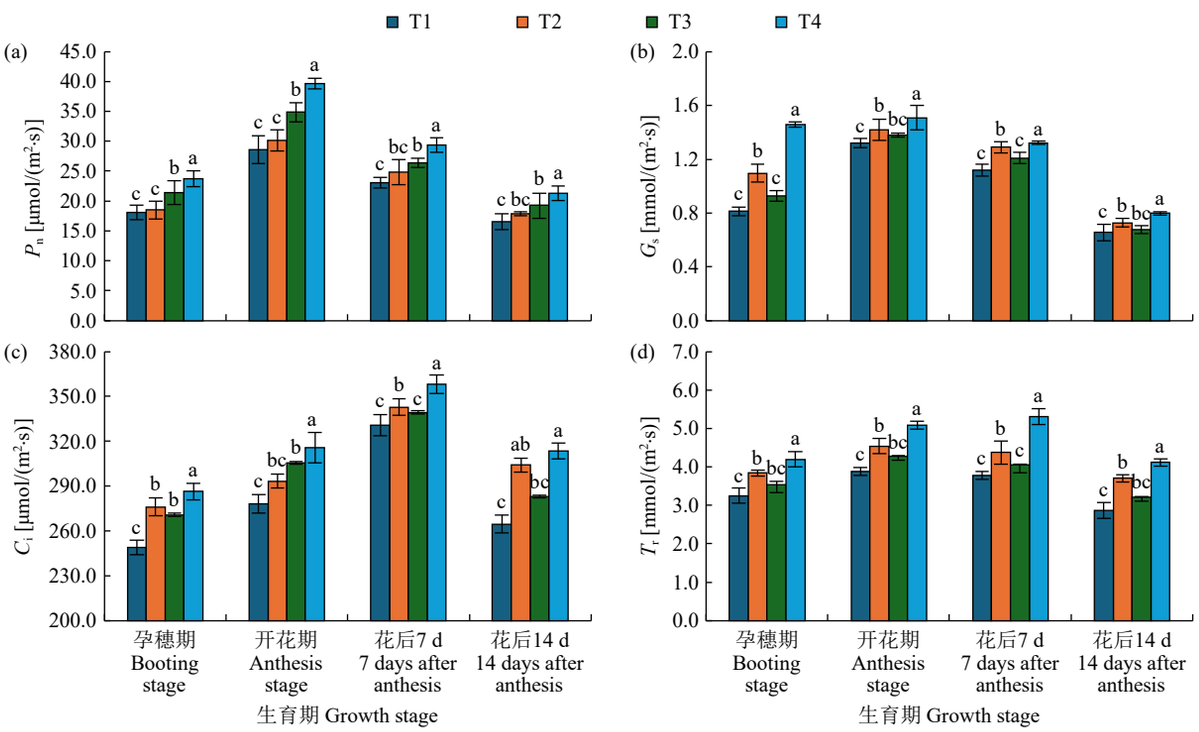
图 2　不同轮作模式对土壤养分含量的影响

Fig.2　Effects of different rotation patterns on soil nutrient content

别提升 23.41%、31.06%和 48.21%；同时，有机质含量也有提升，分别为 13.13%、13.89%和 23.99%。其中，T4 处理各养分指标整体提升幅度较大。在 20~40 cm 土层，T4 处理下的土壤全氮、速效磷和有机质含量均较高，其次是 T2 和 T3 处理，T1 处理最低；速效钾含量则表现为 T4 处理下最高，其次是 T2 和 T3 处理，T1 处理最低。在 40~100 cm 土层，各处理的土壤养分含量差异不明显。综上所述，采用粮菇轮作的方法可以提升土壤养分含量，其中 T4 处理的效果最为明显。

2.2 不同粮菇轮作模式对小麦光合特性的影响

如图 3a 所示，在 4 个轮作模式下，T1 处理的 P_n 在各生育时期均表现为最低水平，而 T4 处理表现为最高水平。与孕穗期相比，开花期各处理小麦 P_n 均上升。其中 T4 处理增幅最大，增长 67.37%；T2、T3 和 T1 处理分别增长 62.79%、62.47%和 58.42%。与开花期相比，各处理小麦在花后 7 和 14 d 的 P_n 均呈下降趋势，其中 T4 处理分别降低 25.99%和 46.23%，T1 处理分别降低 19.55%和 42.23%。



