

川中丘陵区农村生活污水资源化 利用后的土壤养分特征

李杉¹, 马鑫文¹, 吴勇¹, 高东东², 肖杰²

(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2.四川省生态环境科学研究院, 四川 成都 610000)

摘要: [目的] 探究川中丘陵地区施用经无害化处理的生活污水后, 不同类型土壤在不同深度土层中各养分指标的变化特征, 为农村生活污水的无害化处理和资源化利用提供科学支撑。[方法] 对三格化粪池处理后的农村生活污水进行资源化利用。在耕地中设置 G_0 (37.5 L/m²), G_2 (75 L/m²), G_0 (空白) 3 种施用处理; 在林地中设置 L_1 (37.5 L/m²), L_2 (75 L/m²), L_3 (112.5 L/m²), L_0 (空白) 4 种施用处理。结合层次分析法(AHP)与主成分分析法(PCA)对各养分指标权重进行计算, 对各处理在不同深度土层中的施用效果进行综合评分。[结果] 在生活污水不同的资源化利用处理除 L_3 土壤养分评价等级为“良”外, 其余处理皆为“优”。各处理下, 耕地中各深度土层养分评价得分排序一致表现为: $G_1 > G_0 > G_2$; 林地中 0—20 cm 土层表现为: $L_0 > L_2 > L_1 > L_3$; 20—40 cm 土层表现为: $L_1 > L_0 > L_2 > L_3$ 。耕地施用对提升土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾有明显的效果; 林地少量施用对提升 20—40 cm 除速效钾外其余土壤养分的效果较好。[结论] 短期来看, 在农村生活污水资源化利用时, 适量的施用可改善耕地土壤的养分, 对于林地无需施用土壤养分就可较好保持。

关键词: 生活污水; 资源化利用; 土壤养分; 川中地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0114-07

中图分类号: S157.9

文献参数: 李杉, 马鑫文, 吴勇, 等. 川中丘陵区农村生活污水资源化利用后的土壤养分特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 114-120. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.015; Li Shan, Ma Xinwen, Wu Yong, et al. Soil nutrient characteristics after rural domestic sewage resource utilization in hilly areas of Central Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 114-120.

Soil Nutrient Characteristics After Rural Domestic Sewage Resource Utilization in Hilly Areas of Central Sichuan Province

Li Shan¹, Ma Xinwen¹, Wu Yong¹, Gao Dongdong², Xiao Jie²

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Academy of Ecological Environmental Sciences, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of various nutrient indexes in different types of soil in different soil layer after the application of harmless domestic sewage in the hilly area of central Sichuan Province were determined in order to provide scientific support for the harmless treatment and resource utilization of rural domestic sewage. [Methods] Rural domestic sewage treated by a three-grid septic tank was used for resource utilization. Three application treatments [G_1 (37.5 L/m²), G_2 (75 L/m²), and G_3 (blank)] were applied to farmland; four application treatments [L_1 (37.5 L/m²), L_2 (75 L/m²), L_3 (112.5 L/m²), and L_0 (blank)] were applied to the forest land. The weight of each nutrient index was calculated by combining analytic hierarchy process (AHP) and principal component analysis (PCA), and the application effect of each scheme in different soil layers was comprehensively evaluated. [Results] ① Under the different resource utilization treatments of domestic sewage, except for L_3 , the soil nutrient evaluation grade was “good”, and the domestic sewage utilization scheme was “excellent”. ② Under each treatment, soil nutrient evaluation

收稿日期: 2022-04-11

修回日期: 2022-04-27

资助项目: 四川省科技计划项目“典型地区农村生活污水污染物低排放处理技术集成应用示范”(2021JDZH0030)

第一作者: 李杉(1998—), 女(汉族), 四川省阆中市人, 硕士研究生, 研究方向为水文地球化学。Email: 1026487280@qq.com。

通讯作者: 吴勇(1966—), 男(汉族), 四川省安岳县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质方面的研究。Email: ywu@cdut.edu.cn。

scores at different depths of farmland followed the order of $G_1 > G_0 > G_2$. The scores for the 0—20 cm soil layer at forest land followed the order of $L_0 > L_2 > L_1 > L_3$. The scores for the 20—40 cm soil layer in forest land followed the order of $L_1 > L_0 > L_2 > L_3$. ③ Farmland has obvious effects on improving soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, and available potassium. Under small application amounts, forest land had a better effect on increasing soil nutrients (other than available potassium) in the 20—40 cm layer. [Conclusion] In the short term, under the resource utilization of rural domestic sewage, an appropriate application amount could improve the nutrient status of farmland soil, and it could be better maintained for forest land without applying soil nutrients.

