

有机物料对宅基地复垦土壤培肥效果评价^①

刘子骁, 邓良基*, 周伟, 陈露丹, 邹光基

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:以成都平原宅基地复垦土壤为研究对象, 设空白对照(CK)、常规化肥(CF)、全量秸秆还田(T1)、高量秸秆还田(T2)、全量菌渣还田(T3)、高量菌渣还田(T4)、全量猪粪还田(T5)、高量猪粪还田(T6)共 8 个处理, 研究复垦宅基地耕作层(0~20 cm)土壤容重、孔隙度、酸碱度、总有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾共 10 个指标的变化并开展综合评价。秸秆、菌渣、猪粪 3 种农业废弃物与化肥配施处理下宅基地复垦土壤的物理性状得到改善, 总有机碳、全磷、碱解氮、有效磷与速效钾含量显著提高($P<0.05$)。总有机碳及全量养分变化结果表明, T6 处理提升效果最优; 速效养分变化结果以 T4 处理提升效果最佳; 综合肥力评价结果表明, T4 处理提升效率最高, 年均提升 0.385 级肥力。高量菌渣还田(T4)处理推荐为最优培肥方案: 小麦季施菌渣 8 507 kg/hm²、尿素 307 kg/hm²、过磷酸钙 825 kg/hm²、氯化钾 38 kg/hm², 玉米季施菌渣 9 411 kg/hm²、尿素 324 kg/hm²、过磷酸钙 925 kg/hm²、氯化钾 172 kg/hm²。

关键词:复垦土地; 农业废弃物还田; 综合肥力评价

中图分类号: S154.1; X171.3 **文献标识码:** A

我国作为耕地资源约束型国家, 长久以来面临耕地面积不足和后备资源匮乏的严峻问题^[1]。然而, 近年来随着城镇化发展和新农村建设的推进, 农村宅基地被废弃闲置的现象日趋严重^[2-3], 为耕地资源补充提供了一条现实的可行途径^[3]。但是, 由于宅基地土壤结构破坏、养分状况差, 导致部分功能和特性丧失, 生产能力较低, 该类复垦地亟待通过培肥措施以便快速提升地力^[4]。

据相关统计, 我国年产秸秆 7.2×10^8 t^[5]、菌渣 1.1×10^8 t^[6]以及猪粪 1.2×10^9 t^[7]。这些农业废弃物能显著改善土壤结构, 增加作物产量^[8-9], 是常规中低产土壤快速提升肥力的重要措施。然而, 其利用率均较低^[10-11], 特别在宅基地复垦上仅有少量利用报道, 且鲜见系统的对比研究。因此, 利用农业废弃物对复垦宅基地进行培肥改良具有较大潜力。同时, 现有研究多着重分析农业废弃物对宅基地复垦土壤中单个或少量指标的影响^[12-13]; 而考虑土壤各项理化特征及养分含量, 对其肥力进行综合评价的研究鲜见报道。

成都平原是我国人口高度密集的地区, 近年来由于区域经济迅猛发展, 大型社区和中心村建设明显加快, 部分被废弃闲置的原农村宅基地已复垦成耕地^[14]。

然而, 因缺乏复垦后的快速培肥技术及评价方法, 其生产潜力尚待提升。崇州市位于成都平原西部, 属于我国重要商品粮产区, 但其农村空心化率达到 8.87%^[15], 当地宅基地仍具备一定复垦潜力, 且对复垦后提升地力需求较大。

本研究以崇州市中南部一处复垦宅基地作为研究对象, 拟分析秸秆、菌渣、猪粪 3 种农业废弃物与化肥的不同配施处理对宅基地土壤多项肥力指标的影响, 对各处理下复垦土壤作综合肥力评价, 探究农业废弃物配施化肥对土壤综合肥力提升效果, 进而推荐快速提升土地整体肥力的培肥方案, 为成都平原宅基地复垦快速培肥提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验地位于成都崇州市杞泉镇四川农业大学现代农业研发基地(30°33'27"N、103°38'34"E)。试验区属亚热带湿润季风气候, 年均气温 15.9 °C, 年均无霜期为 285 d, 年均日照时数 1 161.5 h, 年均降雨量 1 012.4 mm。供试土壤类型为黄壤。试验田为农村宅基地客土工程复垦, 土层厚度大于 40 cm。复垦两年

基金项目: 四川省科技计划项目(2018NZZJ004, 2019YFN0020, 2016JY0166)资助。

* 通讯作者(auh6@sicau.edu.cn)

作者简介: 刘子骁(1998—), 男, 四川雅安人, 本科, 主要从事农业废弃物还田研究。E-mail: 1317738401@qq.com

后测得其耕层(0 ~ 20 cm)土壤容重 1.33 g/cm³, 孔隙度 0.50, pH 6.65, 总有机碳 14.21 g/kg, 全氮 0.75 g/kg, 全磷 0.47 g/kg, 全钾 13.34 g/kg, 碱解氮 53.27 mg/kg, 有效磷 9.76 mg/kg, 速效钾 75.12 mg/kg, 质量中等偏下。

1.2 试验材料

供试作物：小麦为内麦 836, 玉米为成单 30。供

试肥料：氮肥为尿素(N 含量 46.3%), 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12.0%), 钾肥为氯化钾(K₂O 含量 60.0%)。供试农业废弃物：秸秆为试验田收获物, 菌渣来自食用菌厂, 猪粪来自养殖基地。还田前, 秸秆作粉碎处理, 菌渣、猪粪作腐熟处理。试验中施用农业废弃物养分含量见表 1。

表 1 农业废弃物的物质含量(g/kg)