同一生育时期不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Different lowercase letters in the same growth stage indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 3 不同轮作模式对小麦光合特性的影响

Fig.3 Effects of different rotation patterns on photosynthetic characteristics of wheat

如图 3b 所示，不同轮作模式下小麦冠层的 G_s 随生育时期的推进表现为先增后减的趋势，峰值均出现在开花期。其中，T1 处理下各生育时期的 G_s 均显著低于其他处理，而 T4 处理的 G_s 相对最高，其孕穗期、开花期、花后 7 d 和花后 14 d 分别为 1.46、1.51、1.32 和 0.80 mmol/(m²·s)。与 T1 处理相比，T4 处理在各生育时期的增幅依次为 79.09%、14.39%、18.03%和 21.62%。

如图 3c 所示，从不同生育期来看，小麦的 C_i 在 4 种轮作模式下均表现为先增加后降低的趋势，在花后 7 d 达到峰值。与 T1 处理相比，T4 处理下最高，其在孕穗期、开花期、花后 7 和 14 d 分别增加 14.94%、13.60%、8.25%和 18.53%。T2 处理下小麦的 C_i 增幅为 8.39%，高于 T3 处理的 6.81%，且低于 T4 处理的 13.48%。

T_r 在不同轮作模式及生长阶段的特征如图 3d 所示。相较于 T1 处理，T2、T3 和 T4 处理均能促进小麦 T_r 的上升，其中以 T4 处理增幅最高。与 T1 相比，T2 处理小麦的 T_r 在孕穗期、开花期、花后 7 和 14 d 分别提高 18.48%、16.83%、15.74%和 29.11%；T3 处理下的提升略低，分别提高 8.97%、9.99%、7.17%和 11.86%；而 T4 处理的提升最为显著，分别提高 29.33%、30.86%、40.58%和 43.52%。另外，不同轮作模式下 T_r 均在开花期达到高峰，而在花后 7 和 14 d，T_r 逐渐下降。

综上，不同轮作方式下小麦 G_s、C_i 和 T_r 大小顺序均为 T4＞T2＞T3＞T1；而 P_n 为 T4＞T3＞T2＞T1。与 T1 相比，T4 处理的 P_n、G_s、C_i 和 T_r 分别提高了 32.12%、30.11%、13.48%和 35.80%。

2.3 不同粮菇轮作模式对小麦根系指标的影响

4 种轮作处理下，T4 处理的小麦根系活力值最高，其次为 T2 处理，而 T1 处理最低（图 4）。与

T1 处理相比，T4、T2 和 T3 处理的小麦根系活力提高 37.98%、20.74%和 5.02%。从不同生育时期来看，开花期不同轮作模式下根系活力高于其他生育时期，其次为拔节期，花后 20 d 最低。开花期、拔节期、花后 10 d、返青期和花后 20 d 平均小麦根系活力分别为 159.56、116.38、111.11、82.36