Keywords: domestic sewage; soil nutrients; resource utilization; Central Sichuan Province

自农村“厕所革命”以来,四川省部分农村生活环境有所改善,同时在某种程度上也导致了污水更加集中排放的现象,造成了环境困扰。三格化粪池具有操作简便,无害化处理效果好等特点^[1],是农村主要使用的厕改处理。生活污水经过三格化粪池的充分水解后,其中虫卵等有害物质的活性基本被消除,有机成分被降解为含氮磷等的无机组分。若将出水大量集中排放至土壤中,可能会超过土壤的环境容量;一部分可能进入地下水,导致地下水水质恶化。因此,经处理后的生活污水是否可资源化地用于补充土壤中氮磷等组分是本文研究的主要问题。前人^[2]论述了农村生活污水资源化利用的可行性,认为资源化利用是农村生活污水处理的终极目标和最佳选择,污水资源化利用首先应发展灌溉。张增伟等^[3]使用将处理后的生活污水用于田间试验并对土壤的理化性质变化进行分析,结果表明随土层深度增加,其有机质含量与对照组相比降低了21%,但并未对氮磷等营养组分的变化情况进行研究。李欣^[4]使用不同负荷的厌氧池处理生活污水,并将出水用于大田试验,得出试验的最佳水力负荷为 $0.002 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的结论,发现若负荷继续升高,地下水存在被污染的风险。Liu^[5]回收生活污水,用其直接灌溉龙尾草,发现其对总磷、磷酸盐、总氮、氨、COD和BOD的去除率分别为83.2%,82.3%,76.3%,96.2%,73.5%和85.8%。钱靖华等^[6]使用活性污泥法处理生活污水,将其资源化利用于北京一生态度假村中,结果表明此方法可以减少灌溉用水量,每年可减少 $2.89 \times 10^5 \text{ m}^3$ 地下水开采量。综上所述,研究农村生活污水资源化利用对土壤养分的影响是有意义的。

目前对于川中丘陵地区生活污水资源化利用的研究不多^[7-8],其中分析土壤养分三维变化特征的也较少^[9-10]。故本文重点讨论生活污水经三格化粪池处理和资源化利用前后,不同用地类型土壤养分的三维变化特征。在综合考虑主客观因素的基础上,结合层次分析法(AHP)^[11]和主成分分析法(PCA)^[12]计算各养分指标的权重,对生活污水不同施用处理的结

果进行评分,对不同深度的土壤层分别评分,对比土壤养分的变化特征,为农村生活污水的无害化处理和资源化利用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省资阳市安岳县某农村,地属川中丘陵区($105^{\circ}11'20''\text{E}$, $29^{\circ}52'21''\text{N}$)。区域海拔为380~450 m,地貌类型为浅切丘陵,稻田分布较为集中。研究区为亚热带湿润季风气候,四季分明,日照相对较少,多年平均气温 7.3°C ;无霜期313 d;相对湿度82%。域内多年平均雨量958 mm。降雨量季节分配差异较大。区内土壤主要为紫色土和水稻土。耕地土壤呈红棕色,表层疏松多孔,通透性良好,耕植土层厚度约10—40 cm;林地土壤多为紫红、红棕色,土层孔隙度较小。通过走访调查得知村内缺乏排水系统,雨水和污水直接排入房屋旁边沟,沿边沟或水泥路面排至就近的水体或土体中,对环境造成污染,直接威胁居民饮水、食品安全和水体环境健康。

1.2 研究方法

使用三格化粪池改善了研究区的生活环境。安装三格式化粪池进行厌氧处理,安装集水池收集第三格出水。试验场所设在耕地和林地。布设管道后利用水泵将处理后的污水抽至耕地和林地进行施用。试验前,对处理后的生活污水中的COD、氮磷和重金属含量进行检测;对试验区土壤各项指标的背景值进行检测。

