DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.05.006 CSTR: 32214.14.tr202501250040
刘剑剑, 王兴, 张琦, 等. 不同碳源配施对黄土丘陵区农林复合区农田土壤质量的影响. 土壤, 2025, 57(5): 995–1003.

不同碳源配施对黄土丘陵区农林复合区农田土壤质量的影响①

刘剑剑[1,2]，王　兴[1,2]，张　琦[1,2]，刘涵宇[1,2]，佟小刚[3]，任成杰[1,2]，杨改河[1,2]，韩新辉[1,2*]

(1 西北农林科技大学农学院，陕西杨凌　712100；2 陕西省循环农业工程技术研究中心，陕西杨凌　712100；3 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院，陕西杨凌　712100)

摘　要：为揭示黄土丘陵区刺槐-玉米农林复合系统中作物秸秆与枯落叶混合外源碳还田对农田土壤质量的影响，本研究基于 4 年的定位试验，以不还田处理为对照(CK)，设置 6 000 kg/hm^2 秸秆还田(Y4C0)、4 500 kg/hm^2 秸秆和 1 500 kg/hm^2 刺槐枯落叶还田(Y3C1)、3 000 kg/hm^2 秸秆和 3 000 kg/hm^2 刺槐枯落叶还田(Y2C2)、1 500 kg/hm^2 秸秆和 4 500 kg/hm^2 刺槐枯落叶还田(Y1C3)和 6 000 kg/hm^2 刺槐枯落叶还田(Y0C4)6 种处理，研究了秸秆与枯落叶以不同比例配施还田对黄土丘陵区农林复合区农田土壤质量的改良效果。结果表明：①各处理不同土层之间土壤理化和生物学性质存在差异。与 CK 相比，Y3C1 和 Y1C3 处理显著提高了 0～20 cm 土层土壤含水量、有机碳、有效磷、硝态氮以及铵态氮含量，同时该土层 β-1,4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基转肽酶活性也显著提高，3 种酶活性分别提升 55.30%～66.35%、91.41%～101.26%、24.58%～26.20%；而在 20～40 cm 和 40～60 cm 土层，各处理对土壤性质的影响较小。②与 CK 相比，Y4C0、Y3C1、Y2C2、Y1C3 处理显著提高了土壤质量指数(SQI)，其中 Y3C1 处理的提升效果最好，与 CK 相比显著提升 14.44%。③在黄土丘陵区农林复合系统农田中，土壤碱性磷酸酶活性、速效钾、硝态氮和有效磷含量是影响农田 SQI 变化的关键因子。综合分析，Y3C1 处理下 SQI 和玉米产量最高，效果最好，可推荐为适宜的秸秆与枯落叶配施还田配比，以提升该区农林复合系统中农田土壤的质量。

关键词：农林复合系统；秸秆还田；枯落叶；混合碳源；土壤质量

中图分类号：S158　　**文献标志码：**A

Effects of Different Carbon Sources on Soil Quality of Farmland in Agroforestry Complex in Loess Hilly Region

LIU Jianjian[1,2], WANG Xing[1,2], ZHANG Qi[1,2], LIU Hanyu[1,2], TONG Xiaogang[3], REN Chengjie[1,2], YANG Gaihe[1,2], HAN Xinhui[1,2*]

(1 *College of Agronomy*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi*　712100, *China*; 2 *Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture*, *Yangling*, *Shaanxi*　712100, *China*; 3 *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi*　712100, *China*)

Abstract: NIn order to reveal the effect of mixed exogenous carbon returning of crop straw and litter leaves on farmland soil quality in black locust-maize agroforestry system in Loess Hilly Region. In this study, based on a four-year positioning experiment, six treatments were set up, including 6 000 kg/hm^2 straw returning (Y4C0), 4 500 kg/hm^2 straw and 1 500 kg/hm^2 *Robinia pseudoacacia* leaf litter returning (Y3C1), 3 000 kg/hm^2 straw and 3 000 kg/hm^2 *Robinia pseudoacacia* leaf litter returning (Y2C2), 1 500 kg/hm^2 straw and 4 500 kg/hm^2 *Robinia pseudoacacia* leaf litter returning (Y1C3) and 6 000 kg/hm^2 *Robinia pseudoacacia* leaf litter returning (Y0C4), with no returning treatment as control (CK).The results showed that: 1)There were differences in soil physiochemical and biological properties among different soil layers. Compared with CK, Y3C1 and Y1C3 treatments significantly increased the contents of soil water, organic carbon, available phosphorus, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in 0–20 cm soil layer, meanwhile, the activities of β-1,4-glucosidase, N-acetyl-β-glucosaminidase and leucine aminotranspeptidase in this layer were also significantly increased by 55.30%–66.35%, 91.41%–101.26%, 24.58%–26.20%, respectively. But various treatments had little effect on soil properties in the 20–40 cm and 40–60 cm soil layers. 2)Y4C0, Y3C1, Y2C2, and Y1C3 treatments significantly increased soil quality index (SQI) compared to CK, and Y3C1

①基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFF1300405-04)和陕西省自然科学基金重点项目(2023-JC-ZD-10)资助。

* 通信作者(hanxinhui@nwsuaf.edu.cn)

作者简介：刘剑剑(1999—)，男，山西长治人，硕士研究生，主要从事土壤质量提升研究。E-mail：491433929@qq.com

treatment had the best improvement effect, which was significantly increased by 14.44% compared with CK. 3)Random forest analysis showed that soil alkaline phosphatase activity, available potassium, nitrate nitrogen and available phosphorus contents were the key factors affecting the change of SQI. Comprehensive analysis showed that SQI and maize yield were the highest under Y3C1 treatment, which can be recommended as a suitable ratio of straw and litter returning to the field to improve the quality of farmland soil in the agroforestry system in the study area.