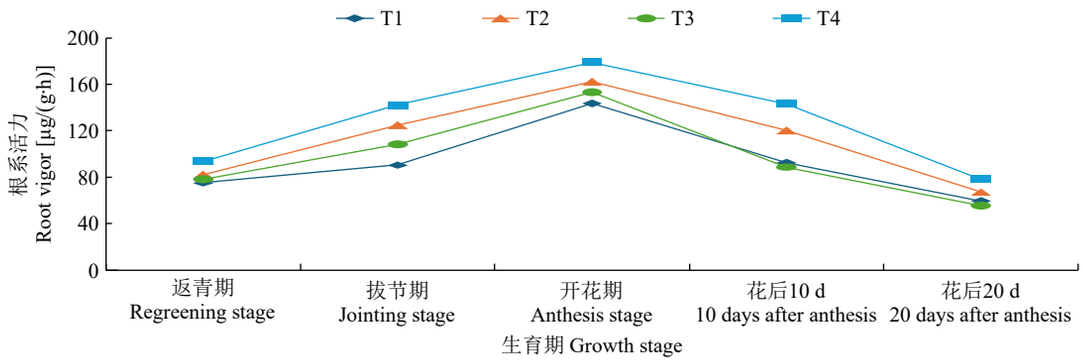


图 4　不同轮作模式对小麦根系活力的影响

Fig.4　Effects of different rotation patterns on root vigor of wheat

和 65.05 μg/(g·h)。

随着生育进程推进，各处理的小麦根长、根表面积和根体积均呈先增加后降低的趋势，在孕穗期－开花期达到峰值，随后下降（表 2）。不同轮作模式中，T4 处理的根长、根表面积和根体积最大。与 T1 处理相比，越冬期 T2、T3 和 T4 处理的根长分别提高 29.06%、28.61%和 41.90%；返青期、拔节期、孕穗期和开花期的促进效果依然

表 2　粮菇轮作模式对小麦根系的影响

Table 2　Effects of grain-mushroom rotation pattern on wheat root system

生育期 Growth stage	处理 Treatment	根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm^2)	根体积 Root volume (cm^3)
越冬期 Overwintering stage	T1	151.32±2.30Bc	29.65±0.89Bc	0.21±0.02Bc
	T2	195.30±2.15Aab	33.51±0.18Bb	0.32±0.01Ab
	T3	194.61±3.12Ab	31.23±0.56Bb	0.32±0.01Ab
	T4	214.73±4.26Aa	38.42±1.12Aa	0.37±0.02Aa
返青期 Regreening stage	T1	225.08±1.85Bc	25.75±0.55Cc	0.25±0.01Bc
	T2	322.81±2.61Ab	32.21±0.84Bb	0.36±0.02Ab
	T3	260.67±1.89Bc	38.01±0.65Aa	0.34±0.01Ab
	T4	351.20±2.01Aa	40.03±0.88Aa	0.39±0.02Aa
拔节期 Jointing stage	T1	340.22±7.10Bd	82.45±2.13Bc	1.23±0.04Bc
	T2	408.73±6.62Bb	150.39±3.64Aa	2.35±0.03Aa
	T3	366.22±7.01Bc	111.12±5.24Bb	1.67±0.02Bb
	T4	519.32±6.14Aa	140.46±3.91Aa	2.26±0.03Aa
孕穗期 Booting stage	T1	520.31±8.60Bc	93.06±2.46Bc	2.46±0.04Bc
	T2	569.73±9.34Bb	161.39±3.12Aa	3.15±0.03Aa
	T3	543.22±7.47Bc	143.22±3.89Ab	2.66±0.02Bb
	T4	629.36±6.04Aa	156.46±4.05Aa	3.12±0.03Aa
开花期 Anthesis stage	T1	513.14±3.62Cd	102.11±1.06Bc	3.26±0.01Ac
	T2	581.23±5.21Bb	165.36±1.23Aa	4.14±0.02Aa
	T3	533.40±4.89Cc	150.35±1.89Ab	3.49±0.03Ab
	T4	633.75±6.74Aa	160.35±1.45Aa	4.23±0.02Aa
花后 20 d 20 days after anthesis	T1	256.88±2.87Bd	45.41±0.46Bc	2.88±0.01Ad
	T2	280.12±2.65Ab	56.38±0.53Ab	3.16±0.02Ab
	T3	269.34±1.67Bc	56.33±0.49Ab	2.96±0.01AC
	T4	310.02±3.47Aa	65.49±0.38Aa	3.47±0.01Aa

不同大、小写字母分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively. The same below.

存在。各轮作模式下的根表面积在所有时期均大于 T1 处理。与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理的根表面积分别提高 58.35%、40.12%和 58.87%。在整个生长周期内，T1 处理下的根体积均最小。与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理的根体积分别提高 31.00%、11.18%和 34.50%。T4 处理在拔节期与 T1 处理相比增幅最大，为 83.74%。花后 14 d，尽管各处理有所降低，但其他 3 种处理下的根体积仍然高于 T1 处理，变化幅度依然显著。