试验区耕地种植制度为夏季种植玉米(用水定额 $40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,保证率90%),秋季种植红薯,冬季种植油菜;林地植物为香椿树和杂草。耕地和林地分别设置6个和8个试验小区域,各区域有效面积 4 m^2 ,间隔1 m。耕地区设计3个处理(G_1, G_2, G_0),其中 G_0 为空白对照,即不做施用处理。 G_1, G_2 每次对应的施用量分别为12.5和 $25 \text{ L}/\text{m}^2$ 。林地试验设计4个处

理(L_1, L_2, L_3, L_0),其中 L_0 为空白对照,主要依赖天然降雨。 L_1, L_2, L_3 每次对应的施用量分别为12.5, 25.0和37.5 L/m²。每个处理均设置2次重复,分别在2021年7月30日、9月15日和10月15日施用,共3次,即 G_1 和 L_1 总施用量为37.5 L/m², G_2 和 L_2

总施用量为75 L/m², L_3 总施用量为112.5 L/m²。施用结束后,于2021年11月29日采取土样。根据试验区实际情况和土壤性质,本研究对0—20 cm和20—40 cm土层深度分别进行取样研究。试验场地布置情况如图1所示。

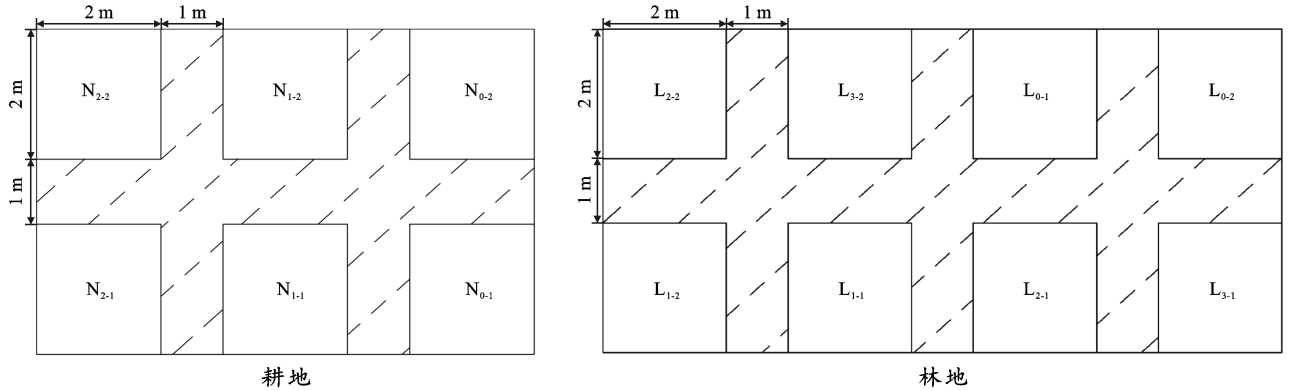


图1 试验场地布置示意图

1.3 样品采集与分析

每个样品由5~7个子样品混匀组成,2个重复处理区域的土样混合为一个样品。土样经自然风干、磨碎后,分别过1 mm和0.074 mm筛备用,对其养分指标进行检测。全氮采用凯氏法;碱解氮采用标准酸滴定法;全磷采用紫外分光光度法,速效磷采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法;有机质采用重铬酸钾稀释热法;速效钾采用醋酸铵浸取—火焰光度计法。

2 数据处理与分析

使用统计学软件对试验数据进行处理。结合综合层次分析法(AHP)与主成分分析法(PCA)从对权重进行计算并进行等级评价,本试验土壤养分等级评价标准详见表1。

土壤各指标标准参考《土壤农化分析》(第3版)^[13]及第2次国土壤普查评级。

表1 土壤养分等级评价标准

土壤养分指标	优等	良好	中等	差等
有机质/(g·kg ⁻¹)	30~20	20~10	10~6	<6
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.5~1	1~0.75	0.75~0.5	<0.5
全磷/(g·kg ⁻¹)	1.5~1	1~0.75	0.75~0.5	<0.5
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	120~90	90~60	60~30	<30
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	20~10	10~5	5~3	<3
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	150~100	100~50	50~30	<30

