DOI: 10. 11686/cyxb2025508
http://cyxb. magtech. com. cn
赵微，赵江红，王玉建，等. 有机肥配施有益菌及生物炭促进黄连生长和提升土壤综合肥力的探究. 草业学报，2026，35(12)：78－89.
ZHAO Wei, ZHAO Jiang-hong, WANG Yu-jian, *et al*. Exploration of organic fertilizer combined with beneficial bacteria and biochar to promote the growth of *Coptis chinensis* and enhance comprehensive soil fertility. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(12): 78－89.

# 有机肥配施有益菌及生物炭促进黄连生长和提升土壤综合肥力的探究

赵微[1]，赵江红[1]，王玉建[2]，王正江[1]，李振轮[1*]
（1. 西南大学资源环境学院，重庆市界面过程与土壤健康重点实验室，重庆 400715；2. 绵阳师范学院资源环境工程学院，四川 绵阳 621000）

**摘要：**目前黄连种植缺乏科学施肥方案，主要依赖化肥，导致土壤微生态破坏和土壤质量退化，严重影响黄连的生长发育、产量和品质。以一年生黄连为对象，设置传统化肥(CK)、单施有机肥($T_1$，牛粪发酵生产)、有机肥＋有益菌剂($T_2$)、有机肥＋生物炭($T_3$)、有机肥＋有益菌剂＋生物炭($T_4$)5个处理，有机肥处理均添加相同比例碳铵以平衡碳氮比。测定不同施肥条件下黄连植株生长及养分积累、土壤理化性质以及微生物群落结构特征。结果表明，相较于CK，各处理的根鲜重分别提高了64.7%、5.6%、52.2%、40.1%。$T_4$处理效果最优，对黄连植株根长、株高的增幅分别为43.4%和16.8%，整株黄连氮磷钾积累量分别较CK处理显著提高了48.7%、17.7%和32.0%，土壤有效磷、速效钾和有机质含量分别较CK显著提高了10.0%、116.4%、7.2%，并有效提升了黄连根际土壤中细菌、真菌、放线菌含量，较CK提高了8.9%、4.2%、6.5%。相关性分析显示，土壤有效磷是影响黄连根际土壤微生物的关键土壤因子。$T_4$处理下的黄连植株生理生长综合指数(PGCI)和土壤综合肥力指数(IFI)均达最高值，优于其余处理，能有效促进植株生长并提升土壤肥力。研究结果为黄连种植提供了一种施肥方案。

**关键词：**黄连；有机肥；微生物菌剂；生物炭；土壤环境

# Exploration of organic fertilizer combined with beneficial bacteria and biochar to promote the growth of *Coptis chinensis* and enhance comprehensive soil fertility

ZHAO Wei[1], ZHAO Jiang-hong[1], WANG Yu-jian[2], WANG Zheng-jiang[1], LI Zhen-lun[1*]
1. *School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Interface Process and Soil Health, Chongqing* 400715, *China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang* 621000, *China*

**Abstract:** Currently, the cultivation of *Coptis chinensis* is without scientific knowledge of fertiliaer requirements and primarily relies on chemical fertilizers. This can often lead to the destruction of soil microecology and soil quality degradation, seriously affecting the growth, yield, and quality of *C. chinensis*. This study focused on annual *C. chinensis*. Five treatments were set up: traditional chemical fertilizer (CK), organic fertilizer alone ($T_1$, produced by fermentation of cow manure), organic fertilizer＋beneficial bacterial agent ($T_2$), organic fertilizer＋biochar ($T_3$), and organic fertilizer＋beneficial bacterial agent＋biochar ($T_4$). The organic fertilizer treatments all added the same proportion of ammonium bicarbonate to balance the carbon-to-nitrogen ratio. The growth and nutrient accumulation of *C. chinensis* plants, soil physicochemical properties, and microbial community structure characteristics were

收稿日期：2025-12-11；改回日期：2026-01-26
基金项目：四川省区域创新合作项目(2024YFHZ0102)资助。
作者简介：赵微(2000－)，女，贵州遵义人，硕士。E-mail: 2486823960@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: lizhlun4740@sina. com

measured under the different fertilization treatments. The results showed that compared to CK, the fresh weight of root in each treatment increased by 64.7%, 5.6%, 52.2%, and 40.1%, respectively. Treatment $T_4$ had the best effect, with root length and plant height of *C. chinensis* in $T_4$ increasing by 43.4% and 16.8%, respectively, compared to CK. The whole-plant nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation in $T_4$ were significantly increased by 48.7%, 17.7%, and 32.0%, respectively, compared to CK treatment. Soil available phosphorus, soil available potassium, and soil organic matter content in $T_4$ were significantly increased by 10.0%, 116.4%, and 7.2% respectively, compared to CK. These changes effectively enhanced the content of bacteria, fungi, and actinomycetes in the rhizosphere soil of *C. chinensis*, with increases of 8.9%, 4.2%, and 6.5%, respectively, compared to CK. Correlation analysis showed that soil available phosphorus was a key soil factor affecting the rhizosphere soil microorganisms of *C. chinensis*. Under the $T_4$ treatment, physiological growth comprehensive index and integrated fertility index of *C. chinensis* plants attained their highest values, outperforming the other treatments and effectively promoting plant growth and enhancing soil fertility. This study provides a fertilization plan for the cultivation of *C. chinensis*.

**Key words**: *Coptis chinensis*; organic fertilizer; microbial agents; biochar; soil environment

黄连(*Coptis chinensis*)是我国重点发展的大宗中药材之一[1],具有清热燥湿和泻火解毒的药用功效。近年来,随着国家生态要求和养殖业集约化发展,黄连种植从原来的毁林生地栽培转向熟地连续栽培[2],且多用碳铵和磷肥等化肥替代传统厩肥。重庆市石柱县是我国黄连主产地,前期调研发现,有 51.6% 的农户每年化肥总施用量>3750 kg·hm$^{-2}$,41.0% 施用量为 1500~3750 kg·hm$^{-2}$[3]。过量施用化肥不仅不利于黄连根茎生长发育与活性物质积累[4],而且会造成化肥在土壤中累积,改变根际环境和微生物群落结构[5],进而引发土传病害,存在连作障碍的现象,导致黄连产量和品质严重下降。因此高强度的化肥投入,并未带来高产量,反而陷入“地力渐衰—产量递减—效益下滑”循环,既影响了种植户的经济效益,又对黄连产业可持续发展构成威胁。

已有研究表明,施有机肥对药用植物的生长发育及产量品质有良好作用。如有机肥辅以少量化肥能有效提高广藿香(*Pogostemon cablin*)产量及药用成分含量[6];有机肥显著提高了铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)主要活性成分多糖的含量[7]。生物炭呈碱性,疏松多孔,能改善土壤结构和增强土壤肥力,对药用作物的生长发育和品质提升也有积极作用,如微生物菌剂和生物炭可以显著提高半夏(*Pinellia ternata*)的出苗率[8],显著增加三七(*Panax notoginseng*)根的质量[9]。生物炭也被用于缓解药用植物的连作障碍及提升肥力。在人参(*Panax ginseng*)[10]和兰州百合(*Lilium davidii* var. Unicolor)[11]的种植中,施用生物炭能显著改善土壤的理化性质,优化土壤微生物的结构组成,从而有效减轻连作障碍。