Key words: Agroforestry systems; Straw returning; Litter leaves; Mixed carbon source; Soil quality

土壤质量是维持生态系统生产力的重要保障，直接影响植物的生长发育和产量，是农业生产的基础[1]。目前提升土壤质量的主要措施为将有机物料作为碳源进行还田，如秸秆、生物质炭和有机肥等。外源碳输入能够提高土壤养分含量，促进作物稳产增产，是保障粮食安全的重要举措[2]。农林复合生态系统中，农林业产生的外源碳常常以混合物的形式进入农田，这种混合碳源会经过土壤微生物的分解和转化形成腐殖质，进而改变土壤质量[3]，但目前对这种混合碳源对土壤质量的影响仍不清楚。

土壤质量作为土壤可持续管理的一个指标[4]，可以通过一系列物理化学、生物学指标综合评估。土壤质量的评价方法很多，主要有土壤质量指数法、灰色关联分析法和土壤质量综合评分法等，其中土壤质量指数法计算简单，应用最为广泛[5-6]。我国也曾制定《耕地质量等级》国家标准，本研究所使用的土壤质量评估体系在指标选取上与其既有相同之处，也存在差异。首先，两者都包含一些土壤基础理化性质指标，如有机碳、容重等；不同的是，本研究主要参考了多数定位试验农田土壤质量评估所采用的指标，侧重于土壤肥力方面，而《耕地质量等级》国家标准在土壤肥力指标的基础上，还增加了清洁程度、灌溉能力和排水能力等指标[7]。

土壤质量对外源碳还田的响应已被广泛研究，有研究表明玉米单作下秸秆配施有机肥能够改善土壤碳氮循环和稳定性[8]，化肥与牛粪配施能够提高土壤有机质和有效磷[9]；但也有相关研究证明秸秆还田后土壤有机碳含量并没有显著增加[10]，且会导致农田病虫草害和温室气体排放量增加[11]。综上所述，受气候因素以及微生物过程的影响，外源碳输入对农田土壤理化性质的影响并不一致，同时还会产生一些负面效应。因此，探寻更加有效的混合碳源进行还田对农林复合系统农业可持续生产能力的提升具有重要意义。

自黄土丘陵区实施退耕还林以来，经过多年的发展，该地区已经形成了耕地和林地相互交错的复合结构，呈现出农林复合镶嵌的景观模式，农林复合系统也因其经济适用性而成为治理黄土丘陵区的一项主要措施[12-13]。刺槐因其具有较强的环境适应性和耐旱性而作为一种生态恢复树种在黄土丘陵区广泛种植，并产生大量的枯落叶资源，且目前这些枯落叶富含的营养物质尚未被充分利用[14]。因此，本研究以位于黄土丘陵区农林复合区域的农田土壤为研究对象，将农林复合生态系统中产生的农林有机物料玉米秸秆与刺槐枯落叶作为外源碳源，设置不同比例的秸秆与枯落叶还田处理，探究两者配施还田对农林复合生态系统中农田土壤质量的影响，以期筛选出适宜在该生态系统中进行农田土壤培肥的最优配施比例，为优化农林复合生态系统结构及提升该地区农田土壤质量提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区五里湾流域(36°46′18″N ~ 36°46′42″N、109°13′56″E ~ 109°16′03″E)，属于典型的黄土丘陵沟壑植被恢复区，该区域属于温带大陆性半干旱季风气候，平均海拔 1 371.9 m，年均降水量、年均气温、年均日照时数分别为 525 mm、9.5 ℃、2 395.6 h；土壤类型以黄绵土为主，土质疏松，抗侵蚀能力差[15-16]。为改善生态环境，自 1999 年以来，黄土丘陵区实施了大规模的退耕还林还草工程，在经过退耕还林还草改造之后，该地区许多小流域已经形成集林地、耕地、草地的农林复合结构，形成多种农林景观配置模式[17]。

1.2 试验设计

试验开始于 2020 年 10 月，初始耕层(0 ~ 20 cm)土壤基本理化性质如下：有机碳 4.14 g/kg，全氮 0.41 g/kg，全磷 0.58 g/kg，铵态氮 1.52 mg/kg，硝态氮 12.47 mg/kg，土壤含水量 9.70%，土壤容重 1.15 g/cm^3，土壤 pH 8.58。

田间试验采用随机区组设计，试验处理为不同比例玉米秸秆与刺槐枯落叶配施还田。参考黄土高原地区前期研究，将 6 000 kg/hm^2 作为还田量设置依据，共设计 5 个不同比例处理：Y4C0(玉米秸秆：刺槐枯

落叶为 4∶0，玉米秸秆还田量 6 000 kg/hm^2)、Y3C1(3∶1，玉米秸秆 4 500 kg/hm^2、刺槐枯落叶 1 500 kg/hm^2)、Y2C2(2∶2，玉米秸秆 3 000 kg/hm^2、刺槐枯落叶 3 000 kg/hm^2)、Y1C3(1∶3，玉米秸秆 1 500 kg/hm^2、刺槐枯落叶 4 500 kg/hm^2)、Y0C4(0∶4，刺槐枯落叶 6 000 kg/hm^2)，同时设置不还田作为对照处理(CK)，每个处理设 3 个重复，每个小区面积为 20 m^2(5 m × 4 m)，小区间设 1 m 间隔。

试验供试材料玉米秸秆与刺槐枯落叶基本性质如表 1 所示。玉米秸秆于每年玉米收获后收集，并粉碎为小于 5 cm 的小段，刺槐枯落叶在农田周围刺槐林中收集，将两种还田供试材料按照上述 5 种比例混合并均匀撒施于相应的小区，人工翻埋至 30 cm 土层，并用铁耙平整土地。