2.4 不同粮菇轮作模式对小麦群体的影响

如图 5 所示，不同轮作方式的小麦群体随生育时期的推进整体呈先升后降的趋势，在返青期群体数量达到峰值（99.93 万/hm^2），进入抽穗期后群体数量趋于稳定（44.37 万/hm^2）。不同轮作处理对小麦群体的影响存在差异，其中 T4 处理在各生育时期的平均群体数量最高（63.34 万/hm^2）；其次为 T3 处理（56.75 万/hm^2），T1 处理最少（51.40 万/hm^2），由高到低依次为 T4、T3、T2 和 T1 处理。与 T1 处理相比，T4 处理的群体在越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期的增加幅度分别为 31.25%、18.15%、32.71%、9.96%、20.11%和 15.68%。

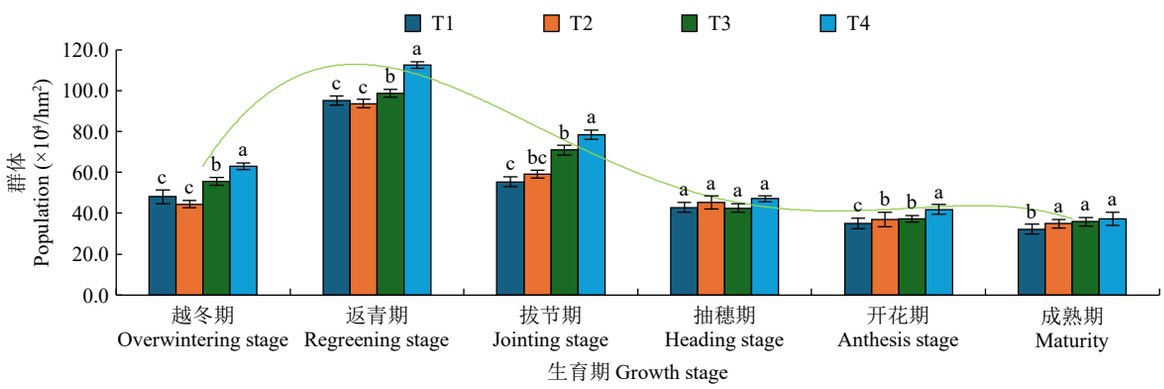


图 5 不同轮作方式对小麦群体发展动态的影响

Fig.5 Effects of different rotations on the dynamics of wheat population development

2.5 不同粮菇轮作模式对小麦产量的影响

不同轮作模式对小麦产量及 *HI* 的影响如表 3 所示。T1 处理下小麦的穗数、穗粒数以及产量相对较低，*HI* 也较低。与 T1 处理相比，T2 处理显著提高了小麦的穗数和穗粒数，增幅分别为 23.36%和 10.09%；产量提升 31.83%，*HI* 显著增加 15.56%；T3 处理在穗数上表现较好，但穗粒数和千粒重相对较低，产量略低于 T2 处理，*HI* 也稍低；而 T4 处理则在各方面表现较为均衡，其产量达到最高值，分别比 T1、T2 和 T3 处理增加 68.38%、27.72%和 30.13%，*HI* 比 T1 和 T3 处理分别提升 13.33%和 6.25%，和 T2 处理差异不显著。

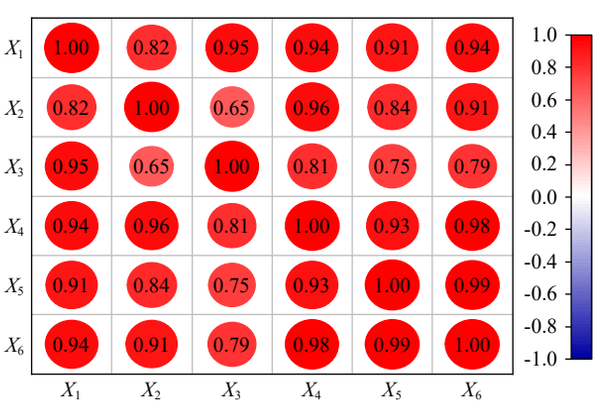
表 3 不同轮作模式对小麦产量的影响

Table 3 Effects of different rotation patterns on wheat yield

处理 Treatment	穗数 Spike number (×10⁴/hm²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm²)	收获指数 *HI*
T1	338.40c	40.42c	49.48a	5737.36d	0.45d
T2	417.45b	44.50a	47.90b	7563.43b	0.52a
T3	536.25ab	39.92c	40.80c	7423.36bc	0.48c
T4	557.40a	42.08b	48.45ab	9660.28a	0.51ab