Table 1 Material contents in different agricultural wastes

生长季	农业废弃物	水分	总有机碳	全氮	全磷	全钾
小麦季	秸秆	120.7	423.6	3.9	1.1	11.9
	菌渣	144.2	388.6	9.7	1.6	10.5
	猪粪	292.7	235.2	14.8	4.2	4.7
玉米季	秸秆	146.9	470.7	06.6	4.1	17.8
	菌渣	190.7	291.9	12.7	4.4	8.1
	猪粪	295.6	259.9	16.2	7.0	4.5

1.3 试验方案

2014 年 10 月—2017 年 10 月以复垦宅基地为研究对象开展田间定位试验, 共设 8 个处理: CK: 不施肥, CF: 按推荐施肥量施加化肥(小麦季施 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm², 玉米季施 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 100 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²), T1: 全量秸秆还田, T2: 1.5 倍秸秆还田, T3: 全量秸秆有机碳等量的菌渣还田, T4: 1.5 倍秸秆有机碳等量的菌渣还田, T5: 全量秸秆有机碳等量猪粪还田, T6: 1.5 倍秸秆

有机碳等量猪粪还田。

其中, 小麦季施水稻秸秆, 以 5 203 kg/hm² 为全量还田; 玉米季施小麦秸秆, 以 3 890 kg/hm² 为全量还田(均按当季秸秆产量施用); 菌渣、猪粪用量以秸秆还田总有机碳等量计算, T1 ~ T6 处理氮磷钾投入总量等同 CF, 农业废弃物施入养分不足部分用化肥补足。小区面积 30 m², 小区间设宽 10 cm、深 20 cm 的土质护沟。随机区组排列, 每个处理 3 次重复。各处理物质施入量详见表 2。

表 2 各处理下物质施入量(kg/hm²)

Table 2 Material input in different treatments

生长季	处理	养分总量				化肥养分量				农业废弃物养分量			
		C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦季	CK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CF	-	150	75	75	-	150	75	75	-	-	-	-
	T1	2 204	150	75	75	-	130	69	13	2 204	20	6	62
	T2	3 306	225	113	113	-	195	104	20	3 306	30	9	93
	T3	2 204	150	75	75	-	95	66	15	2 204	55	9	60
	T4	3 306	225	113	113	-	142	99	23	3 306	83	14	90
	T5	2 204	150	75	75	-	11	36	31	2 204	139	39	44
玉米季	CK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CF	-	180	100	120	-	180	100	120	-	-	-	-
	T1	1 831	180	100	120	-	154	84	51	1 831	26	16	69
	T2	2 747	270	150	180	-	231	126	76	2 747	39	24	104
	T3	1 831	180	100	120	-	100	74	69	1 831	80	26	51
	T4	2 747	270	150	180	-	150	111	103	2 747	120	39	77
	T5	1 831	180	100	120	-	66	51	88	1 831	114	49	32
T6	2 747	270	150	180	-	99	75	132	2 747	171	75	48	

1.4 土壤样品采集

2014 年 10 月—2017 年 10 月, 连续 3 a 在小麦种植前、玉米收获后(10 月)进行样品采集。按五点取样法在各小区采集 0~20 cm 土层的混合土样, 并用 PET 无菌塑封袋封装, 风干后挑出根系、侵入体, 磨细过筛备用。

1.5 土壤样品测定

采用鲍士旦的《土壤农化分析》中所给常规方法^[6], 测定土壤容重、孔隙度、酸碱度、总有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾共 10 项指标。

1.6 数据处理

应用 Excel 2016 对数据作初步整理、统计, 使用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较, 对数据差异显著性进行 Duncan 检验。

1.7 综合评价方法

试验采用 IFI 综合评价模型对宅基地复垦土壤作综合肥力评价^[17-19], 基于各项肥力评价因子的权重与隶属度计算土壤肥力综合指标值(IFI), 以反映宅基地复垦土壤综合肥力。模型公式如下:

$$IFI = \sum_{i=1}^n W_i \times F_i \quad (1)$$

式中: n 代表综合评价因子总数, i 代表单项评价因子序号, W_i 为第 i 项因子权重, F_i 为第 i 项因子隶属度。土壤肥力综合指标值(IFI)计算所需的评价因子可参考相关研究^[20-22]确定, 选取容重、pH、总有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾 7 个指标。

单项评价因子的权重 W_i 可结合已有土壤综合肥力评价体系^[21]确定, 取值见表 3。

表 3 土壤肥力评价因子权重
Table 3 Weights of evaluation factors of soil fertility

指标	容重	酸碱度	总有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
权重	0.159	0.109	0.139	0.138	0.155	0.140	0.160

单项评价因子的隶属度 F_i 可用隶属度函数计算。参评肥力因子中总有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾在较大范围内作物曲线呈 S 型, 隶属度采用 S 型函数计算; 容重、pH 在较大范围内作物曲线呈抛物线型, 隶属度采用抛物线型函数计算^[21]。计算公式如下:

S 型隶属度函数:

$$F_i = \begin{cases} 1.0 & x_i \geq x_4 \\ 0.1 + 0.9(x_i - x_1)/(x_4 - x_1), & x_1 < x_i < x_4 \\ 0.1 & x_i \leq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

抛物线型隶属度函数:

$$F_i = \begin{cases} 1.0 & x_2 \leq x_i \leq x_3 \\ 0.1 + 0.9(x_i - x_1)/(x_2 - x_1), & x_1 < x_i < x_2 \\ 1.0 - 0.9(x_i - x_3)/(x_4 - x_3), & x_3 < x_i < x_4 \\ 0.1 & x_i \leq x_1, x_i \geq x_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_i 表示单项土壤肥力评价因子的测定值, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别表示该项因子的最小值、最优下限值、最优上限值及最大值^[22]。参考全国第二次土壤