表 1　试验材料玉米秸秆与刺槐枯落叶基本性质
Table 1　Basic properties of tested maize straws and *Robinia pseudoacacia* litter leaves

指标	玉米秸秆	刺槐枯落叶
有机碳(g/kg)	409.9 ± 20.13 a	419.59 ± 6.42 a
全氮(g/kg)	7.76 ± 0.13 b	15.89 ± 0.27 a
C/N	52.87 ± 2.46 a	26.42 ± 0.58 b

注：表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误；同行不同小写字母表示两种供试材料的基本性质之间差异显著(P<0.05)。

试验种植作物为春玉米，品种为先玉 335，株行距为 33 cm × 50 cm，玉米种植密度为 6 万株/hm^2(即 4 000 株/亩)。播种时间为每年 5 月中旬，收获时间为 10 月上旬。试验期间农田施用的氮、磷肥为尿素和磷酸二胺，肥料施用量为：N 225 kg/hm^2、P_2O_5 150 kg/hm^2，肥料全部以基肥一次性施入。从玉米播种后到成熟期不进行灌溉，玉米所需水分全部来自降雨，小区内的杂草人工去除。

1.3　样品采集与分析

于 2023 年 10 月玉米收获期采集土壤样品，并避开作物根系。使用土壤螺旋钻五点取样法采集 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层土样，并将各土层土壤样品充分混匀后，过 2 mm 筛去除根系、石砾等杂物。土壤样品分为两部分，一部分新鲜土壤样品保存于 4 ℃ 冰箱用于测定酶活性；另一部分自然风干用于测定土壤理化性质。

玉米产量测定：待玉米成熟后取玉米穗在实验室进行考种，为去除边际效应，样方四周 1 m 范围内不进行取样，在每个小区的中间 2 行第 4 株起依次往后取 9 株，共取 2 行一共 18 穗玉米，测定其产量构成因素，最终折算为含水率 14% 的籽粒产量。

1.4　土壤性质测定

采用环刀法测定土壤容重(BD)和总孔隙度(SP)；土壤含水量(SWC) 采用烘干法测定；土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾–浓硫酸外加热法测定；土壤全氮(TN)采用凯氏法消解，流动分析仪测定；土壤全磷(TP) 采用浓硫酸–高氯酸消解，流动分析仪测定；硝态氮(NO_3^--N)和铵态氮(NH_4^+-N)采用氯化钾溶液浸提法测定；土壤有效磷(AP)和速效钾(AK)分别采用 NaOH 浸提–钼锑抗比色法和醋酸铵提取–火焰光度法测定[18]。

土壤酶活性采用荧光底物法测定[19]，共测定 4 种与 C、N、P 循环相关的酶，所测定酶的具体信息见表 2。测定的简要步骤为：称取 1 g 新鲜土样加入去离子水 125 mL，置于 180 r/min 的摇床上振荡 2 h 使溶液均质化；在样品微孔、空白微孔、淬火标准微孔分别加入底物(200 μmol/L，50 μL)、去离子水(50 μL)和标准物质(50 μL)，同时将 50 μL 底物和 200 μL 去离子水加入阴性对照微孔中，参考标准微孔中加入 50 μL 标准物质和 200 μL 去离子水，然后加入均质化的悬浊液，完成上述操作后将微孔板放置于 25 ℃的黑暗条件下培养 4 h；之后加入 10 μL 0.5 mol/L NaOH 结束反应，随后用酶标仪测定荧光值；激发光和检测波长分别为 365 和 450 nm[20]。

表 2　4 种土壤胞外酶的基础信息
Table 2　Basic information of four kinds of soil extracellular enzymes

酶名称	缩写	底物	酶活性单位
β-1,4-葡萄糖苷酶	BG	4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡萄糖苷	nmol/(g·h)
β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	NAG	4-甲基伞形酮酰-β-D-吡喃葡糖酸苷	nmol/(g·h)
亮氨酸氨基转肽酶	LAP	L-亮氨酸-7-氨基-4-甲基香豆素盐酸盐	nmol/(g·h)
碱性磷酸酶	ALP	4-甲基伞形酮磷酸酯	nmol/(g·h)

1.5　土壤质量评价

1.5.1　指标得分和权重　　将所有指标纳入土壤质量的评价体系构建总数据集(TDS)。为使不同单位的各土壤指标具有可比性，运用线性评分模型将指标值转化为 0 ~ 1 之间的分值[21-22]。根据土壤指标对土壤生产力和土壤质量的影响，将土壤指标分为 2 类，当指标值越大土壤质量越高时，采用“越多越好”型评分函数，而指标值越大土壤质量越低时，使用“越少

越好”型评分函数，公式如下[23]：

$$S_L=\frac{X}{\max(X)} \tag{1}$$

$$S_L=\frac{\min(X)}{X} \tag{2}$$

式中：S_L 为土壤指标的线性得分(0 ~ 1)；X 为测得的土壤指标值；max(X) 和 min(X) 为测得的土壤指标中的最大值和最小值。公式(1)为“越多越好”型指标评分函数，公式(2)为“越少越好”型指标评分函数。