2.6 生理指标与小麦产量的相关性分析

如图 6、7 所示，小麦产量与各生理指标之间存在显著正相关关系，其中 P_n（相关系数 0.95）对产量影响最为显著，其次是 T_r（0.94）和 G_s（0.94）。同时，根系活力（0.82）和 C_i（0.91）

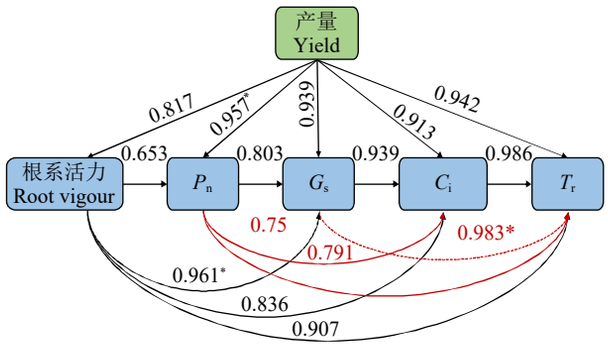


X_1：产量；X_2：根系活力；X_3：P_n；X_4：G_s；X_5：C_i；X_6：T_r。

X_1: yield; X_2: root vigor; X_3: P_n; X_4: G_s; X_5: C_i; X_6: T_r.

图 6 不同生理指标与产量的相关性热图

Fig.6 Heat map of correlation of different physiological indicators and yield



*: $P < 0.05$.

图 7　不同生理指标与产量的相关性

Fig.7　Correlation between different physiological indicators and yield

也与产量密切相关。各生理指标间也相互影响，根系活力增强可间接提升 P_n，G_s 调节影响 T_r 和 C_i。因此，协同优化生理指标，是提高小麦产量的有效策略。

3　讨论

3.1　不同粮菇复种模式对不同耕层养分的影响

本研究通过分析不同粮菇轮作方式对土壤耕层养分的影响，揭示了粮菇栽培在提升土壤肥力方面的显著作用。试验结果表明，随着土壤深度的增加，土壤全氮、速效磷、速效钾及有机质含量均呈下降趋势，与前人[21]研究一致。在 0~20 cm 表层土壤中，与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理的土壤全氮、速效磷、速效钾和有机质含量分别提高 5.26%~11.65%、48.98%~74.61%、23.41%~48.21%和 13.13%~23.99%。粮菇轮作模式显著提升了土壤养分含量，可能与菇类生长过程中的生物转化作用有关[13]。菇类能够分解有机物质，释放出氮、磷和钾等养分[22]，其菌丝体和残留物可增加土壤有机质含量[23]，同时还能增加土壤微生物多样性等，进一步促进土壤养分的积累和转化[17,24]。综上所述，粮菇轮作模式是一种有效的土壤养分提升策略，特别是 T4 处理。在 20~40 cm 土层中，T4 处理在土壤全氮、速效磷、速效钾和有机质含量上均表现最优。表明菇类栽培的养分提升效应不局限于表层土壤，还能影响到更深层的土壤环境。然而，在 40~100 cm 土层中，各轮作处理的土壤养分含量差异并不明显，可能是因为深层土壤的养分变化更为缓慢，且受到多种因素的影响，如土壤质地、水分条件和根系分布等[25-29]。

3.2　不同粮菇复种模式对小麦光合特性的影响

分析不同粮菇轮作方式对小麦光合特性的影响，发现 T4 处理在提升小麦 P_n、G_s、C_i 和 T_r 方面均表现最优，T1 处理表现最差。与 T1 处理相比，T4 处理的 P_n、G_s、C_i 和 T_r 分别提高了 32.12%、30.11%、13.48%和 35.80%。此现象可能归因于菇类栽培改善土壤养分、增加土壤透气性和保水能力，与 Hu 等[30]和 Hyde 等[31]的研究结果一致。