目前,黄连种植障碍缓解技术缺乏系统理论支撑和科学的施肥技术,产量和品质双降、农户收益受损。基于此,研制生态高效的科学配方和施肥方案对黄连种植和农户增收具有重要意义。本研究通过探讨有机肥、有益菌剂和生物炭联合施用对黄连生长和土壤环境的影响,以期为黄连种植的科学施肥提供一种有效方案。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验区域概况

本研究在重庆市石柱县枫木镇昌坪村(30°10′—30°19′ N,108°25′—108°35′ E)进行,属亚热带季风性湿润气候,平均海拔 1400 m、年均气温 11 ℃。土壤类型为紫色土,试验地初始养分含量如表 1 所示。

**表 1　试验地初始养分情况**

**Table 1　The initial nutrient status of the experimental site**

| pH | OM (g·kg$^{-1}$) | TN (g·kg$^{-1}$) | TP (g·kg$^{-1}$) | TK (g·kg$^{-1}$) | AN (mg·kg$^{-1}$) | AP (mg·kg$^{-1}$) | AK (mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.12 | 25.99 | 1.20 | 0.60 | 6.13 | 144.56 | 35.37 | 41.61 |

OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; 下同 The same below.

### 1.2　供试肥料

化肥分别为湖北三宁化工股份有限公司生产的

过磷酸钙(水溶性磷含量≥7%、有效磷含量≥12%)及碳酸氢铵(氮含量≥17.1%);玉米(*Zea mays*)秸秆生物炭购于河南金邦环保科技有限公司;牛粪发酵有机肥由重庆丰泽园肥业有限公司生产;有益菌剂由枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、哈茨木霉、产解淀粉酶菌以6∶3∶3∶1的比例组成,有效活菌数≥2亿。有机物料干基养分及pH见表2。

**表2 各有机物料干基养分和pH**

**Table 2 Nutrient content and pH value of each organic material on dry basis**

| 有机物料 Organic material | C (%) | N (%) | $P_2O_5$ (%) | $K_2O$ (%) | pH |
|---|---|---|---|---|---|
| 有机肥 Organic fertilizer | 30.00 | 0.13 | 0.90 | 0.20 | 6.87 |
| 生物炭 Biochar | 78.00 | 1.50 | 0.15 | 3.00 | 7.00 |

### 1.3 试验设计

为确保试验材料的一致性与可比性,选用同一批播种、同一地块培育的味连,幼苗生长两年后,于2022年3月统一起苗移栽至试验地块,由当地农户进行前期种植、田间施肥管理和日常维护操作。依据前期调研农户施肥平均状况作为常规化肥处理(CK),有机肥使用量参考了前人研究的用量[12],选用牛粪为原料发酵的有机肥,通过配施与常规化肥处理等量的氮肥以改善碳氮比,后基于此设计了添加3%生物炭处理以及适量有益菌剂,形成不同的施肥处理。在2023年5月采集初始土壤,6月施肥,当年11月采样测定相应指标。各处理3次重复,每小区6 $m^2$。5个施肥处理方案如下:CK,磷肥(1050 kg·$hm^{-2}$)+碳铵(210 kg·$hm^{-2}$);$T_1$,有机肥(4500 kg·$hm^{-2}$)+碳铵(210 kg·$hm^{-2}$);$T_2$,有机肥(4500 kg·$hm^{-2}$)+有益菌剂(3000 mL·$hm^{-2}$)+碳铵(210 kg·$hm^{-2}$);$T_3$,有机肥(4500 kg·$hm^{-2}$)+生物炭(105 kg·$hm^{-2}$)+碳铵(210 kg·$hm^{-2}$);$T_4$,有机肥(4500 kg·$hm^{-2}$)+有益菌剂(3000 mL·$hm^{-2}$)+生物炭(105 kg·$hm^{-2}$)+碳铵(210 kg·$hm^{-2}$)。

### 1.4 样品采集

2023年6月施肥前在黄连地随机定10个点,采集5~15 cm土层土样,混合后送至实验室自然风干研磨过筛后用于检测试验地初始土壤基础理化性质。施肥处理后于2023年11月在各小区按照5点取样法采集黄连及土壤样品。黄连整株挖出,洗净晾干,测定其农艺性状,随后杀青烘干至恒重称量,粉碎过筛用于测定植株养分。抖落法收集黄连根际土壤:黄连带根挖出后轻抖去大块非根际土,再悬空抖动根系30 s,使黏附于根表1~2 mm的土壤直接落入密封袋中,将采集的不同处理根际土置于-20 ℃下保存用于测定黄连根际土壤微生物群落(试验结束后立即置于-80 ℃冰箱)。采集的根外土自然风干后研磨,分别过1.00、0.25 mm土筛,用于测定土壤基本养分状况。

### 1.5 指标测定与方法

**1.5.1 黄连植株及土壤相关指标** 取回的黄连洗净吸干明水后记录叶片数,测定黄连株高、根长、鲜重。黄连植株氮磷钾含量测定用浓硫酸-过氧化氢法进行消煮,采用全自动凯氏定氮仪(K9840,海能未来技术集团股份有限公司,中国山东)测定全氮含量;采用钼锑抗比色法测定磷含量;采用火焰光度计法测定钾含量[13]。采用蒽酮比色法测定黄连中可溶性糖含量[14]。

采用电位法测定土壤pH(土∶水=1∶5);采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量;采用硫酸-高氯酸法消化土壤全氮、全磷和全钾,采用凯氏定氮仪(K9840,海能未来技术集团股份有限公司,中国山东)测定全氮含量,采用钼锑抗比色法测定全磷含量,采用火焰光度计(AP1401,上海傲谱分析仪器有限公司,中国上海)测定全钾含量;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;采用醋酸铵浸提-火焰光度计法[13]测定土壤速效钾含量。

**1.5.2 土壤微生物群落磷脂脂肪酸的测定** 用磷脂脂肪酸(phospholipid fattyacid, PLFA)生物标记法测定土壤微生物生物量,提取与分析方法、检测步骤参考文献[15-16]。本研究通过计算Shannon-Wiener多样性指数($H$)、Simpson优势度指数($D$)、Pielou均匀度指数($J$)对微生物丰度和多样性进行分析[17-18]:

$$H=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i$$

$$D=1-\sum_{i=1}^{S}P_i^{\,2}$$

$$J=\frac{H}{\ln S}$$

式中：$P_i$为第$i$种特征PLFA占总的特征脂肪酸个数比例，$S$为群落中PLFA的总种类数。

**1.5.3　黄连生理生长综合指数**　　通过计算生理生长综合指数(physiological growth comprehensive index，PGCI)评估不同施肥处理对黄连生理生长的影响，具体方法参考文献[19－20]。

$$PGCI=PGI_1+PGI_2+PGI_3+PGI_4+\cdots+PGI_i \tag{1}$$

$$PGI_i=\begin{cases}1-C/T(T\geqslant C)\\ T/C-1(T<C)\end{cases} \tag{2}$$

式中：$PGCI>0$表示施肥处理对黄连生理生长有促进作用；$PGCI=0$表示施肥处理对黄连生理生长无显著影响；$PGCI<0$表示施肥处理抑制了黄连的生理生长。$PGI_i$代表$i$指标对应的生理生长指数，$C$代表对照组的数值，$T$代表处理组的数值。