根据指标的公因子方差计算各指标在 TDS 中的权重(W_i),即各指标的公因子方差占 TDS 指标公因子方差总和的比例。

1.5.2 土壤质量指数 采用加权求和的方法进行土壤质量指数的计算，公式如下[24-25]：

$$\text{SQI}=\sum_{i=1}^{n}W_i\times S_i$$

式中：SQI 为土壤质量指数；W_i 为 TDS 中第 i 个指标的权重；S_i 表示 TDS 中第 i 个指标的线性得分；n 为 TDS 中的指标数量。

1.6 数据统计分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 检验分析不同处理下土壤的理化性质、生物学性质、SQI 和玉米产量的差异显著性；主成分分析用于计算各指标的公因子方差；使用 R(4.3.2)软件的 randomForest 包和 rfPermute 包进行随机森林模型分析，探究影响土壤质量的关键因子；通过线性回归模型分析 SQI 与玉米产量的关系。方差分析和主成分分析在 SPSS 27.0 中进行，Origin2024b 用于绘图。

2 结果与分析

2.1 不同碳源配施还田对土壤理化性质及生物学性质的影响

不同碳源配施还田下土壤理化性质的变化特征如表 3 所示，各处理土壤 SOC、TN、AP、NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量随着土壤深度的增加而降低。在 0 ~ 20 cm 土层，与 CK 相比，Y3C1 和 Y1C3 处理显著提高了 SWC；Y4C0、Y3C1 和 Y1C3 处理的 SOC 含量显著增加,增幅分别为 18.37%、29.59% 和 18.88%；Y1C3 处理的 AP 含量显著增加，为 13.63 mg/kg，增幅为 44.69%；Y3C1 和 Y1C3 处理下 NO_3^--N 含量显著增加,增幅分别为 45.45% 和 48.86%。在 20 ~ 40 cm

表 3 不同碳源配施还田下土壤理化性质变化特征

Table 3 Changes in soil physicochemical properties under different proportions of straw and dead leaves returning to field

处理	土层 (cm)	SWC (%)	BD (g/cm^3)	SP (%)	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	NO_3^--N (mg/kg)	NH_4^+-N (mg/kg)
CK	0 ~ 20	11.02 BCab	1.28 ABb	51.56 ABa	1.96 CDa	0.25 Ba	0.65 Aa	9.42 BCa	166.21 ABa	1.76 Ca	3.48 Ca
	20 ~ 40	11.45 Aa	1.39 Aa	47.39 Ab	1.22 Ab	0.17 Ab	0.54 Cb	2.07 Ab	92.66 Bb	0.60 Ab	2.22 ABb
	40 ~ 60	10.39 Ab	1.43 Aa	46.22 Ab	0.68 Bc	0.16 Ab	0.51 Bc	1.19 Ab	91.93 Ab	0.04 Bb	1.64 Bb
Y4C0	0 ~ 20	11.88 ABa	1.29 ABa	51.36 ABa	2.32 ABa	0.25 Ba	0.61 Aa	8.91 Ca	172.1 ABa	1.89 Ca	3.86 ABCa
	20 ~ 40	11.92 Aa	1.36 Aa	48.82 Aa	1.28 Ab	0.21 Aa	0.55 ABCb	1.96 Ab	97.57 ABb	0.71 Ab	2.55 ABa
	40 ~ 60	10.88 Aa	1.35 Aa	49.03 Aa	1.20 ABb	0.19 Aa	0.54 Ab	1.22 Ab	89.23 Ab	0.49 Ab	2.39 Aa
Y3C1	0 ~ 20	12.43 Aa	1.24 Bb	53.05 Aa	2.54 Aa	0.28 Aa	0.64 Aa	12.95 ABa	182.39 Aa	2.56 ABa	4.73 ABa
	20 ~ 40	11.69 Aa	1.39 Aa	47.40 Ab	1.15 Ab	0.20 Aab	0.56 ABb	2.19 Ab	103.69 ABb	0.28 Ab	2.84 ABb
	40 ~ 60	10.31 Ab	1.40 Aa	47.21 Ab	0.99 ABb	0.17 Ab	0.54 Ab	1.27 Ab	104.43 Ab	0.08 Bb	2.36 Ab
Y2C2	0 ~ 20	11.94 ABa	1.29 ABb	51.28 ABa	2.22 BCa	0.23 Ba	0.63 Aa	11.74 ABCa	169.89 ABa	2.16 ABCa	4.03 ABCa
	20 ~ 40	10.60 Aa	1.40 Aab	47.00 Aab	1.37 Aa	0.21 Aa	0.54 BCb	1.93 Ab	104.43 ABb	0.26 Ab	2.12 Bb
	40 ~ 60	10.15 Aa	1.43 Aa	46.11 Ab	1.32 Aa	0.14 Aa	0.53 ABb	1.35 Ab	93.15 Ab	0.26 ABb	1.62 Bb
Y1C3	0 ~ 20	12.28 Aa	1.25 Bb	52.94 Aa	2.33 ABa	0.25 Ba	0.66 Aa	13.63 Aa	168.42 ABa	2.62 Aa	4.95 Aa
	20 ~ 40	10.60 Ab	1.45 Aa	45.45 Ab	1.26 Ab	0.18 Aab	0.54 BCb	1.96 Ab	105.17 Ab	0.29 Ab	2.99 Ab
	40 ~ 60	10.30 Ab	1.45 Aa	45.33 Ab	1.26 ABb	0.13 Ab	0.55 Ab	1.27 Ab	93.64 Ab	0.15 Bb	2.22 ABc
Y0C4	0 ~ 20	10.24 Ca	1.38 Aa	48.04 Ba	1.91 Da	0.24 Ba	0.61 Aa	12.56 ABa	139.73 Ba	2.01 BCa	3.55 BCa
	20 ~ 40	10.23 Aa	1.41 Aa	46.71 Aa	1.30 Ab	0.14 Ab	0.57 Aab	1.55 Ab	100.75 ABb	0.26 Ab	2.49 ABb
	40 ~ 60	9.76 Aa	1.41 Aa	46.67 Aa	1.13 ABb	0.13 Ab	0.54 Ab	1.47 Ac	96.09 Ab	0.02 Bb	1.94 ABb