3.3　不同粮菇复种模式对小麦根系活力的影响

粮菇轮作模式对小麦根系活力具有显著的促进作用。与 T1 处理相比，粮菇轮作模式（T2、T3 和 T4 处理）在各生育期内均显著提高了小麦的根长、根表面积和根体积。其中，T4 处理的提升效果最为突出，与 T1 处理相比，越冬期的根长增加了 41.90%，拔节期根体积增加了 83.74%，孕穗期和开花期根表面积增加超过 50.00%。结果表明，粮菇轮作模式能够显著增强小麦根系的生长和扩展能力，在拔节期、孕穗期和开花期等关键生育阶段增强效果更明显。根系表面积的显著增加表明，粮菇轮作模式有助于小麦根系更高效地吸收土壤中的水分和养分，进一步促进根系活力的提升。此外，粮菇轮作模式在花后 14 d 仍能维持较高的根体积，进一步说明其对小麦根系生长的持续促进作用。这种效应可能与粮菇轮作模式对土壤微生物群落结构和土壤肥力的改善有关[11]，菇类残体分解后释放的有机物质和养分可能为小麦根系生长提供了更优越的土壤环境[32]。

3.4　不同粮菇复种模式对小麦群体和产量的影响

本研究揭示了不同粮菇轮作模式对小麦群体动态和产量形成的影响。T4 处理在小麦各关键生育期表现出显著的群体数量优势。在越冬期和返青期，该模式下的小麦群体数量分别较 T1 处理高出 31.25%和 18.15%。这一差异为后续成穗数的提升提供了重要的基础。这一发现与吴艳等[11]和谷维等[33]的研究相契合，粮菇轮作可以改善土壤环境，促进作物根系发育。在产量构成方面，T4 处理增产效果最突出。与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理的产量分别提高 31.83%、29.39%和 68.38%。其中，T4 处理通过优化产量构成要素实现显著增产，与 T1 处理相比，T4 处理下的穗数

和穗粒数分别提高 64.72%和 4.11%，千粒重降低 2.08%。这可能因为大球盖菇栽培的优势，如大球盖菇菌丝体在分解过程中释放大量有机质与活性酶，可显著改善土壤养分，促进小麦根系对氮、磷、钾等养分的吸收，进而增加有效分蘖和穗粒数[13,34-35]。T4 处理下的小麦 *HI* 比 T1 和 T3 处理分别提升 13.33%和 6.25%，优化了小麦群体，其产量和 *HI* 均显著高于其他处理。

4 结论

粮菇复种模式显著改善 0~20 cm 及 20~40 cm 土层的养分结构。与 T1 处理相比，T4 处理下各指标增幅最高，0~20 cm 土层全氮、有机质、速效磷和速效钾含量分别提高 11.65%、23.99%、74.61%和 48.21%，20~40 cm 土层养分优势明显。T4 处理下的小麦 P_n、G_s、C_i、T_r 最高。与 T1 处理相比，T2、T3 和 T4 处理的根系活力增加了 5.02%~37.98%，根长、根表面积和根体积分别增加了 8.00%~32.46%、40.12%~58.87%和 11.18%~34.50%。粮菇轮作显著促进小麦群体结构。与 T1 处理相比，T4、T3 和 T2 处理的穗数分别增加了 64.72%、58.47%和 23.36%，*HI* 提升至 0.48~0.52，千粒重降低了 2.08%~17.54%，产量显著增长 29.39%~68.38%。因此，粮菇轮作是一种兼具土壤改良、生理促进与作物增产优势的高效轮作模式。