**1.5.4　黄连土壤综合肥力指数**　　本研究选取7个土壤参数，运用内梅罗法分析计算土壤综合肥力指数(integrated fertility index，IFI)[21]，参考国家第二次土壤普查的分级准则，对土壤各参数进行分级标准化[22]。6个参数的分级标准值$X_a$、$X_c$、$X_p$如表3所示，黄连土壤pH分级标准参考已有黄连栽培技术，土壤pH在黄连生长最适范围(5.5<pH≤6.5)，分肥力系数($IFI_i$)=3；较适范围(6.5<pH≤7.5)时，$IFI_i$=2；在不适范围(pH≤5.5或pH>7.5)时，$IFI_i$=1。

**表3　6个土壤指标的分级标准**

**Table 3　Classification criteria for six soil indicators**

| 分级 Classify | 有机质 OM (g·kg$^{-1}$) | 全氮 TN (g·kg$^{-1}$) | 全磷 TP (g·kg$^{-1}$) | 全钾 TK (g·kg$^{-1}$) | 碱解氮 AN (mg·kg$^{-1}$) | 速效钾 AK (mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_a$ | 10 | 0.75 | 0.4 | 5 | 60 | 40 |
| $X_c$ | 20 | 1.50 | 0.6 | 20 | 120 | 100 |
| $X_p$ | 30 | 2.00 | 1.0 | 25 | 180 | 150 |

注：有效磷因超出阈值，未参与IFI分级。

Note：Available phosphorus did not participate in IFI classification because it exceeded the threshold.

$$IFI_i=\begin{cases}x/x_a, & x\leqslant x_a\\ 1+(x-x_a)/(x_c-x_a), & x_a<x\leqslant x_c\\ 2+(x-x_c)/(x_p-x_c), & x_c<x\leqslant x_p\\ 3, & x>x_p\end{cases}$$

式中：$IFI_i$代表不同肥力水平的属性系数，$x$表示不同肥力水平各指标测定值，$x_a$表示分级标准下限值，$x_p$表示分级标准上限值，$x_c$介于$x_a$和$x_p$之间。

采用修正后的内梅罗公式计算综合土壤肥力指数(IFI)：

$$IFI=\sqrt{\frac{(IFI_{i\mathrm{mean}})^2+(IFI_{i\min})^2}{2}}\times\frac{n-1}{n}$$

式中：$IFI$表示土壤综合肥力指数，$IFI_{i\mathrm{mean}}$表示土壤不同肥力水平下各评价指标均值，$IFI_{i\min}$表示土壤不同肥力水平下各评价指标的最小值，$n$表示评价指标的个数。

**1.6　数据处理**

采用Microsoft Excel处理原始数据，使用IBM SPSS Statistics 26进行单因素方差分析以及显著性检验等，利用Origin 2022绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理下黄连生长性状的差异

各施肥处理对叶片数无显著影响(表4);$T_3$、$T_4$处理下的根长与株高均优于其余处理;不同施肥处理较CK均增加了黄连植株根鲜重,分别提高了64.7%、5.6%、52.2%和40.1%。

**表4 不同施肥处理对黄连农艺性状的影响**

**Table 4 Effects of different fertilization treatments on the agronomic traits of *C. chinensis***

| 处理 Treatment | 叶片数 No. of leaves (No.·plant$^{-1}$) | 根长 Root length (cm) | 株高 Plant height (cm) | 根鲜重 Root fresh weight (g·plant$^{-1}$) | 根冠比 Root-shoot ratio |
|---|---|---|---|---|---|
| CK | 19.17±2.71a | 12.67±2.07b | 34.67±5.28bc | 6.04±1.18c | 0.96±0.18a |
| $T_1$ | 21.00±7.69a | 13.83±2.99b | 37.00±3.22abc | 9.95±3.72a | 0.95±0.34a |
| $T_2$ | 19.57±7.96a | 12.00±1.91b | 31.29±4.03c | 6.38±1.80bc | 0.79±0.22a |
| $T_3$ | 20.57±6.02a | 15.86±4.71ab | 42.00±6.63a | 9.19±2.11ab | 0.73±0.16a |
| $T_4$ | 20.00±7.80a | 18.17±2.86a | 40.50±3.21ab | 8.46±1.80abc | 0.71±0.15a |

数据为平均值±标准差($n$=3),不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著($P$<0.05)The data represent the mean±standard deviation ($n$=3), different lowercase letters indicate significant differences ($P$<0.05) among different fertilization treatments; CK: 传统化肥处理 Traditional chemical fertilizer treatment; $T_1$: 单施牛粪发酵的普通有机肥处理 Ordinary organic fertilizer treatment with only cow manure fermentation; $T_2$: 单施发酵后加入有益菌剂的有机肥处理 Organic fertilizer treatment with only cow manure fermentation and added beneficial bacterial agent; $T_3$: 普通有机肥+生物炭处理 Ordinary organic fertilizer+biochar treatment; $T_4$: 普通有机肥+有益菌剂+生物炭处理 Ordinary organic fertilizer+beneficial bacterial agent+biochar treatment; 下同 The same below.

### 2.2 不同施肥处理对黄连养分和可溶性糖积累的影响

除处理$T_2$外,$T_1$、$T_3$、$T_4$处理均可有效促进植株氮磷钾吸收,且在$T_4$处理下整株养分积累量最大,较CK分别提高了48.7%、17.7%和32.0%(表5)。不同施肥处理可溶性糖含量无显著差异,整株积累以$T_1$、$T_4$处理较佳,较CK分别增加了32.0%、23.7%。综上,有机肥配施生物炭可明显提升植株养分积累,再添有益菌剂效果更明显。

**表5 不同施肥处理对黄连植株养分及可溶性糖含量的影响**

**Table 5 Effects of different fertilization treatments on nutrients and soluble sugar of *C. chinensis***

| 处理 Treatment | 全氮 Total nitrogen | | 全磷 Total phosphorus | | 全钾 Total potassium | | 可溶性糖 Soluble sugar | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 含量 Content (g·kg$^{-1}$) | NAA (mg·plant$^{-1}$) | 含量 Content (g·kg$^{-1}$) | NAA (mg·plant$^{-1}$) | 含量 Content (g·kg$^{-1}$) | NAA (mg·plant$^{-1}$) | 含量 Content (g·kg$^{-1}$) | NAA (mg·plant$^{-1}$) |
| CK | 19.03±1.46a | 67.21±5.17b | 4.07±0.13a | 14.39±0.47b | 12.06±0.12a | 42.60±0.40c | 54.02±13.94a | 190.83±49.25ab |
| $T_1$ | 19.45±0.57a | 90.35±2.65a | 3.27±0.20c | 15.17±0.92b | 11.13±0.33b | 51.69±1.55b | 54.21±11.49a | 251.86±53.37a |
| $T_2$ | 20.62±0.46a | 66.48±1.50b | 3.67±0.32b | 11.82±1.03c | 10.89±0.21b | 35.10±0.68d | 43.06±6.81a | 138.82±21.92b |
| $T_3$ | 19.36±2.56a | 88.85±11.77a | 3.44±0.08bc | 15.76±0.37ab | 11.93±0.52a | 54.73±2.39a | 31.69±8.20a | 145.44±37.63ab |
| $T_4$ | 21.41±2.15a | 99.93±10.04a | 3.63±0.10bc | 16.94±0.46a | 12.05±0.23a | 56.25±1.07a | 50.58±17.05a | 236.06±79.55ab |

注:养分积累量(NAA, mg·株$^{-1}$)=(根茎+地上部重量)×氮(磷、钾)含量。

Note: Nutrient accumulation amount (mg·plant$^{-1}$)=(root weight+shoot weight)×nitrogen (phosphorus, potassium) content.