注：表中数据均为 3 次重复的平均值；同列小写字母不同表示相同处理不同土层间差异显著(P<0.05)，同列大写字母不同表示相同土层不同处理间差异显著(P<0.05)。下表同。

土层，Y1C3 处理 AK 含量相比于 CK 处理显著增加 13.50%。在 40 ~ 60 cm 土层，与 CK 相比，Y2C2 处理的 SOC 显著增加 94.11%，Y4C0 处理的 NO_3^--N 含量和 NH_4^+-N 含量显著增加(P<0.05)。

土壤胞外酶活性在不同碳源配施还田下的变化特征如表 4 所示。在 0 ~ 20 cm 土层，与 CK 相比，Y4C0、Y3C1、Y2C2、Y1C3 和 Y0C4 处理均显著提高 BG 活性(P<0.05)，增幅分别为 66.41%、34.54%、59.98%、55.30% 和 44.98%；Y4C0、Y3C1、Y1C3 处理 NAG 活性显著提高，由 CK 处理的 1.28 nmol/(g·h) 分别提升至 3.28、2.45 和 2.58 nmol/(g·h)；Y2C2 处理 LAP 活性提升最大，显著提升 29.78%；ALP 活性在 Y3C1 和 Y2C2 处理中显著提高。在 20 ~ 40 cm 土层，与 CK 相比，仅在 Y3C1 处理下 ALP 活性显著提高 56.04%。在 40 ~ 60 cm 土层，与 CK 相比，BG、NAG 活性在 Y4C0 处理中显著提高；Y1C3 处理 LAP 活性显著提高，由对照处理的 47.8 nmol/(g·h) 提升至 62.14 nmol/(g·h)，提升 30%。

表 4　不同碳源配施还田下土壤酶活性变化特征

Table 4　Soil enzyme activities under different proportions of straw and dead leaves returned to field

处理	土层(cm)	BG(nmol/(g·h))	NAG(nmol/(g·h))	LAP(nmol/(g·h))	ALP(nmol/(g·h))
CK	0 ~ 20	25.59 Ca	1.28 Ca	86.22 Ca	52.98 Ca
	20 ~ 40	3.17 Ab	0.27 ABb	65.78 ABb	25.21 Bb
	40 ~ 60	0.57 Bb	0.17 Bb	47.80 BCc	15.76 ABc
Y4C0	0 ~ 20	42.57 Aa	3.28 Aa	95.77 BCa	64.31 BCa
	20 ~ 40	2.90 Ab	0.40 Ab	74.59 Ab	27.71 Bb
	40 ~ 60	2.72 Ab	0.60 Ab	60.51 ABc	19.05 ABb
Y3C1	0 ~ 20	34.43 Ba	2.45 ABa	108.81 ABa	79.29 Aa
	20 ~ 40	3.41 Ab	0.33 Ab	56.40 Cb	39.46 Ab
	40 ~ 60	1.81 ABb	0.13 Bb	52.18 ABCb	19.43 Ac
Y2C2	0 ~ 20	40.94 ABa	1.33 Ca	116.00 Aa	75.92 ABa
	20 ~ 40	3.18 Ab	0.15 Bb	62.19 BCb	21.07 Bb
	40 ~ 60	1.27 Bb	0.07 Bb	42.26 Cc	16.63 ABb
Y1C3	0 ~ 20	39.74 ABa	2.58 ABa	107.41 ABa	63.93 BCa
	20 ~ 40	4.25 Ab	0.17 Bb	74.40 Ab	20.54 Bb
	40 ~ 60	1.62 ABb	0.10 Bb	62.14 Ab	10.90 Bb
Y0C4	0 ~ 20	37.1 ABa	2.19 BCa	106.18 ABa	61.11 Ca
	20 ~ 40	3.24 Ab	0.16 Bb	67.32 ABb	21.21 Bb
	40 ~ 60	1.70 ABb	0.04 Bb	58.79 ABb	15.87 ABb

2.2　不同碳源配施还田对土壤质量指数(SQI)的影响

对 TDS 中的指标进行主成分分析，得到各指标的公因子方差和权重，其中 BG 活性的公因子方差为 0.923，在所有指标中最大，权重为 0.080。

根据表 5 的土壤指标权重计算各处理下的 SQI 值。由图 1 可知，相比于 CK，Y4C0、Y3C1、Y2C2 和 Y1C3 处理 SQI 值显著提高。其中，Y3C1 的 SQI 值最高，相比于 CK 提升 14.44%；其次是 Y4C0，提升 13.30%；Y2C2 的提升效果最差，仅提升 3.90%。同时，Y4C0、Y3C1 和 Y1C3 的 SQI 值差异不显著，但都显著高于 Y2C2 和 Y0C4 处理(P<0.05)。

2.3　不同碳源配施还田对玉米产量的影响

由图 2 可知，Y3C1 处理的玉米产量最高，为 8 005.29 kg/hm^2，与 CK 相比显著增加 11.50%(P<0.05)，其他处理产量虽有所增加，但是差异不显著(P>0.05)。结果表明，不同碳源配施还田能够促进玉米稳产增产，且秸秆与枯落叶以 3∶1 的比例还田对玉米的增产效果最好。