普查推荐的肥力分级标准, 结合试验地区实际情况确定 $x_1 \sim x_4$ 的数值, 最终取值如表 4。

土壤肥力综合指标值(IFI)的值域是(0, 1), 区间内 IFI 值越大则土壤综合肥力状况越好。参考相关研究^[20, 22], 可将 IFI 值反映的土壤肥力状况划成 5 个等级: 良好(0.8 < IFI < 1)、较好(0.6 < IFI < 0.8)、中等(0.4 < IFI < 0.6)、较差(0.2 < IFI < 0.4)、很差(0 < IFI < 0.2)。

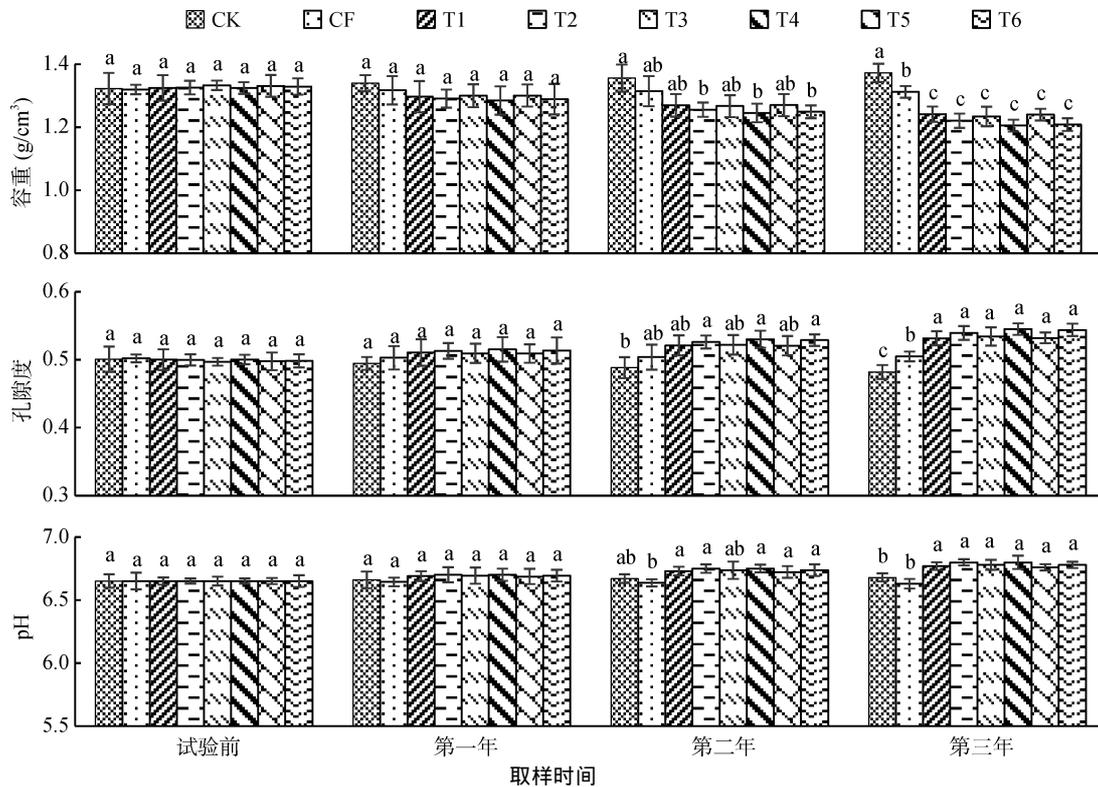
2 结果与分析

2.1 不同处理下宅基地复垦土壤指标变化特征

2.1.1 土壤物理性状与酸碱度变化 如图 1 所示, 经 3 a 试验, CK 处理下宅基地复垦土壤容重呈上升趋势, 孔隙度呈下降趋势; 其他处理下土壤容重均呈现降低趋势, 孔隙度呈增高趋势。3 a 后 CF 及 T1~T6 处理下土壤容重分别显著低于 CK 处理 0.06、0.13、0.15、0.14、0.17、0.13、0.16 g/cm³ ($P < 0.05$); 孔隙度分别显著高于 CK 处理 0.023、0.049、0.057、0.052、0.063、0.050、0.062 ($P < 0.05$), 其原因可能是

表 4 隶属度函数曲线中各转折点取值
Table 4 Values of turning points of membership function curves of evaluation factors

转折点值	容重(g/cm ³)	酸碱度	总有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
x_1	0.8	6.5	6	0.5	30	3	30
x_2	1.0	7.0	-	-	-	-	-
x_3	1.2	7.5	-	-	-	-	-
x_4	1.4	8.0	30	1.5	120	20	150



(图中小写字母不同表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 1 不同处理下土壤容重、孔隙度及 pH 的动态变化

Fig. 1 Changes of soil bulk density, porosity and pH under different treatments

秸秆、菌渣和猪粪等农业废弃物较化肥存在更多纤维结构,具有疏通土壤毛管、增加孔隙数量的作用^[23];农业废弃物矿化过程中,纤维腐解体可结合土壤团粒,改善土体结构,降低土壤容重^[24]。