### 2.3 不同施肥处理下黄连土壤养分差异

$T_3$、$T_4$处理提高了土壤碱解氮含量,且在$T_3$处理下达到最大值,为155.40 mg·kg$^{-1}$(图1)。土壤有效磷、速效钾、有机质含量均在$T_4$处理下达到最大值,分别显著高于CK处理10.0%、116.4%、7.2%,表明有机肥添加菌剂及生物炭能显著促进黄连土壤速效养分积累。

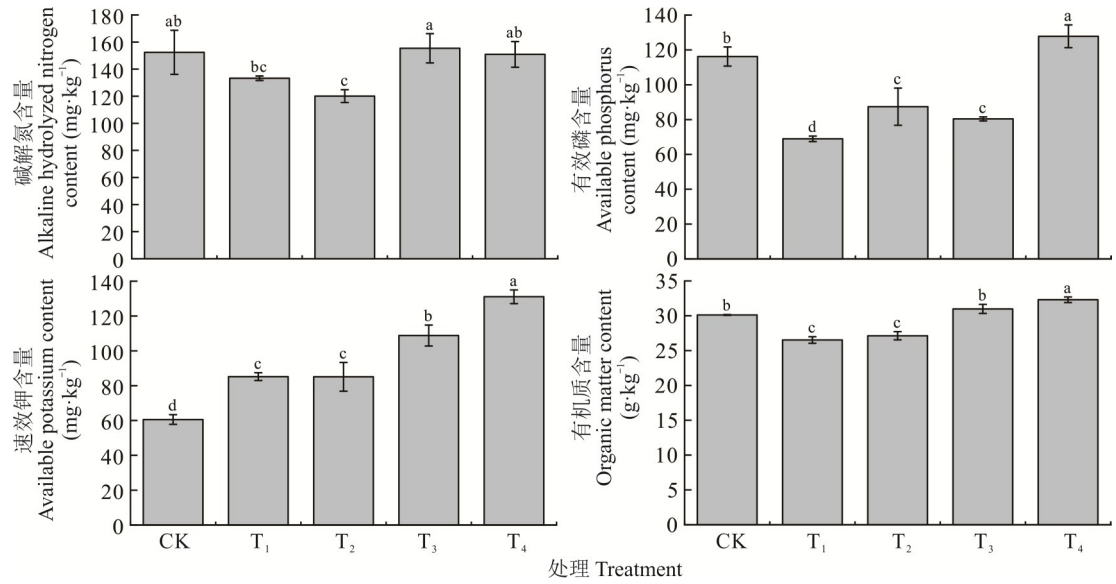


**图 1　不同施肥处理下黄连土壤的养分情况**

**Fig. 1　Nutrient status of *C. chinensis* soil under different fertilization treatments**

不同小写字母表示不同施肥处理之间差异显著（$P<0.05$），下同 Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different fertilization treatments, the same below.

## 2.4　不同施肥处理对黄连土壤 PLFA 含量及微生物多样性指数的影响

在黄连根际土壤微生物群落中，细菌的磷脂脂肪酸（PLFA）含量最高，其次是真菌和放线菌（图 2）。$T_4$ 处理下细菌 PLFA 生物标记量达最大值，较 CK、$T_1$、$T_2$ 和 $T_3$ 处理分别增加 8.9%、75.2%、76.7% 和 57.7%；真菌/细菌（F/B）在 $T_4$ 处理下有最大值，但与 CK 无显著差异。革兰氏阳性菌（G+）与革兰氏阴性菌（G−）的总量表现为 G− 含量＞G+ 含量，G− 含量在 $T_4$ 处理下具最大值，为 4.63 nmol·g$^{-1}$，G+/G− 在 $T_4$ 处理下具最小值。综上，有机肥与有益菌剂、生物炭协同施用可增加黄连根际微生物生物量。

$T_3$、$T_4$ 较其他处理降低了微生物群落 Shannon-Wiener 与 Pielou 指数（表 6），$T_1$、$T_2$ 处理 Pielou 指数较 CK 均增加了 10.3%；所有施肥处理均较 CK 提高了根际土壤的 Simpson 指数，在 $T_2$ 处理下有最大值，较 CK 增加了 20.5%。

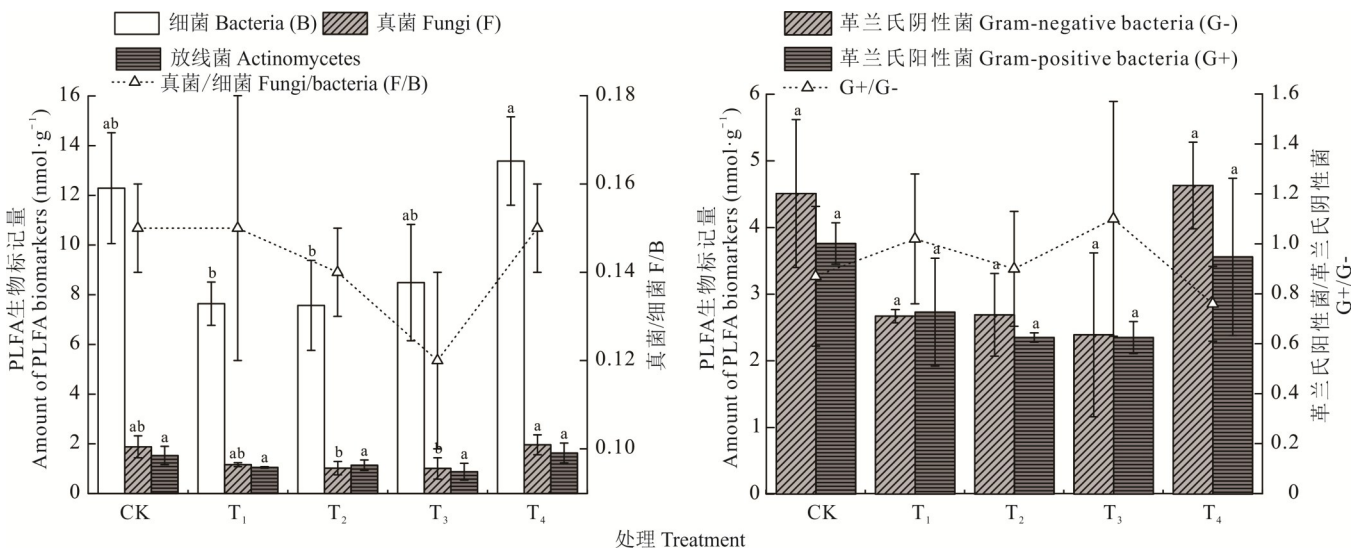


**图 2　不同施肥处理根际土壤微生物的 PLFA 类型和含量**

**Fig. 2　PLFA types and content of rhizosphere soil microorganisms in different fertilization treatments**

### 2.5 影响土壤微生物群落的主要土壤因子

土壤有效磷含量与黄连根际土壤磷脂脂肪酸(PLFA)总量极显著正相关(表7,$P<0.01$),并且也与土壤中细菌、真菌、放线菌、真核生物和革兰氏阴性菌含量显著正相关($P<0.05$)。表明影响黄连根际土壤微生物的主要土壤因子是土壤有效磷含量,总体上呈相互促进的关系。