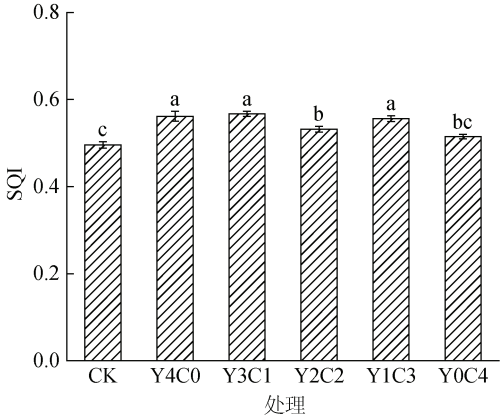
2.4　SQI 的主要驱动因子

通过随机森林模型对 SQI 的影响因子进行筛选，如图 3 所示。结果表明，影响 SQI 变异的前 4 个主导因子分别为：ALP(14.73%)、AK(13.60%)、NO_3^--N(12.57%)和 AP(11.32%)，4 个指标都对 SQI 影响显著(P<0.05)。整体来看，ALP 和速效养分是影

表 5 公因子方差、权重值

Table 5 Common factor variance, weight values

指标	总数据集(TDS)	
	公因子方差	权重
SWC	0.377	0.033
BD	0.874	0.076
SP	0.915	0.079
SOC	0.851	0.074
TN	0.589	0.051
TP	0.833	0.072
AP	0.914	0.079
AK	0.876	0.076
NH_4^+-N	0.832	0.072
NO_3^--N	0.912	0.079
BG	0.923	0.080
NAG	0.829	0.072
LAP	0.88	0.076
ALP	0.914	0.079



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下图同)

图 1 不同碳源配施还田下土壤质量指数(SQI)变化特征

Fig. 1 Soil quality indexes (SQIs) under different proportions of straw and dead leaves returned to field

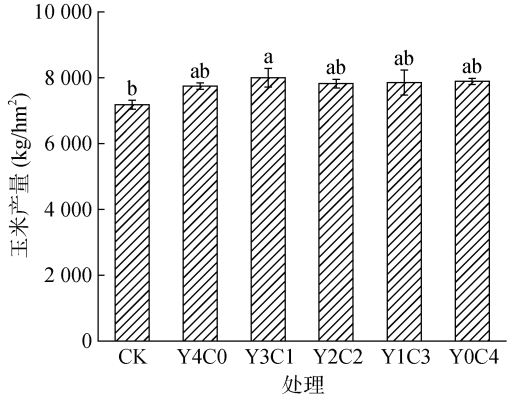
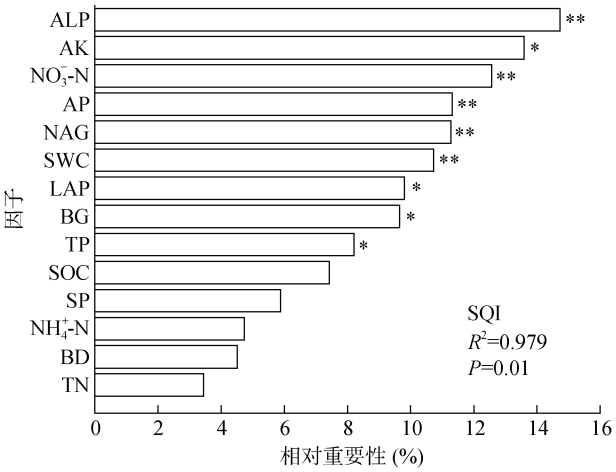


图 2 不同碳源配施还田下玉米产量变化特征

Fig. 2 Maize yields under different proportions of straw and dead leaves returned to field

响黄土丘陵区农林复合区域农田土壤质量的主要驱动因子，测定的土壤指标能解释 SQI 变化的 97.9%。



(*、**分别表示影响达 $P<0.05$、$P<0.01$ 显著水平)

图 3 随机森林模型筛选的影响 SQI 的因子

Fig. 3 Factors affecting SQI screened by the random forest model

为进一步探讨不同碳源配施还田下玉米产量与 SQI 之间的关系，对两者进行线性回归模型分析。如图 4 所示，线性回归模型的 R^2 为 0.385 8，SQI 与玉米产量呈显著正相关($P<0.05$)，随着 SQI 的提升，玉米产量显著增加。

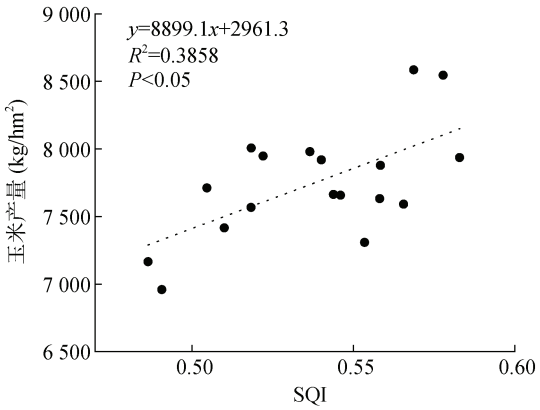


图 4 不同碳源配施还田下 SQI 和玉米产量的相关性

Fig. 4 Correlations between SQI and maize yield under different proportions of straw and dead leaves returned to field