在酸碱度方面,经 3 a 试验,CF 处理下土壤 pH 呈下降趋势,较试验前下降 0.02; T1 ~ T6 处理下土壤 pH 呈上升趋势,均显著高于 CF 处理($P < 0.05$),分别较试验前上升 0.12、0.15、0.13、0.15、0.11、0.13。受淋溶作用影响,土壤酸化是伴随土壤发生、发育的自然进程,而施入土壤的铵态氮肥(尿素)会通过硝化作用释放 H^+ ,加速此进程^[25],因此 CF、CK 处理下土壤 pH 较试验前下降,且 CF 低于 CK。另有研究表明,农业废弃物与化肥配施,可提高土壤有机质、腐殖质含量,改善腐殖质组分,使土壤对酸化的缓冲能力增强^[26],故 T1 ~ T6 处理下土壤 pH 呈逐年上升趋势。

2.1.2 土壤总有机碳及全量养分变化 如表 5 所示,经 3 a 试验,CK、CF、T1 处理下复垦宅基地土壤有机碳含量呈下降趋势,其余处理均呈上升趋势。3 a 试验后,T2 ~ T6 处理土壤总有机碳含量分别比试验前提高 6.60%、6.19%、13.75%、4.27%、11.04%,高量菌渣还田(T4)处理提升最大,与闫锐等^[27]研究结论一致,菌渣还田下土壤总有机碳提升效果最好。CF、T1 处理下土壤有机碳含量比试验前分别降低

1.00、0.50 g/kg,显著低于 T2 ~ T6 处理($P < 0.05$),因为施肥促进作物生长,促使有机质矿化分解释放养分供作物吸收利用,故有机碳含量降低^[28]; CF 处理因化肥单施缺少外来碳源补充,土壤总有机碳含量降幅大于 T1 处理^[29]。

经 3 a 试验,CK 处理下复垦宅基地土壤的全氮含量呈下降趋势,其余处理呈上升趋势。T1 ~ T6 处理下土壤全氮含量分别较试验前提高 7.05%、8.49%、6.82%、7.89%、6.48%、7.21%,高量秸秆还田(T2)处理对土壤全氮提升最大,原因可能为秸秆 C/N 较大且在适宜范围内,对土壤微生物的数量及活性提升有更强促进作用,能有效加快土壤养分循环释放,利于氮素积累^[30];此外,秸秆还田后分解产物多被转化为固态氮,对土壤氮矿化过程存在阻碍,也会导致土壤全氮增加^[31]。

在全磷方面,CK 处理下复垦宅基地土壤的全磷含量呈下降趋势,其余处理上升。T1 ~ T6 处理下土壤全磷含量分别较试验前提高 4.41%、6.97%、5.06%、8.06%、6.59%、12.44%,高量猪粪还田(T6)处理提升效果最佳,其土壤全磷含量显著高于其余处理($P < 0.05$),应是猪粪 C/N、C/P 小于秸秆与菌渣,微生物活性更低,有机部分磷素矿化释放相对缓慢,有利于土壤磷素积累^[32],与颜晓等^[33]研究结论基本一致。

表 5 不同处理下土壤总有机碳及全量养分含量 (g/kg)
Table 5 Contents of total organic carbon and total nutrients in soils under different treatments

指标	处理	取样时间			
		试验前	第一年	第二年	第三年
总有机碳	CK	14.25 ± 0.58 a	13.96 ± 0.52 a	13.71 ± 0.52 b	13.50 ± 0.53 c
	CF	14.24 ± 0.63 a	13.90 ± 0.53 a	13.36 ± 0.52 b	13.24 ± 0.51 c
	T1	14.17 ± 0.53 a	14.02 ± 0.59 a	13.79 ± 0.52 b	13.67 ± 0.52 c
	T2	14.33 ± 0.52 a	14.63 ± 0.57 a	14.97 ± 0.56 a	15.28 ± 0.55 ab
	T3	14.23 ± 0.54 a	14.44 ± 0.52 a	14.90 ± 0.53 a	15.11 ± 0.52 ab
	T4	14.08 ± 0.52 a	14.47 ± 0.63 a	15.45 ± 0.58 a	16.02 ± 0.53 a
	T5	14.23 ± 0.46 a	14.49 ± 0.52 a	14.74 ± 0.52 a	14.84 ± 0.51 b
全氮	CK	0.748 ± 0.022 a	0.728 ± 0.012 a	0.711 ± 0.010 b	0.703 ± 0.025 b
	CF	0.746 ± 0.032 a	0.758 ± 0.020 a	0.763 ± 0.021 a	0.777 ± 0.019 a
	T1	0.747 ± 0.027 a	0.768 ± 0.059 a	0.786 ± 0.047 a	0.800 ± 0.020 a
	T2	0.747 ± 0.010 a	0.770 ± 0.036 a	0.792 ± 0.028 a	0.810 ± 0.022 a
	T3	0.749 ± 0.026 a	0.765 ± 0.009 a	0.776 ± 0.037 a	0.800 ± 0.024 a
	T4	0.747 ± 0.025 a	0.771 ± 0.033 a	0.776 ± 0.012 a	0.806 ± 0.057 a
	T5	0.748 ± 0.025 a	0.765 ± 0.057 a	0.783 ± 0.040 a	0.797 ± 0.057 a
全磷	CK	0.471 ± 0.006 a	0.464 ± 0.013 c	0.460 ± 0.002 e	0.454 ± 0.010 e
	CF	0.472 ± 0.028 a	0.477 ± 0.010 b	0.481 ± 0.007 cd	0.486 ± 0.012 d
	T1	0.468 ± 0.015 a	0.475 ± 0.003 b	0.479 ± 0.011 d	0.489 ± 0.007 cd
	T2	0.471 ± 0.007 a	0.481 ± 0.011 ab	0.495 ± 0.007 b	0.504 ± 0.003 b
	T3	0.470 ± 0.006 a	0.478 ± 0.008 b	0.488 ± 0.008 bc	0.494 ± 0.007 c
	T4	0.468 ± 0.016 a	0.480 ± 0.013 ab	0.491 ± 0.012 b	0.506 ± 0.005 b
	T5	0.470 ± 0.006 a	0.479 ± 0.011 ab	0.490 ± 0.004 b	0.501 ± 0.005 b
全钾	CK	13.31 ± 0.19 a	13.30 ± 0.51 a	13.25 ± 0.49 a	13.16 ± 0.47 b
	CF	13.39 ± 0.39 a	13.47 ± 0.24 a	13.53 ± 0.24 a	13.59 ± 0.17 ab
	T1	13.29 ± 0.63 a	13.49 ± 0.19 a	13.57 ± 0.93 a	13.66 ± 0.36 ab
	T2	13.32 ± 0.18 a	13.52 ± 0.27 a	13.76 ± 0.26 a	13.91 ± 0.28 a
	T3	13.28 ± 0.26 a	13.47 ± 0.22 a	13.50 ± 0.43 a	13.64 ± 0.28 ab
	T4	13.33 ± 0.13 a	13.54 ± 0.05 a	13.69 ± 0.16 a	13.86 ± 0.18 a
	T5	13.34 ± 0.32 a	13.55 ± 0.35 a	13.58 ± 0.27 a	13.63 ± 0.09 ab
T6	13.31 ± 0.15 a	13.43 ± 0.07 a	13.63 ± 0.21 a	13.76 ± 0.04 a	