### 2.6 施肥处理对黄连生理生长综合指数(PGCI)和土壤综合肥力指数(IFI)的影响

有机肥处理对黄连生理生长均表现为促进作用(PGCI>0),且表现为 $T_4>T_1>T_3>T_2$,表明有机肥协同有益菌剂与生物炭对黄连生长促进作用最为明显(表8)。

**表6 不同施肥处理下土壤微生物多样性指数**

**Table 6 Soil microbial diversity index under different fertilization treatments**

| 处理 Treatment | Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (*H*) | 均匀度指数 Pielou index (*J*) | Simpson指数 Simpson index (*D*) |
|---|---|---|---|
| CK | 1.44±0.00a | 0.29±0.01ab | 0.39±0.03a |
| $T_1$ | 1.47±0.02a | 0.32±0.01a | 0.45±0.07a |
| $T_2$ | 1.47±0.04a | 0.32±0.02a | 0.47±0.00a |
| $T_3$ | 1.34±0.04b | 0.29±0.01ab | 0.43±0.01a |
| $T_4$ | 1.41±0.05ab | 0.28±0.00b | 0.40±0.01a |

**表7 黄连土壤因子与根际土壤微生物群落结构之间的相关性分析**

**Table 7 Correlation analysis between soil factors and rhizosphere soil microbial community structure of *C. chinensis***

| 指标 Index | 总PLFA Total PLFA | 细菌 Bacteria | 真菌 Fungi | 放线菌 Actinomycetes | 真核生物 Eukaryotes | G+ | G− | F/B | G+/G− |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | 0.153 | 0.195 | 0.041 | −0.050 | −0.104 | −0.100 | −0.012 | −0.329 | 0.014 |
| 有机质 Organic matter | 0.737 | 0.778 | 0.609 | 0.483 | 0.456 | 0.509 | 0.594 | −0.187 | −0.347 |
| 全氮 Total nitrogen | 0.566 | 0.619 | 0.422 | 0.270 | 0.242 | 0.321 | 0.397 | −0.386 | −0.137 |
| 全磷 Total phosphorus | 0.695 | 0.720 | 0.623 | 0.506 | 0.507 | 0.630 | 0.638 | −0.083 | −0.278 |
| 全钾 Total potassium | 0.336 | 0.394 | 0.214 | 0.011 | −0.071 | 0.129 | 0.150 | −0.444 | 0.132 |
| 碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen | −0.001 | 0.064 | −0.129 | −0.347 | −0.385 | −0.151 | −0.174 | −0.776 | 0.524 |
| 有效磷 Available phosphorus | 0.963** | 0.958* | 0.920* | 0.937* | 0.943* | 0.845 | 0.948* | 0.433 | −0.869 |
| 速效钾 Available potassium | 0.200 | 0.234 | 0.084 | 0.058 | 0.040 | −0.085 | 0.054 | −0.250 | −0.162 |

PLFA: 磷脂脂肪酸 Phospholipid fatty acid; F/B: 真菌/细菌 Fungi/bacteria; G+: 革兰氏阳性菌 Gram-positive bacteria; G−: 革兰氏阴性菌 Gram-negative bacteria; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

**表8 不同施肥处理下黄连生理生长综合指数差异**

**Table 8 Differences in the physiological growth comprehensive index of *C. chinensis* under different fertilizer treatments**

| 处理 Treatment | $PGI_1$ | $PGI_2$ | $PGI_3$ | $PGI_4$ | $PGI_5$ | $PGI_6$ | $PGI_7$ | PGCI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_1$ | 0.087 | 0.063 | 0.084 | 0.393 | 0.396 | 0.022 | 0.029 | 1.074 |
| $T_2$ | 0.021 | −0.098 | −0.053 | 0.053 | 0.145 | 0.077 | −0.068 | 0.078 |
| $T_3$ | 0.068 | 0.175 | 0.201 | 0.342 | 0.434 | 0.017 | −0.315 | 0.922 |
| $T_4$ | 0.042 | 0.144 | 0.303 | 0.286 | 0.394 | 0.111 | −0.116 | 1.164 |

$PGI_1$: 叶片数 Number of leaves; $PGI_2$: 株高 Plant height; $PGI_3$: 根长 Root length; $PGI_4$: 根重 Root weight; $PGI_5$: 株重 Stock weight; $PGI_6$: 植株氮含量 Nitrogen content of plants; $PGI_7$: 植株可溶性糖含量 Soluble sugar content of plants.

土壤IFI值为1.40~1.62,有机肥处理均高于CK处理,$T_1$、$T_2$、$T_3$、$T_4$分别高于CK处理2.6%、2.3%、14.6%、15.6%(图3)。其中$T_4$处理的IFI值最大。综合所有施肥处理的IFI值,有机肥、有益菌剂及生物炭联合施用能显著增加黄连土壤的肥力。

## 3　讨论

### 3.1　施肥处理对黄连生长的影响

有机肥与化肥相比，具有更全面的营养成分和更长的肥效期，能全面促进作物生长。生物炭能增强药用植物的叶绿素合成和光合作用，并促进生长激素的分泌，有助于植物的生长[23-24]。本研究中，黄连的叶片数、根长、株高均表现为有机肥添加生物炭处理（$T_3$、$T_4$）较佳，这与张乔会等[25]对黄连叶片数及株高的研究结果相符。有机肥的施入能有效促进黄连根鲜重，较 CK 提高了 5.6%～62.7%，有较好的增产效果，这也与前人研究结果一致[8,26]。黄连根冠比表现为 CK 处理最高，可能是由于化肥处理下黄连植株矮小，反而使单位重量的植株根冠比大于有机肥处理。

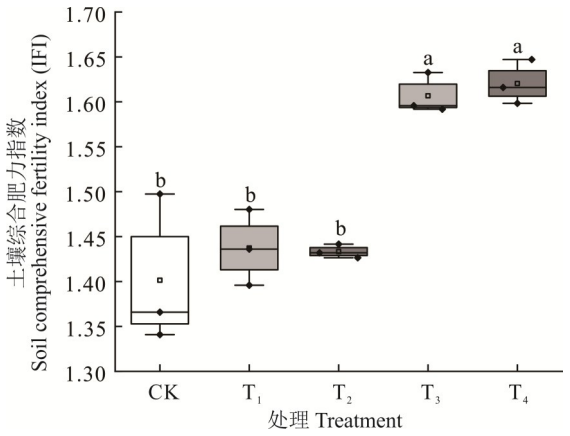


**图 3　不同施肥处理下土壤综合肥力指数**

**Fig. 3　Soil comprehensive fertility index under different fertilization treatments**

氮磷钾是植物生长必需的主要矿物质营养元素，对于植物的健康成长具有极其重要的作用[2]。研究表明，配施生物炭可显著提高水稻（*Oryza sativa*）氮、钾养分累积量[27]；生物炭施入土壤后，能显著增加黄芩（*Scutellaria baicalensis*）的氮磷钾含量[28]，在本研究中也得到了证明，$T_4$ 处理下黄连植株氮磷钾含量均最高，并显著高于 CK 处理。本研究中，CK 处理下可溶性糖含量较高，可能是因为化肥处理下黄连植株小导致可溶性糖相对浓度高，从单株全量计算可以看出，$T_4$ 和 $T_1$ 的可溶性糖浓度都高于 CK 处理。因此有机肥的应用效果可能有所不同，具体原因还有待进一步研究。