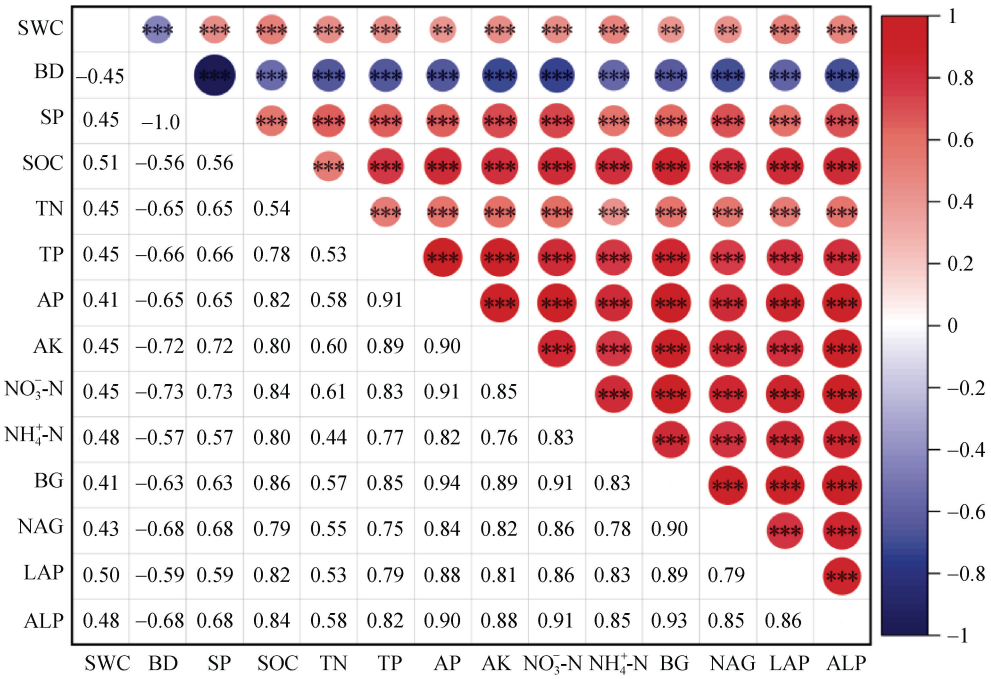
3 讨论

3.1 土壤理化性质及生物学性质对不同碳源配施还田的响应

本研究中，将玉米秸秆和枯落叶以 1∶3 和 3∶1 质量配比进行还田均能有效提升土壤含水量，起到一定保水作用，这与 Li 等[26]的研究结果相一致。主要原因是混合碳源在土壤中分解时，会形成腐殖

质，这些腐殖质有助于土壤团粒结构的形成，有利于存储水分，从而改善土壤的物理性质[27-28]。而玉米秸秆和枯落叶 0∶4 配施处理土壤含水量最低，原因可能是低 C/N 混合碳源还田会加剧微生物活动，从而消耗更多的土壤水分用于细胞代谢和物质转运[29]。

秸秆中含有大量的营养成分，大量研究表明混合碳源还田能够显著提高土壤中的养分含量以及土壤酶活性[30]，本研究也得到了相同的结论。与对照处理相比，不同配比的秸秆与枯落叶还田均不同程度地提高了土壤全效养分和速效养分含量，但整体来看土壤速效养分提升幅度更大。混合碳源还田后，养分会经过微生物的分解作用迅速转化为植物可直接吸收利用的速效养分[31]。同时，不同比例秸秆与枯落叶配施还田后土壤酶活性相比于对照处理增强，造成这一现象的原因可能是有机物料为土壤中的微生物提供了充足的养分来源，促进了微生物的生长和繁殖[32]。图 5 中 4 种土壤胞外酶活性与有机碳、全磷等指标之间具有极显著正相关关系也证明了这点。土壤酶主要来源于微生物的细胞分泌物和残体分解物，微生物数量的增加直接导致土壤酶活性的提高[33]。



(*、**、***分别表示相关性达 $P<0.05$、$P<0.01$、$P<0.001$ 显著水平)

图 5　不同碳源配施还田下各指标的 Pearson 相关性

Fig. 5　Pearson correlation coefficients of various indexes under different proportions of straw and dead leaves returned to field

3.2　SQI 对不同碳源配施还田的响应

土壤质量指数(SQI)是一个综合指标，用于评估土壤的物理、化学和生物特性，以及这些特性对作物生长和环境保护的支持能力[34-35]。本研究结果表明，秸秆与枯落叶配施还田能够提高 SQI 值，这主要是由于秸秆与枯落叶配施还田不同程度地改善了土壤理化性质和生物学性质。此外，混合碳源还田会通过促进作物的生长增加根系分泌物和凋落物的数量，从而促进土壤养分的积累[36]。

随机森林模型结果表明，碱性磷酸酶和速效养分是影响土壤质量变化的主要驱动因子。碱性磷酸酶能促进植物对磷元素的吸收和利用，代表土壤磷库的供应，碱性磷酸酶活性越大，表明土壤磷元素的供应能力越强[37]。速效养分能够直接被植物吸收，植物的生长也能通过凋落物和根系分泌物的作用提高土壤养分含量，促进土壤质量的提升[38-39]。因此，提高土壤中参与磷循环的微生物活性和土壤速效养分是提升该地区 SQI 的主要途径。

3.3　不同碳源配施还田下 SQI 和玉米产量的关系

混合碳源还田能够提高土壤质量，从而影响植物的养分供应，促进作物产量提升。线性回归模型表明 SQI 与玉米产量呈显著正相关，说明玉米产量受土壤质量的影响，主要有两方面的原因：① 混合碳源配施还田改善了土壤含水量，提高了土壤

养分含量，从而促进了玉米生长，提高了玉米产量[40]；②土壤质量的提高可能会增强玉米对气候变化的抵抗力[41]。在本研究中，SQI 解释了玉米产量 38.58% 的差异，表明 SQI 并不是限制玉米产量的单一因素，例如降水、温度也会影响产量。玉米产量对混合碳源还田的响应差异受气候、土壤类型和种植制度的影响[42]。

4 结论

4 年的定位试验表明，秸秆与枯落叶配施还田能够改善农林复合生态系统中农田土壤的理化及生物学性质，提高土壤质量和玉米产量。其中，与不还田处理相比，将 4 500 kg/hm^2 秸秆和 1 500 kg/hm^2 枯落叶进行配施还田，即以 3∶1 的质量比例进行还田，能够显著提升土壤质量与玉米产量，且效果最佳。因此，推荐使用此秸秆与枯落叶的还田比例作为黄土丘陵区农林复合系统中农田适宜的土壤培肥措施。同时，利用随机森林模型得出该地区驱动农田土壤质量改变的关键因子是土壤碱性磷酸酶活性、速效钾、硝态氮和有效磷，应重点监测这几项指标，以制定合理措施提升该地区土壤质量。

参考文献：

[1] 吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 537–544.