注：同列数据小写字母不同表示同一指标不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平，下表同。

在全钾方面，CK 处理下宅基地复垦土的全钾含量呈下降趋势，其余处理呈上升趋势。T1 ~ T6 处理对土壤全钾含量分别比试验前提升了 2.83%、4.42%、2.69%、3.95%、2.19%、3.36%，其中高量秸秆还田 (T2) 处理下提升最大，与全孝飞等^[34]研究结论相似，秸秆还田处理更易促进土壤全钾增长。

2.1.3 土壤速效养分变化 如表 6 所示，经 3 a 试验，CK 处理下复垦宅基地土壤的碱解氮含量呈下降趋势，其余处理均呈上升趋势。T1 ~ T6 处理土壤碱解氮分别比试验前增加 30.03%、43.79%、36.67%、

48.67%、23.35%、41.38%，高量菌渣还田 (T4) 处理下土壤碱解氮上升速率最快。T1 ~ T6 处理下土壤碱解氮含量显著高于 CF 处理 ($P < 0.05$)，其原因可能是秸秆、菌渣、猪粪等农业废弃物具有养分缓释作用^[35]，使土壤碱解氮易于积累；又有研究表明，农业废弃物可通过增加土壤有机碳而刺激土壤微生物活性，促进生物分解作用，从而增加碱解氮含量^[36]。

在有效磷方面，CK 处理下复垦宅基地土壤的有效磷含量呈下降趋势，其余处理均呈上升趋势。各农业废弃物处理下，土壤有效磷含量较试验前分别增长

表 6 不同处理下土壤速效养分含量(mg/kg)
Table 6 Contents of available nutrients in soils under different treatments

指标	处理	取样时间			
		试验前	第一年	第二年	第三年
碱解氮	CK	53.35 ± 3.01 a	53.33 ± 2.30 d	53.08 ± 2.04 f	52.48 ± 2.14 g
	CF	54.26 ± 2.41 a	55.83 ± 1.07 cd	57.39 ± 2.17 e	58.85 ± 2.60 f
	T1	53.23 ± 1.07 a	58.01 ± 1.38 bc	63.16 ± 1.64 cd	69.22 ± 1.52 de
	T2	53.48 ± 2.52 a	61.14 ± 1.25 a	67.98 ± 2.10 ab	76.90 ± 1.85 ab
	T3	52.19 ± 1.79 a	59.32 ± 1.36 ab	65.79 ± 3.87 bc	71.32 ± 2.30 cd
	T4	52.73 ± 2.71 a	61.02 ± 0.92 a	70.27 ± 1.71 a	78.40 ± 3.47 a
	T5	53.49 ± 2.41 a	57.32 ± 1.92 bc	61.19 ± 1.38 de	65.98 ± 2.09 e
	T6	52.27 ± 1.50 a	59.60 ± 1.84 ab	66.57 ± 3.08 abc	73.90 ± 1.97 bc
有效磷	CK	10.03 ± 0.67 a	9.91 ± 0.37 a	9.83 ± 0.53 c	9.72 ± 0.39 c
	CF	10.01 ± 0.04 a	10.29 ± 0.18 a	10.53 ± 0.73 bc	10.80 ± 0.64 bc
	T1	10.03 ± 0.66 a	10.57 ± 0.56 a	10.96 ± 0.58 ab	11.34 ± 0.62 ab
	T2	10.07 ± 0.09 a	10.82 ± 0.86 a	11.51 ± 0.53 ab	12.22 ± 0.79 ab
	T3	9.80 ± 0.68 a	10.49 ± 0.80 a	11.21 ± 0.61 ab	11.80 ± 0.54 ab
	T4	10.04 ± 0.13 a	10.84 ± 0.73 a	12.04 ± 0.51 a	12.84 ± 0.69 a
	T5	9.99 ± 0.14 a	10.62 ± 0.43 a	11.18 ± 0.20 ab	11.86 ± 1.19 ab
	T6	9.82 ± 0.68 a	10.50 ± 0.72 a	11.30 ± 0.65 ab	12.11 ± 0.92 ab
速效钾	CK	73.47 ± 1.80 a	70.65 ± 1.96 d	68.80 ± 2.95 d	65.49 ± 2.18 e
	CF	74.67 ± 2.93 a	79.53 ± 2.56 c	83.87 ± 2.91 c	86.85 ± 3.72 d
	T1	76.30 ± 4.83 a	84.78 ± 1.36 ab	93.71 ± 4.23 ab	101.74 ± 6.00 bc
	T2	76.30 ± 2.87 a	86.11 ± 1.71 a	97.40 ± 4.58 a	110.36 ± 3.06 a
	T3	76.30 ± 3.31 a	83.17 ± 1.23 abc	89.64 ± 4.02 bc	97.40 ± 3.50 c
	T4	74.67 ± 4.78 a	84.99 ± 2.16 ab	95.36 ± 3.39 ab	105.24 ± 3.89 ab
	T5	74.67 ± 5.61 a	81.17 ± 2.44 bc	88.74 ± 2.93 bc	94.90 ± 3.25 c
	T6	76.30 ± 5.26 a	81.71 ± 3.13 bc	92.78 ± 3.79 ab	104.70 ± 4.43 ab