植株生理生长综合指数（PGCI）用于表征植物生长的某些特定生理特征或生长状态，本研究显示，有机肥处理对黄连生理生长均表现为积极的促进作用，且以 $T_4$ 处理最佳。

### 3.2　施肥处理对黄连土壤养分含量的影响

土壤养分是土壤理化性质和生物学特性的综合体现，直接影响土壤的生产力[29]，其中土壤速效氮、磷、钾是植物可直接吸收的关键养分[30]。长期单一植物种植会因选择性吸收土壤中的营养元素，引发土壤肥力失衡，影响后茬植物生长，造成连作障碍[31]，而适量施入有机肥则可以缓解[32]；生物炭的施用也能够提高土壤中养分的积累和利用效率[33]。本研究中，土壤碱解氮含量仅在 $T_3$ 处理下高于 CK，推测是因为生物炭中的易分解有机碳促进了土壤微生物活性，加速了有机质分解和氮的矿化[34]。土壤有效磷也仅在 $T_4$ 处理下显著高于 CK，推测生物炭虽然能够减少磷的流失[35]，但是生物炭本身带入土壤的磷含量并不如有机肥和化肥高，因此对有效磷积累效果并不显著，这与前人研究结果一致[36]。有机肥处理均对土壤速效钾含量影响显著，在 $T_4$ 处理下有最大值，可能是玉米秸秆高温焚烧后钾元素含量高，施入后减少了速效钾淋失[37]，进而能更好地为作物提供营养，这与前人研究结果一致[38]。研究表明，生物炭由于其吸附特性，与牛粪有机肥混合施用时，能够缓慢释放养分，提高土壤有机质含量[39]。在本试验中，$T_4$ 处理显著增加了土壤有机质含量，主要是因为有机肥和生物炭为黄连土壤提供了丰富的有机物质，同时生物炭在高温碳化过程中能将不稳定的碳转化为更稳定的形态，从而在土壤中形成长期稳定的有机质[40]。在本试验中，$T_1$ 及 $T_2$ 处理相较于 CK，出现了有机质含量下降的情况，推测可能是因为在短期内有机肥中微生物的分解作用可能超过了有机质的积累速度，间接影响土壤有机质的积累，因此，后续研究可考虑开展长期试验，深入探讨有机肥对黄连土壤及植株生长的持续效应。

土壤综合肥力指数（IFI）是一个用于综合评价土壤肥力水平的量化指标，能够反映土壤的综合质量特征，本研究对黄连土壤肥力进行分析评价，不同处理的 IFI 值从高到低为 $T_4$＞$T_3$＞$T_1$＞$T_2$＞CK，以 $T_4$ 处理效果最佳，表明有机肥能有效提升黄连土壤肥力，且有机肥联合有机菌剂及生物炭效果最好，主要是因为牛粪有机肥及生物炭除了富含有机质、养分全面外，其腐殖质可改良团粒结构，提升保水保肥与缓冲能力；配施有益菌剂进一步富集功能菌群，优化群落结构，三者协同实现持续培肥与地力提升，这也与余顺平等[41]的化肥减量配施有机肥具有提高

植烟(*Nicotiana tabacum*)土壤综合肥力质量的持续效应以及黄兴成等[42]的长期施用有机肥处理的水稻土壤综合肥力指数显著高于施化肥处理的研究结果一致。

### 3.3 施肥处理对黄连根际土壤微生物的影响

土壤微生物在土壤养分循环等过程中发挥关键作用[43]。根际微生物在根际微域环境中扮演着关键角色,能够帮助植物吸收土壤中的养分,从而提高植物的生长效率[44-45]。在本研究中,黄连根际土壤的微生物群落以细菌为主,但不同处理对土壤微生物群落的影响存在差异。在$T_4$处理下,土壤中的细菌和革兰氏阴性菌的数量高于CK,可能与腐熟牛粪自身携带的特有微生物相关,且有机菌剂中含大量益生菌,生物炭的多孔性也有助于土壤水分和养分的保持,促进了根系发展和微生物群落的多样性[46],这与前人研究在生物炭和微生物菌剂的作用下,土壤微生物总量、真菌和细菌含量显著增加一致[47]。进一步相关性分析可以看出,有机肥、有益菌剂及生物炭的联合施用,通过提高土壤有效磷含量,进而增加了微生物的含量,在短期内促进了植株生长并提高了生产效率。真菌与细菌的比值(F/B)是评估土壤微生物群落稳定性的一个指标,F/B越高,表明生态系统越稳定[48]。本研究中,F/B在$T_4$处理下有最大值,表明该处理能有效地改善黄连土壤的稳定性,其余处理降低了此指标,可能是由于有机肥、微生物菌剂、生物炭同时添加缓解了土壤的酸化,增加了细菌的活性[49],从而与CK相比降低了土壤中微生物的F/B。G+/G-与土壤肥力具有紧密联系,比值过高预示着营养胁迫程度越大[50]。本研究表明,黄连根际土壤中的G+/G-在$T_4$处理下有最小值,说明该施肥处理有助于改善土壤营养状况,这可能是肥料的复配提高了土壤有机质的矿化率,进一步促进了微生物的活性,从而优化了土壤的肥力水平。土壤微生物多样性特征目前广泛采用Shannon-Wiener多样性指数($H$)、Pielou均匀度指数($J$)和Simpson优势度指数($D$)表示。本研究中,尽管各处理之间的微生物多样性指数没有显著差异,但有机肥处理较CK均一定程度提高了$D$指数,$T_1$、$T_2$处理提高了$J$指数,表明在这些处理下,微生物群落中的物种数量有所增加,各个物种的个体分布更加均匀,提升了物种多样性程度,这与施用有机肥能有效提高土壤多样性指数的结果一致[51]。$T_4$处理虽显著增加了微生物数量,但其较CK处理降低了微生物多样性$H$、$J$指数,这可能是因为生物炭促进了黄连根际土壤中某些特定优势菌群的生长,后续研究可以进一步探讨微生物菌群的组成和功能,以揭示其内在机制。综上表明,有机肥、有益菌剂与生物炭的结合能显著促进黄连根际土壤中微生物群落的数量,从而提高土壤养分的利用效率。

## 4 结论

本研究结果表明,有机肥处理对黄连生长以及土壤性质的改善均表现出积极效果。单施有机肥虽能有效发挥作用,但有机肥与有益菌剂和生物炭联合施用,其效果更为突出,能够显著促进黄连植株的生长,并大幅增强其生物量;同时还能提升土壤的肥力,促进土壤中氮、磷、钾等关键养分的转化和有效利用。并能改善黄连根际土壤微生物组成结构,优化土壤生态系统的功能,为黄连的生长提供更加丰富的营养,为黄连的种植提供了科学施肥的依据。

## 参考文献 References:

[1] Du Y X, Jiang J Y, Xu Y, *et al*. Progress in studies and control strategies for diseases of *Coptis chinensis*. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(5): 1067-1072.
杜用玺, 蒋靖怡, 徐扬, 等. 黄连常见病害研究进展与防治策略. 中国中药杂志, 2021, 46(5): 1067-1072.