运用层次分析法(AHP)计算各指标主观权重 W_A ^[14]。结合当地土壤具体情况,以土壤养分含量作为指标层(有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾),计算出不同指标对于目标层的权重。根据1—9级标度^[15],专家构建了各指标的判断矩阵详见表2^[16]。将判断矩阵每一行进行几何平均、归一化得到各指标要素的权重 ω 和最大特征根 λ_{max} 。结果详见表2。为确保矩阵评价矛盾性在合理范围内,对其进行一致性检验,计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n-1)} \quad (1)$$

式中:CI为一致性指标;RI为随机性指标(表3);n

为要素数量^[15]。

经计算, $\lambda_{max} = 6.15$, $CI = 0.0297$,查表3得6阶矩阵RI为1.24,故一致性比率 $CR = 0.0240 < 0.10$,判断矩阵通过一致性检验。

运用主成分分析法(PCA)计算各指标客观权重 W_p 时^[17],将0—20 cm和20—40 cm的土壤指标数据分别进行主成分提取分析及权重计算。分别选取特征值大于1,累计贡献率>85%的前两个主成分详见表4。0—20,20—40 cm土壤各指标成分矩阵详见表5。根据两不同深度土壤指标各自的分析结果分别进行各养分指标权重的计算,公式(2)为计算公式。再将求得的权重归一化,得到最终结果。

$$W = \frac{\frac{C_1}{\sqrt{\lambda_1}}V_1 + \frac{C_2}{\sqrt{\lambda_2}}V_2}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

式中: C_1, C_2, C_3 分别表示表 5 中各指标对应两个主成分的系数; λ_1, λ_2 分别为表 4 中两主成分的特征值; V_1, V_2 表示主成分 1, 主成分 2 的方差贡献率。

表 2 各土壤养分指标判断矩阵及主权重

影响因子	有机质	全氮	全磷	碱解氮	速效磷	速效钾
有机质	1	1	2	1/2	1	2
全氮	1	1	3	1/2	1	2
全磷	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1
碱解氮	2	2	3	1	5	6
速效磷	1	1	2	1/5	1	2
速效钾	1/2	1/2	1	1/6	1/2	1
归一化权重 W_A	0.159 7	0.170 9	0.078 3	0.379 5	0.137 1	0.074 6

表 3 平均随机一致性指标

要素阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.58	1.59

将 AHP 和 PCA 分析所得的权重值用“乘法”集乘法综合处理^[18], 将综合权重乘以各因子与最高标准值的比值即为最终评价得分值。得分计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i b_i} \frac{P_i}{P_{\max}}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i b_i} \frac{P_i}{P_{\max}}} \quad (3)$$

式中: a_i 为 AHP 中第 i 项指标最终权重值; b_i 为 PCA 中第 i 项指标最终权重值; P_i 为第 i 项指标测定值; P_{\max} 为第 i 项指标最大值; K 为最终得分值。

表 4 土壤各指标主成分特征值提取

土层深度/ cm	成分	初始特征值		
		合计	方差的/%	累积/%
0—20	1	3.795	63.252	63.252
	2	1.386	23.105	86.357
20—40	1	3.494	58.225	58.225
	2	1.869	31.151	89.376

表 5 土壤各养分指标成分矩阵

土壤养分指标	土层深度/cm			
	0—20		20—40	
	成分 1	成分 2	成分 1	成分 2
有机质/(g·kg ⁻¹)	0.786	0.580	0.655	0.525
全氮/(g·kg ⁻¹)	-0.655	0.107	0.602	0.619
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.976	-0.135	0.847	-0.526
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	0.464	0.855	0.831	0.544
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.915	-0.282	0.951	-0.266
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	-0.861	0.457	-0.625	0.753

3 结果与分析

3.1 土壤养分含量分析

经处理后的生活污水中, COD、总氮、总磷、氨氮

浓度分别为 241.8, 260, 14.2 和 250 mg/L, 均远超过排放标准(DB51/2626-2019); 重金属铜、锌、砷的浓度分别为 0.008 7, 0.005 2 和 0.005 8 mg/L。在检测范围内未测出铬和镉, 可认为几乎不含有这两种重金属。对试验前后土壤的各指标检测结果详见表 6。