13.05%、21.37%、20.41%、27.85%、18.80%、23.29%。高量菌渣还田(T4)处理提升效果最佳,其土壤有效磷含量显著高于 CF 处理($P < 0.05$),可能是施入菌渣有利于耕层土壤有机碳积累,对土壤磷素活化作用较强,可提高土壤磷有效性^[37]。

在速效钾方面,CK 处理下复垦宅基地土壤速效钾含量呈下降趋势,其余处理呈上升趋势。T1 ~ T6 处理下土壤速效钾分别比试验前增长 33.35%、44.65%、27.66%、40.93%、27.09%、37.23%,均显著高于 CF 处理($P < 0.05$),其中高量秸秆还田(T2)处理提升最大,与已有研究结果类似^[38]。可能是由于农业废弃物中钾素主要赋存形态活性较强,易促进土体内部养分物质循环;同时秸秆比其他农业废弃物含钾量较高,更有利于土壤速效钾含量增加。

2.2 不同处理对宅基地复垦土壤总有机碳及全量养分与速效养分的相对提高效果

选取总有机碳与全量养分(全氮、全磷、全钾)、

速效养分(碱解氮、有效磷、速效钾)2 组指标,依照计算式(施肥处理标准化值=施肥处理测定值-对照处理测定值/所有处理下该测定值标准差)对上述指标作标准化处理,使不同量纲的指标之间具有可比性^[39]。将标准化处理后的 2 组指标分别于组内累加,得出全量养分与速效养分相对变化值,分析 CK 处理以外的其他处理,对宅基地复垦土壤全量与速效养分的相对提高效果,并由此推荐适用于特定需求的土壤培肥方案。

如图 2 所示,除 CK 处理之外,各施肥处理对宅基地复垦土壤全量养分的相对变化值从大到小依次为 T6<T4<T2<T3<T5<T1<CF, T6 处理提升效果最优, T4 处理次之;对速效养分的相对变化值为 T4<T2<T6<T3<T1<T5<CF, T4 处理提升效果最佳, T2 处理次之。其中农业废弃物对土壤全量养分的相对提高效果为猪粪<菌渣<秸秆,对速效养分为菌渣<秸秆<猪粪,与已有研究^[40-41]结果相近。CF 处理下全

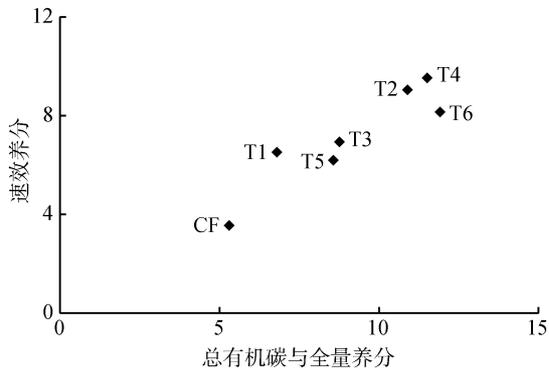


图 2 各处理下总有机碳及全量养分与速效养分的相对变化

Fig. 2 Relative changes of total organic carbon, total and available nutrients in soils under different treatments

量养分及速效养分相对变化值均小于 T1 ~ T6 处理,其原因可能是农业废弃物配施较化肥单施带入更多有机碳;农业废弃物施入后,需一定时间充分分解以释放养分,即缓释效果,养分易长期积累^[37-38]。综上所述,从优先提升复垦土壤全量养分的角度,应推荐

高量猪粪还田(T6)处理作为首选培肥方案;从优先提升复垦土壤速效养分的角度,推荐高量菌渣还田(T4)处理为优选培肥方案。

2.3 宅基地复垦土壤综合肥力评价

参照 IFI 综合评价模型,对试验前及试验后各处理下的土壤综合肥力进行评价,结果见表 7。试验前土壤 IFI 值为 0.396,经 3 a 试验,CK 处理下土壤 IFI 值降至 0.347,综合肥力水平较差,较试验前年均降低 0.083 级;CF 处理下土壤 IFI 值为 0.431,综合肥力水平中等,较试验前年均提升 0.059 级;T1、T3、T5 处理下土壤 IFI 值分别达到 0.553、0.569、0.548,综合肥力水平中等,年均提升等级分别为 0.261 级、0.288 级、0.253 级;T2、T4、T6 处理下土壤 IFI 值分别升至 0.612、0.627、0.606,综合肥力水平均较好,每年分别较试验前提升 0.360 级、0.385 级、0.350 级。因 T4 处理对土壤综合肥力的提升幅度最大,T2 处理次之,推荐高量菌渣还田(T4)为最优培肥方案,高量秸秆还田(T2)处理为备选。