[2] Liu S B. The effect of fertilizers application the growth and the main active ingredients and yield of *Coptis chinensis* Franch in the late cultivation. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
刘三波. 栽培后期施肥对黄连生长及主要活性成分与产量的影响. 武汉: 华中农业大学, 2015.

[3] Zhao J H, Zhao W, Zhang M, *et al*. SWOT analysis of Shizhu *Coptis chinensis* Franch cultivation under ecological transformation. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2025, 47(3): 60-70.
赵江红, 赵微, 张敏, 等. 生态转型下石柱黄连种植的SWOT分析. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 60-70.

[4] Zeng Y, Wang X K, Zhou B, *et al*. Effects of different fertilizer treatments on nutrient content and quality of *Coptis chinensis* Franch in middle growing stage. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(5): 1924-1928.

曾烨，王学奎，周波，等．配方施肥对生长中期黄连养分和品质的影响．西南农业学报，2013，26(5)：1924－1928.

[5] Yu J J，Liu Y，Luo W H，*et al*. Research on the pollution characteristics and effective control of heavy metals in co-cultivation rice field. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2025，33(2)：374－386.
余俊杰，刘洋，罗文浩，等．稻田共作模式中重金属的污染特征及有效性控制研究．中国生态农业学报，2025，33(2)：374－386.

[6] Lu L L，Yang X Q，Zhao S X，*et al*. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth，quality of *Pogostemon cablin* and soil nutrient. Journal of Agricultural Machinery，2015，46(10)：184－191.
卢丽兰，杨新全，赵世翔，等．有机肥与化肥配施对广藿香生长、品质及土壤养分的影响．农业机械学报，2015，46(10)：184－191.

[7] Guan C L，Wang Q L，Hu X F. Effects of different fertilizers on growth，antioxidant enzyme activity and polysaccharide accumulation of *Dendrobium officinalis*. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science)，2016，35(6)：933－938.
管成林，王巧丽，胡秀芳．不同肥料对铁皮石斛生长、抗氧化酶活性及多糖积累的影响．浙江理工大学学报(自然科学版)，2016，35(6)：933－938.

[8] Tang H M. Effects of microbial fertilizer and biochar applications on the yield and quality of *Pinellia ternata* and soil microecology. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2019.
唐汉萌．微生物菌剂和生物炭对半夏产量、品质及土壤微生态的影响．武汉：华中农业大学，2019.

[9] Chen J Q，Guo D，Chen D，*et al*. The effects of biochar，organic fertilizer，and calcium magnesium phosphate fertilizer on Cd content in *Panax notoginseng*. Journal of Agro-Environmental Science，2016，35(10)：1909－1916.
陈建清，郭栋，陈德，等．生物质炭、有机肥和钙镁磷肥对三七(*Panax notoginseng*)Cd 含量的影响．农业环境科学学报，2016，35(10)：1909－1916.

[10] Yang L，Wen Z W，Fu J，*et al*. Effect of biochar on seedling and soil quality of continuous cropping *Panax ginseng*. Journal of Chinese Medicinal Materials，2020，43(4)：791－796.
杨莉，文子伟，付婧，等．生物质炭对连作参地人参种苗与土壤质量的影响．中药材，2020，43(4)：791－796.

[11] Zhou L J，Wang Y J，Xie Z K，*et al*. Improvement effect of biochar on the degraded soil of Lanzhou lily field. Journal of Desert Research，2019，39(2)：134－143.
周丽靖，王亚军，谢忠奎，等．生物炭对兰州百合(*Lilium davidii* var. unicolor)连作土壤的改良作用．中国沙漠，2019，39(2)：134－143.

[12] Geng J Z. Effects of calcium carbonate and organic matter on the organic carbon components and microbial community structure in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of highly acidic vegetable fields. Chongqing：Southwest University，2024.
耿锦沼．碳酸钙和有机物对强酸性菜地根际/非根际土壤有机碳组分及微生物群落结构的影响．重庆：西南大学，2024.

[13] Bao S D. Soil agrochemical analysis. Beijing：China Agriculture Press，2000.
鲍士旦．土壤农化分析．北京：中国农业出版社，2000.

[14] Wang X K. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments (2nd Edition). Beijing：Higher Education Press，2006.
王学奎．植物生理生化实验原理和技术(第2版)．北京：高等教育出版社，2006.

[15] Zelles L，Bai Q Y，Beck T，*et al*. Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry，1992，24：317－323.

[16] Bossio D A，Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities：Phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. Microbial Ecology，1998，35(3/4)：265－278.

[17] Ma J P，Pang D B，Chen L，*et al*. Phospholipid fatty acid analysis of soil microbes in typical vegetation types at different elevation on the east slope of Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica，2022，42(12)：5045－5058.
马进鹏，庞丹波，陈林，等．贺兰山东坡不同海拔典型植被带土壤微生物磷酸脂肪酸分析．生态学报，2022，42(12)：5045－5058.

[18] Xiang J，Fan L H，Zhang N N，*et al*. Effects of phosphorus application on soil nutrients and soil microbial community in rhizosphere of *Fargesia* under drought stress. Acta Ecologica Sinica，2021，41(23)：9422－9431.
向君，樊利华，张楠楠，等．施磷对干旱胁迫下箭竹根际土壤养分及微生物群落的影响．生态学报，2021，41(23)：9422－9431.

[19] Williamson G B，Richardson D. Bioassays for allelopathy：Measuring treatment responses with independent controls. Journal of Chemical Ecology，1988，14(1)：181.

[20] Duan Y Y, Liu X H, Wu J Q, *et al.* Effects of intercropping patterns on physiological and growth traits of *Coptis chinensis* and rhizospheric soil physicochemical properties. Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3676－3685.
段媛媛, 刘晓洪, 吴佳奇, 等. 间作模式对黄连生理生长性状及根际土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3676－3685.

[21] Wei Y, Wang S, Zhao J K, *et al.* Characteristics of nutrient distribution and comprehensive evaluation of fertility of *Zanthoxylum bungeanum* orchards soil in Chongqing. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(7): 48－58.
魏勇, 王帅, 赵敬坤, 等. 重庆花椒主产区土壤养分分布特征及综合肥力评价. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 48－58.

[22] National Soil Census Office. Chinese soil. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[23] Abideen Z, Koyro H W, Huchzermeyer B, *et al.* Ameliorating effects of biochar on photosynthetic efficiency and antioxidant defence of *Phragmites karka* under drought stress. Plant Biology, 2020, 22(2): 259－266.

[24] Jahromi N B, Fulcher A, Walker F, *et al.* Photosynthesis, growth, and water use of *Hydrangea paniculata* "Silver Dollar" using a physiological-based or a substrate physical properties-based irrigation schedule and a biochar substrate amendment. Irrigation Science, 2020, 38(3):1－12.