参考文献

[1] 李奕赞，张江周，贾吉玉，等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展. 土壤学报，2022，59(5)：1177-1189.
[2] 张玉娇，王浩，王淑兰，等. 小麦/玉米轮作旱地长期轮耕的保墒增产效应. 农业工程学报，2018，34(12)：126-136.
[3] 杨慧敏，杨云马，黄少辉，等. 优化施肥对小麦-玉米轮作体系产量、养分平衡与生态环境效益的影响. 中国生态农业学报，2023，31(5)：699-709.
[4] 王丽君，李豪，马君红，等. 洛阳烟区土壤养分指标适宜性评价及茬口效应分析. 浙江农业科学，2022，63(7)：1534-1538.
[5] 白刚，郭凤霞，陈垣，等. 农茬口对土壤特性及熟地当归育苗的调控效应. 中国生态农业学报，2020，28(5)：701-712.
[6] 吴金芝，汪洪涛，侯园泉，等. 提升雨养夏玉米—冬小麦两熟体系生产力和土壤硝态氮累积的最优耕作模式. 植物营养与肥料学报，2023，29(4)：614-627.
[7] 石思博，王旭东，叶正钱，等. 菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响. 生态学报，2018，38(23)：8612-8620.
[8] 李佳丽，邓茹月，彭强，等. 稻菇轮作对水稻产量和品质及土壤性质的影响. 耕作与栽培，2024，44(3)：39-43.
[9] 张礼华. 菌渣替代部分化肥对水稻生长和土壤养分含量的影响. 福建稻麦科技，2024，42(4)：28-32.
[10] 季方芳，何其全，田婷，等. 不同地区耕地轮作休耕模式与生态效应的研究进展. 江西农业学报，2025，37(1)：99-108.
[11] 吴艳，朱莉英，王发洪，等. 菇稻不同轮作年限对水稻产量和土壤肥力特征的影响. 中国土壤与肥料，2023(8)：91-96.
[12] 彭新红，陈绪涛，何虎，等. 大球盖菇菌渣还田对水稻生长和稻田土壤环境的影响. 江西农业大学学报，2023，45(2)：349-360.
[13] 刘高远，和爱玲，杜君，等. 大球盖菇—玉米轮作对秸秆降解、土壤理化性质、作物产量及经济效益的影响. 河南农业科学，2021，50(10)：60-68.
[14] 张斯佳，杨杰，赵帅，等. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响. 中国农业科学，2025，58(2)：238-251.
[15] 刘春燕，张利影，周杰，等. 豆科作物轮作强化农田生态系统功能的研究进展. 作物学报，2024，50(8)：1885-1895.
[16] 张立成，李娟，章明清. 施肥模式对菜-稻轮作周年氮素吸收及产量的影响. 中国土壤与肥料，2024(4)：181-189.
[17] 许彬，李慧星，郭书贤，等. 玉米秸秆培养大球盖菇栽培种配方比较. 食用菌，2019，41(1)：32-34，38.
[18] 马瑜，申坚定，李梦春，等. 玉米秸秆安全优质栽培大球盖菇关键技术. 食用菌，2017，39(5)：54-56.
[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京：中国农业科技出版社，2000.
[20] 宋晓，张珂珂，黄晨晨，等. 不同氮效率小麦品种根系特征及根际土壤酶活性的分析. 核农学报，2023，37(3)：617-625.
[21] 李祥，宁琪，周佳逸，等. 长期定位施肥对甘薯–小麦体系剖面土壤质量的影响. 土壤，2024，56(6)：1214-1221.
[22] 于萍，孙萌，傅常娥，等. 大球盖菇栽培期间胞外酶活性变化研究. 中国食用菌，2014，33(1)：48-50.
[23] Chang S T， Wasser S P. The role of culinary-medicinal mushrooms on human welfare with a pyramid model for human health. International Journal of Medicinal Mushrooms，2012，14(2)：95-134.
[24] 谭爱华. 利用农作物秸秆栽培大球盖菇技术要点. 食用菌，2018，40(4)：51-52.
[25] 马婧怡，贾宁凤，程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征. 生态学报，2018，38(10)：3471-3481.
[26] 胡芳，杜虎，曾馥平，等. 典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响. 生态学报，2018，38(6)：2170-2179.
[27] 杨静，赵夏云，瞿飞，等. 菜-菌轮作模式下土壤微生物群落结构及多样性的变化. 中国土壤与肥料，2023(2)：54-61.
[28] 范雅琦，王亚南，霍瑞轩，等. 轮作模式下土壤微生物与线虫群落的互作研究现状. 中国农学通报，2022，38(25)：108-113.
[29] 徐明岗，段英华，白珊珊，等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望. 植物营养与肥料学报，2024，30(7)：1253-1261.
[30] Hu Y，Mortimer P E，Hyde K D，et al. Mushroom cultivation for soil amendment and bioremediation. Circular Agricultural Systems，2021，1(1)：1-14.
[31] Hyde K D，Xu J C，Rapior S，et al. The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. Fungal Diversity，2019，97(1)：1-136.
[32] 田胜营，潘明泉，吕秀敏，等. 有机无机肥配施对土壤性质和小麦生长、养分吸收利用的影响. 江苏农业科学，2023，51(23)：102-107.
[33] 谷维，张荣芳，苏雅迪，等. 玉米间作大球盖菇对土壤的影响及效益分析. 黑龙江农业科学，2020(6)：31-34.
[34] 洪琦，赵勇，陈明杰，等. 大球盖菇菌渣原位还田对土壤有机质、酶活力及细菌多样性的影响. 食用菌学报，2022，29(1)：27-35.
[35] 毛宁，贾海燕，王金成，等. 大球盖菇、香菇与草莓轮作对土壤质量及草莓生长的影响. 中国食用菌，2020，39(7)：61-64.