表 7 各处理下土壤肥力综合评价结果

Table 7 Comprehensive evaluation of soil fertilities under different treatments

处理	隶属度值							IFI 值	年均提升等级
	容重	酸碱度	总有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾		
试验前	0.420	0.372	0.408	0.323	0.331	0.469	0.440	0.396	-
CK	0.223	0.424	0.381	0.283	0.325	0.456	0.366	0.347	-0.083
CF	0.495	0.334	0.372	0.350	0.388	0.513	0.526	0.431	0.059
T1	0.813	0.586	0.388	0.370	0.492	0.542	0.638	0.553	0.261
T2	0.907	0.640	0.448	0.379	0.569	0.588	0.703	0.612	0.360
T3	0.846	0.604	0.442	0.370	0.513	0.566	0.605	0.569	0.288
T4	0.976	0.640	0.476	0.375	0.584	0.621	0.664	0.627	0.385
T5	0.821	0.568	0.432	0.367	0.460	0.569	0.587	0.548	0.253
T6	0.961	0.604	0.467	0.373	0.539	0.582	0.660	0.606	0.350

农业废弃物通过增加土壤活性炭和活性氮组分,提高与养分转化有关微生物及酶的活性,有助于土壤养分积累^[42]。农业废弃物的施用向土体带入大量有机质,其分解可产生有机酸,故能通过酸溶作用促进矿物风化和养分释放,并经由络合作用增加矿质养分有效性^[43];有机质对速效养分的吸附,还能减少土壤养分流失,保障养分稳定供给^[44]。较化肥单施,农业废弃物配施化肥能大幅提升土壤有机碳及氮磷钾养分含量,并显著改善理化性质,此结论已由其他研究^[39, 42-43]证实,本试验中 CF 处理土壤综合肥力低于 T1 ~ T6 处理的结果,亦可为之佐证。

3 种农业废弃物还田处理下,菌渣对复垦土壤综合肥力提升最显著,秸秆次之,猪粪效果最差。菌渣

作为优质有机肥料,除供给外源营养物质,还能带入大量以白腐类真菌为主的微生物群落,可促进土壤中不易分解的纤维类物质降解,进一步提高养分含量及有效性^[45]。秸秆还田能为土壤微生物提供丰富的物质和能量来源,利于有机物腐解和土壤养分循环释放^[30]。而戴志刚等^[46]研究表明,因微生物活动改变秸秆物理结构,秸秆腐解速率于 1 ~ 2 个月的快速腐解期后明显降低,经过长时间土体内腐解仅减少 50% 质量,仍有大量木质素、纤维素未被分解利用,秸秆提升肥力效果弱于菌渣。猪粪提升肥力效果最差,可能由于猪粪已作腐熟处理,还田后矿质化过程强于腐殖化过程,所含养分整体释放较快并多数被作物吸收^[47]。本研究中 T1、T3、T5 处理下肥力提升效

果明显弱于 T2、T4、T6 处理，应是全量与高量处理之间施入养分的总量差异所致。

因不同地区复垦土壤性质及产出农业废弃物的营养含量存在不一致性，通过农业废弃物配施化肥还田培肥土壤前，应根据当地秸秆、菌渣和猪粪的营养物质含量，参照实际情况与较长时期的田间试验数据对培肥方案进行修正。由于本试验仅对秸秆、菌渣、猪粪 3 种农业废弃物配施处理下的宅基地复垦土壤进行研究，未涉及绿肥、沼渣、生物质炭等物料，研究具有一定局限性。在当前已有的研究中，针对复垦宅基地提出的培肥方案甚少，仍有待探究。

3 结论

1)与化肥单施处理相比，秸秆、菌渣、猪粪 3 种农业废弃物与化肥配施处理下宅基地复垦土壤的物理性状得到改善，总有机碳、全磷、碱解氮、有效磷与速效钾含量显著增加。

2)从提升复垦土壤全量养分的角度，推荐高量猪粪还田处理作为首选培肥方案；从提升复垦土壤速效养分的角度，推荐高量菌渣还田处理为首选培肥方案。

3)高量菌渣还田处理下土壤综合肥力年均提升 0.385 级，提升效率最高，推荐为最优培肥方案：小麦季施菌渣 8 507 kg/hm²、尿素 307 kg/hm²、过磷酸钙 825 kg/hm²、氯化钾 38 kg/hm²，玉米季施菌渣 9 411 kg/hm²、尿素 324 kg/hm²、过磷酸钙 925 kg/hm²、氯化钾 172 kg/hm²。高量秸秆还田处理下土壤综合肥力年均提升 0.360 级，提升效率次之，推荐为备选方案。