[25] Zhang Q H, Qin Z H, Wan H Y, *et al.* Analysis of growth index of *Coptis chinensis* Franch under different fertilizer treatments. Northern Horticulture, 2022(8): 89－94.
张乔会, 覃章辉, 万海英, 等. 不同肥料处理下黄连生长指数分析. 北方园艺, 2022(8): 89－94.

[26] Chen M. Effects of biochar and different organic fertilizers on the improvement of severe saline-alkali land and *Astragalus* growth. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
陈蒙. 生物炭及不同有机肥对重度盐碱地改良效果及黄芪生长试验研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

[27] Gu W Q, Wang Y N, Feng Z B, *et al.* Long-term effects of biochar application with reduced chemical fertilizer on paddy soil properties and japonica rice production system. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1－13.

[28] Pu Z T, Wang H, Zhao B, *et al.* Effects of different soil amendments on growth of *Scutellaria baicalensis* and soil enzyme activities in continuous cropping. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(7): 189－198.
蒲子天, 王红, 赵斌, 等. 不同土壤改良物料对连作黄芩生长及土壤酶活性的影响. 中国农业科技导报, 2024, 26(7): 189－198.

[29] Liu W K, Lei Y Z, Wang L, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizer application on growth physiology and nutrient absorption of Chinese cabbage in open fields on plateau in summer. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 340－355.
柳文凯, 雷永忠, 王莉, 等. 化肥减量配施生物有机肥对高原夏季露地大白菜生长生理及养分吸收的影响. 江西农业大学学报, 2024, 46(2): 340－355.

[30] Gao Y B, Wang S X, Wei M, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus and potassium dosage on the yield, root morphology, rhizosphere microbial quantity and enzyme activity of eggplant under substrate cultivation. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(21): 4623－4634.
郜永博, 王世显, 魏珉, 等. 氮磷钾用量对基质培茄子产量、根系形态和根际微生物数量与酶活性的影响. 中国农业科学, 2021, 54(21): 4623－4634.

[31] Chen A G, Li M J, Zhang B, *et al.* Review on catastrophe mechanism of medicinal plant and its rhizosphere microecosystem mediated by consecutive monoculture. Modern Chinese Medicine, 2016, 18(2): 239－245.
陈爱国, 李明杰, 张宝, 等. 连作介导的药用植物及其根际微生态灾变机制研究展望. 中国现代中药, 2016, 18(2): 239－245.

[32] Amini S, Asoodar M A. The effect of conservation tillage on crop yield production (The review). New York Science Journal, 2015, 8(3): 25－29.

[33] Verma B, Reddy S M. Biochar augmentation improves ectomycorrhizal colonisation, plant growth and soil fertility. Soil Research, 2020, 58(7): 673－682.

[34] Xu Y X, He L L, Liu Y X, *et al.* Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1110－1118.
许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110－

1118.

[35] Ma Z, Huang K W, Zhang Z M, *et al*. Effects of adding biochar on availability of soil phosphorus: A review. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(8): 89-96.
马珍, 黄凯文, 张珍明, 等. 添加生物炭对土壤磷素有效性影响研究进展. 东北农业大学学报, 2021, 52(8): 89-96.

[36] Liu J W. Effect of long-term biochar application with organic fertilizer on the main physicochemical and biological properties of pepper soils in facilities and biological traits of the soil. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
刘佳伟. 长期生物炭配施有机肥对设施辣椒土壤主要理化及生物学性状的影响. 南京: 南京农业大学, 2022.

[37] Fotis B, Dimitrios K, Clive R, *et al*. Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. The Science of the Total Environment, 2022, 858(P1): 159782.

[38] Yu W L. Effects of replacing chemical fertilizer with organic fertilizer on alkaloid content and rhizosphere soil microbial of *Coptis chinensis* Franch . Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
喻伟龙. 有机肥替减化肥对黄连生物碱含量及根际土壤微生物的影响. 武汉: 华中农业大学, 2022.

[39] Hamed A A, Fauziah C I, Singh D K, *et al*. Efficiency of rice husk biochar with poultry litter co-composts in oxisols for improving soil physico-chemical properties and enhancing maize performance. Agronomy, 2021, 11(12): 2409.

[40] Orlova N, Abakumov E, Orlova E, *et al*. Soil organic matter alteration under biochar amendment: Study in the incubation experiment on the Podzol soils of the Leningrad region (Russia). Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(6): 2708-2716.

[41] Yu S P, Xiong Y B, Liao T, *et al*. Comprehensive evaluation of continuous chemical fertilizer reduction with organic fertilizer application to improve soil fertility quality of planted tobacco. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(1): 70-78.
余顺平, 熊于斌, 廖涛, 等. 连续化肥减量配施有机肥提升植烟土壤肥力质量的综合评价. 中国土壤与肥料, 2024(1): 70-78.

[42] Huang X C, Yang Y H, Li Y, *et al*. Effects of long-term fertilization on integrated fertility and rice yield in yellow paddy soil. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(2): 506-515.
黄兴成, 杨叶华, 李渝, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土综合肥力和水稻产量的影响. 南方农业学报, 2023, 54(2): 506-515.

[43] Chen X, Henriksen M T, Svensson K, *et al*. Long-term effects of agricultural production systems on structure and function of the soil microbial community. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103387.

[44] Qi J J, Fu D Q, Wang X Z, *et al*. The effect of alfalfa cultivation on improving physicochemical properties soil microorganisms community structure of grey desert soil. Scientific Reports, 2023, 13(1): 13747.

[45] Li X, Cai K, Li X, *et al*. Rhizobia-legume symbiosis modulates the rhizosphere microbiota and proteins which affect the growth and development of pear rootstock. Scientia Horticulturae, 2024, 334: 113328.

[46] Wang D, Felice L M, Scow M K. Impacts and interactions of biochar and biosolids on agricultural soil microbial communities during dry and wet-dry cycles. Applied Soil Ecology, 2020, 152: 103570.

[47] Zhang K, Qiao J X, Li J S, *et al*. Effects of different restoration materials on soil physicochemical properties and microbial communities in degraded alpine grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 132-148.
张琨, 乔建霞, 李金升, 等. 不同修复材料对退化高寒草地土壤理化性质及微生物群落的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 132-148.

[48] Tessa C, Kay G P, Johannes L, *et al*. Soil fungal mycelia have unexpectedly flexible stoichiometric C∶N and C∶P ratio. Ecology Letters, 2021, 24(2): 208-218.

[49] Cao X, Liu J, Zhang L, *et al*. Response of soil microbial ecological functions and biological characteristics to organic fertilizer combined with biochar in dry direct-seeded paddy fields. Science of the Total Environment, 2024, 948: 174844.

[50] Jiang X T, Huang L H, Liu B S, *et al*. Effects of long-term fertilization on soil microbial quantity and community structure in saline sodic paddy fields. Journal of Agro-Environmental Science, 2024, 43(8): 1786-1795.
蒋小瞳, 黄立华, 刘伯顺, 等. 长期不同施肥措施对盐碱地稻田土壤微生物数量和群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2024, 43(8): 1786-1795.

[51] Zhu M Y. Effects of long-term apply organic fertilizers on physicochemical properties and microbial community of tobacco planting soil. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
朱梦遥. 长期施用有机肥对植烟土壤理化性质和微生物群落的影响. 武汉: 华中农业大学, 2022.