Effects of Grain-Mushroom Rotation Patterns on Soil Nutrients and Growth Characteristics of Wheat

Song Xiao[1], Zhang Keke[2], Guan Hanwen[1], Li Qingxin[1],
Kong Weili[2], Liu Qin[2], Zhang Yuting[2], Zheng Jingkang[2]

([1]Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; [2]Institute of Edible Fungi, Henan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Germplasm Resources of Edible Fungi in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract　To clarify the effects of different grain-mushroom rotation patterns on soil nutrients, wheat physiological traits, growth dynamics, and yield, a field experiment was conducted from 2021 to 2024 with four rotation treatments: T1, wheat–maize rotation (wheat–maize–wheat–maize–wheat); T2, one-year mushroom rotation (wheat–maize–*Stropharia rugosoannulata*–maize–wheat); T3, alternate-year mushroom rotation (*Stropharia rugosoannulata*–maize–wheat–maize–wheat); and T4, continuous two-year mushroom rotation (*Stropharia rugosoannulata*–maize–*Stropharia rugosoannulata*–maize–wheat). The results showed that grain-mushroom rotations had significant influences on soil nutrient status and crop growth. In the 0-20 cm soil layer, compared with T1, T2, T3, and T4 increased soil total nitrogen, available phosphorus, available potassium, and organic matter by 5.26%-11.65%, 48.98%-74.61%, 23.41%-48.21%, and 13.13%-23.99%, respectively, and the nutrient advantages remained evident in the 20-40 cm soil layer. Grain-mushroom rotations also significantly enhanced wheat photosynthetic capacity. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, and transpiration rate were all highest under T4, reaching 28.52 μmol/(m^2·s), 1.27 mmol/(m^2·s), 318.47 μmol/(m^2·s), and 4.68 mmol/(m^2·s), respectively. Compared with T1, T4 increased wheat root vigor, root length, root surface area, and root volume by 37.98%, 32.46%, 58.87%, and 34.50%, respectively. Grain-mushroom rotations significantly increased wheat population and spike number, increased the harvest index by 0.03-0.07, and reduced the 1000-grain weight by 1.03-8.68 g. Compared with T1 treatment, wheat yields under T4, T2, and T3 treatments increased by 68.38%, 31.83%, and 29.39%, respectively. Therefore, grain-mushroom rotation had considerable potential for soil improvement and yield enhancement. Its beneficial effects may be attributed to improved soil fertility, enhanced root activity and canopy photosynthetic capacity, and more efficient utilization and conversion of light, temperature, water, and nutrient resources, thereby optimizing wheat population structure and ultimately increasing grain yield.

Key words　Rotation pattern; Wheat; Soil nutrients; Photosynthesis; Root system

撤稿声明

刊登于《作物杂志》2026 年第 3 期 117~125 页的《2021−2024 年长江流域和黄淮海区国审小麦品种抗病性评价》一文，作者为张凡、郜峰、段剑钊、薛鑫、宋志均、朱倩、杨春玲，因文中未标注所使用数据的来源，作者向本刊提出撤稿申请。现编辑部决定撤稿，特此声明。

《作物杂志》编辑部

2026 年 9 月 20 日