参考文献：

- [1] 周健民. 我国耕地资源保护与地力提升[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 269-274
- [2] 刘小波, 彭春艳, 吕祥, 等. 基于不同赋权方式的重庆市农村居民点复垦潜力测算[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(2): 230-235
- [3] 贺雪峰. 论农村宅基地中的资源冗余[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(4): 7-13
- [4] 李彦霖, 闫锐, 高雪松, 等. 不同种养废弃物还田对复垦宅基地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 283-288
- [5] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21
- [6] 周伟, 邓良基, 贾凡凡, 等. 基于土壤重金属风险和经济效益的双孢蘑菇菌渣还田量估算[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 507-514
- [7] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1131-1148
- [8] 邓欧平, 李瀚, 周稀, 等. 菌渣还田对土壤有效养分动态变化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 18-23
- [9] 孙雪, 刘琪琪, 郭虎, 等. 猪粪生物质炭对土壤肥效及小白菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1756-1763
- [10] 张国, 逯非, 赵红, 等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 981-988
- [11] 李文哲, 徐名汉, 李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 135-142
- [12] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817-3825
- [13] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2336-2347
- [14] 王海力, 韩光中, 谢贤健. 基于 DEA 模型的西南地区耕地利用效率时空格局演变及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 146-157
- [15] 徐安琪, 高雪松, 李启权, 等. 平原村落空心化特征分析及类型识别[J]. 资源科学, 2016, 38(2): 196-205
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [17] 任艳芳, 何俊瑜, 张艳超, 等. 贵州省开阳茶园土壤养分状况与肥力质量评价[J]. 土壤, 2016, 48(4): 668-674
- [18] 何元胜, 杨美仙, 亚平, 等. 临沧烟区土壤肥力综合评价[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(3): 23-26
- [19] 庞夙, 陶晓秋, 黄玫, 等. 四川省植烟区土壤肥力评价[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(1): 40-44
- [20] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99
- [21] 李有兵, 李硕, 李秀双, 等. 不同秸秆还田模式的土壤质量综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 133-140
- [22] 王建宇, 王超, 王菲, 等. 基于田间尺度的压砂地土壤肥力评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 36-41
- [23] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5052-5061
- [24] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 159-165
- [25] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244
- [26] 李阳, 王继红. 长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(1): 114-119
- [27] 闫锐, 李彦霖, 邓良基, 等. 3 种农业废弃物对宅基地复垦土壤易变有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 233-241

- [28] 许咏梅, 刘骅, 王西和. 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 154–162
- [29] Pu Y L, Gong G S, Li S, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155(1): 289–297
- [30] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 215–222
- [31] 刘继明, 卢萍, 徐演鹏, 等. 秸秆还田对吉林黑土区土壤有机碳、氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(3): 96–99
- [32] 李清华. 畜禽有机肥磷的形态、养分矿化及流失潜力评价研究进展[J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2013, 19(3): 73–75
- [33] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷的产量效应及其环境风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3205–3210
- [34] 全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用农业废弃物对稻田生态系统服务功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1406–1415
- [35] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 等. 不同农田农业废弃物组合对物料分解过程的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 685–690
- [36] Zhong W H, Gu T, Wang W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. Plant and Soil, 2010, 326(1/2): 511–522
- [37] 信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1514–1520
- [38] Kaur A, Brar A S. Influence of mulching and irrigation scheduling on productivity and water use of turmeric (*Curcuma longa* L.) in north-western India[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 261–269
- [39] 徐秋桐, 孔樟良. 不同有机废弃物改良新复垦耕地的综合效果评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 567–576
- [40] 李蕴慧, 吴景贵, 赵欣宇, 等. 农业废弃物对黑土有机磷形态长期动态影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 260–264
- [41] 李腾, 饶伟, 王代长, 等. 不同农业废弃物对潮土微粒团粒分形特征和速效养分的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 64–71
- [42] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 175–181
- [43] Lazcano C, Gomez-Brandon M, Revilla P, et al. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(6): 723–733
- [44] 杨丽娟, 李天来, 周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 205–208
- [45] 冯德庆, 黄勤楼, 黄秀声, 等. 菌渣对水稻生长性状、产量及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 74–77
- [46] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276
- [47] 王崇华, 王喜枝, 王立河, 等. 猪粪有机肥与硫酸钙配施对潮土区大蒜产量、品质及土壤性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 62–67

Evaluation of Effects of Organic Materials on Soil Fertilization of Reclaimed Homestead

LIU Zixiao, DENG Liangji*, ZHOU Wei, CHEN Ludan, ZOU Guangji

(College of Resources, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A field experiment was conducted to determine the optimum fertilization scheme for reclaimed homestead in Chengdu Plain. Eight treatments were set up which included blank control (CK, no material input), conventional fertilization (CF, N 150 kg/hm² and 180 kg/hm², P₂O₅ 75 kg/hm² and 100 kg/hm², K₂O 75 kg/hm² and 120 kg/hm² in wheat and maize seasons, respectively), conventional volume straw returning (T1), high volume straw returning (T2, 1.5×T1), conventional volume mushroom residue returning (T3), high volume mushroom residue returning (T4, 1.5×T3), conventional volume pig manure returning (T5), and high volume pig manure returning (T6, 1.5×T5). Topsoil samples (0–20 cm) were collected and 10 indexes were measured which included soil bulk density, porosity, pH, total organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium, and then soil comprehensive fertility were evaluated. The results showed that the combined application of straw, mushroom residue and pig manure with chemical fertilizer improved the physical properties of the reclaimed soil and increased significantly the contents of total organic carbon, total phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium ($P<0.05$). T6 treatment had the best effects in promoting total organic carbon and total nutrients, while T4 treatment had the best effects in promoting available nutrients and soil comprehensive fertility with an average annual increase of 0.385 grade. Thus, it is recommended that high volume mushroom residue returning treatment (T4) as the optimum fertilization for reclaimed homestead in Chengdu Plain, i.e., applying 8 507 kg/hm² and 9 411 kg/hm² of mushroom residue, 307 kg/hm² and 324 kg/hm² of urea, 825 kg/hm² and 925 kg/hm² of calcium superphosphate, 38 kg/hm² and 172 kg/hm² of potassium chloride in wheat and maize seasons, respectively.

Key words: Reclaimed land; Returning agricultural waste to field; Comprehensive fertility evaluation