[2] 王飞, 王利民, 何春梅, 等. 紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增效中的作用[J]. 土壤, 2022, 54(3): 455–463.

[3] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3594–3603.

[4] Li P, Wu M C, Kang G D, et al. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J]. Geoderma, 2020, 373: 114416.

[5] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043–3056.

[6] Wan P X, Zhou Z K, Yuan Z Q, et al. Fungal community composition changes and reduced bacterial diversity drive improvements in the soil quality index during arable land restoration[J]. Environmental Research, 2024, 244: 117931.

[7] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 耕地质量等级: GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[8] Dămătîrcă C, Moretti B, Bertora C, et al. Residue incorporation and organic fertilisation improve carbon and nitrogen turnover and stabilisation in maize monocropping[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 342: 108255.

[9] 宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 等. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 103–108.

[10] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 344–350.

[11] 蔡文倩, 周丽, 余婷, 等. 农业有机废物还田利用促进土壤健康和应对气候变化的路径及研究建议[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1532–1540.

[12] 刘滨. 渭北黄土区不同核桃农林复合系统化感作用及其外生菌根群落研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[13] 唐夫凯, 齐丹卉, 卢琦, 等. 中国西北地区农林复合经营的保护与发展[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1429–1439.

[14] 李文杰. 不同碳源配施下农田土壤有机碳库特性与酶活性的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[15] Zhong Z K, Li W J, Lu X Q, et al. Adaptive pathways of soil microorganisms to stoichiometric imbalances regulate microbial respiration following afforestation in the Loess Plateau, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 151: 108048.

[16] 王佳懿, 王兴, 王源茁, 等. 降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4689–4697.

[17] 邓健. 陕北黄土丘陵区典型退耕流域农林景观配置模式综合评价及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[19] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1309–1315.

[20] 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 等. 模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2812–2821.

[21] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 25–45.

[22] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. Ecological Indicators, 2017, 75: 307–320.

[23] Yu P J, Han D L, Liu S W, et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland[J]. Catena, 2018, 171: 280–287.

[24] Mi W H, Sun T, Ma Y Y, et al. Higher yield sustainability and soil quality by manure amendment than straw returning under a single-rice cropping system[J]. Field Crops Research, 2023, 292: 108805.

[25] Ma J F, Chen Y P, Zhou J, et al. Soil quality should be accurate evaluated at the beginning of lifecycle after land

consolidation for eco-sustainable development on the Loess Plateau[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 122244.

[26] Li Y H, Feng X J, Huai Y B, et al. Enhancing crop productivity and resilience by promoting soil organic carbon and moisture in wheat and maize rotation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 368: 109021.

[27] 刘谣, 焦泽彬, 谭波, 等. 川西亚高山森林凋落物去除对土壤腐殖质动态的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 330–339.

[28] 朱万泽, 盛哲良, 舒树淼. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 205–212.

[29] Cai G, Shahbaz M, Ge T D, et al. Root exudates with low C/N ratios accelerate CO_2 emissions from paddy soil[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(8): 1193–1203.

[30] Huang J, Wang X Y, Yang L L, et al. Analysis of tobacco straw return to the field to improve the chemical, physical, and biological soil properties and rice yield[J]. Agronomy, 2024, 14(5): 1025.

[31] 邵满娇, 窦森, 谢祖彬. 等碳量玉米秸秆及其腐解、炭化材料还田对黑土腐殖质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2202–2209.

[32] Liu B, Arlotti D, Huyghebaert B, et al. Disentangling the impact of contrasting agricultural management practices on soil microbial communities–Importance of rare bacterial community members[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 166: 108573.

[33] Liu G C, Wang H, Yan G Y, et al. Soil enzyme activities and microbial nutrient limitation during the secondary succession of boreal forests[J]. Catena, 2023, 230: 107268.

[34] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1360–1373.

[35] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality–A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105–125.

[36] 徐文静, 张宇亭, 魏勇, 等. 长期施肥对稻麦轮作紫色土有机碳组分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 292–299.

[37] Wang L J, Luo N N, Shi Q L, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and enzyme activities to long-term vegetation restorations in the karst ecosystems, Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2023, 194: 107034.

[38] 郭嘉, 徐化凌, 张明乾, 等. 6 种典型盐生植物生长对盐土养分的作用研究[J]. 林业资源管理, 2019(3): 107–112.

[39] Jiang P, Wang Y Z, Zhang Y P, et al. Intercropping enhances maize growth and nutrient uptake by driving the link between rhizosphere metabolites and microbiomes[J]. New Phytologist, 2024, 243(4): 1506–1521.

[40] 杨凯, 杜延全, 张西兴, 等.有机物料与化肥配施提升土壤肥力、养分利用和玉米产量研究[J].中国土壤与肥料, 2024(4): 76–82.

[41] Dai X L, Song D L, Zhou W, et al. Partial substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen improves rice yield, soil biochemical indictors and microbial composition in a double rice cropping system in South China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104753.

[42] Hou P, Liu Y E, Liu W M, et al. Quantifying maize grain yield losses caused by climate change based on extensive field data across China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 174: 105811.