3.1.1 土壤重金属的变化 由图 2 可以看出, 将处理后的生活污水不等量地施用于耕地和林地后, 不同深度土层的重金属含量值均未超标, 且对照组的含量普遍高于施用组。与背景值相比(图 3), 试验后各重金属含量均有减少的现象。生活污水中重金属含量极少, 生活污水的施用能对土壤重金属产生淋滤作用, 施用生活污水灌溉后表层土壤中重金属含量有所降低。在误差范围内, 由于试验期间气候、人为耕作等因素的影响, 变化规律不尽明显, 但从试验数据可知生活污水的资源化利用不会造成土壤重金属含量增加。

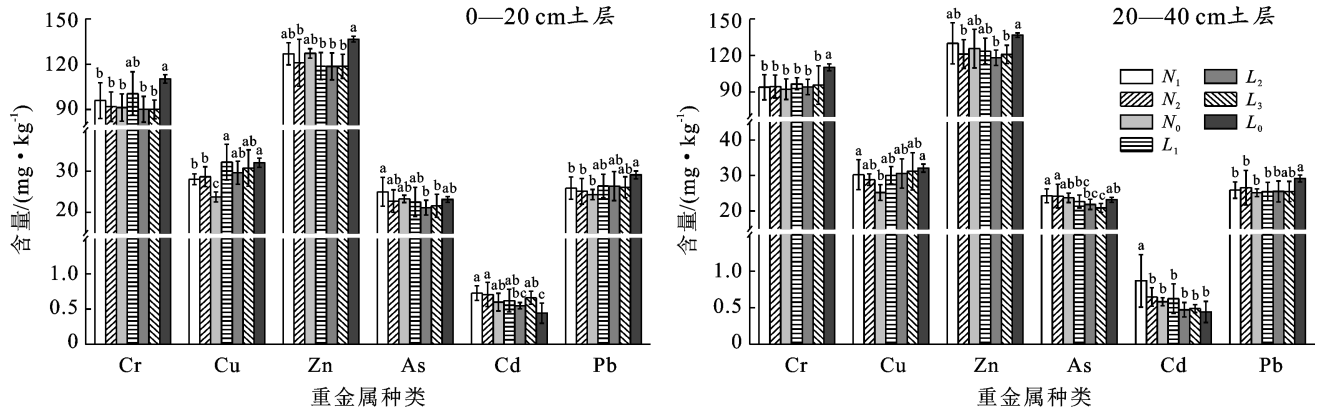
3.1.2 不同土壤类型养分的垂向变化 由表 6 可见, 除全磷以外, 耕地和林地在各施用处理下 0—20 cm 土壤的养分含量均高于 20—40 cm, 说明土壤养分的改善是由表层向深层进行。这是由于全磷含量受土壤水分以及酸碱度控制, 与现有研究结论相符^[19]。在耕地中, 在 0—20 cm 土层, 与 G_0 相比, G_1 处理下的各养分含量有不同程度的增加, 其中速效磷含量增加最多, 为 26%; G_2 处理下, 除碱解氮外, 其余养分含量有不同程度增加, 其中速效磷含量增加最多, 为 30%。在 20—40 cm 土层, 与 G_0 相比, G_1 处理下的各养分含量均有不同程度的增加, 其中速效磷含量增加最多, 为 21%; G_2 处理下, 仅全磷和速效磷的含量有微量的增加, 均提升了 3%。各处理下的深浅土层

养分含量均比背景值高。

在林地中,在 0—20 cm 土层,与 L_0 相比, L_1 处理下,仅速效磷含量有 10% 的增加,其余养分含量均比施用前有所减少; L_2 处理下各指标含量均减少; L_3 处理下仅全氮含量增加 28%,其余养分含量也都减少。林地的 3 个处理使 0—20 cm 土层的碱解氮含量减少最多,约为 30%。各处理下的养分含量均比背景值低。在 20—40 cm 土层,与 L_0 相比, L_1 处理下,各养分指标的含量均有不同程度的增加,其中依旧是

速效磷增加最多,为 21%; L_2 处理下仅全氮含量有微量增加,其余均比施用前有所减少; L_3 处理下各指标含量均减少。 L_2 、 L_3 处理使 20—40 cm 土层的碱解氮含量减少最多,约为 37% (L_2),53% (L_3)。各处理下的养分含量均比背景值高。

综上所述,在生活污水资源化利用下,耕地对提升土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾有明显的效果;林地在少量施用下,对提升 20—40 cm 除速效钾外其余土壤养分的效果较好。



注:不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 2 林地与耕地试验后重金属含量柱状图

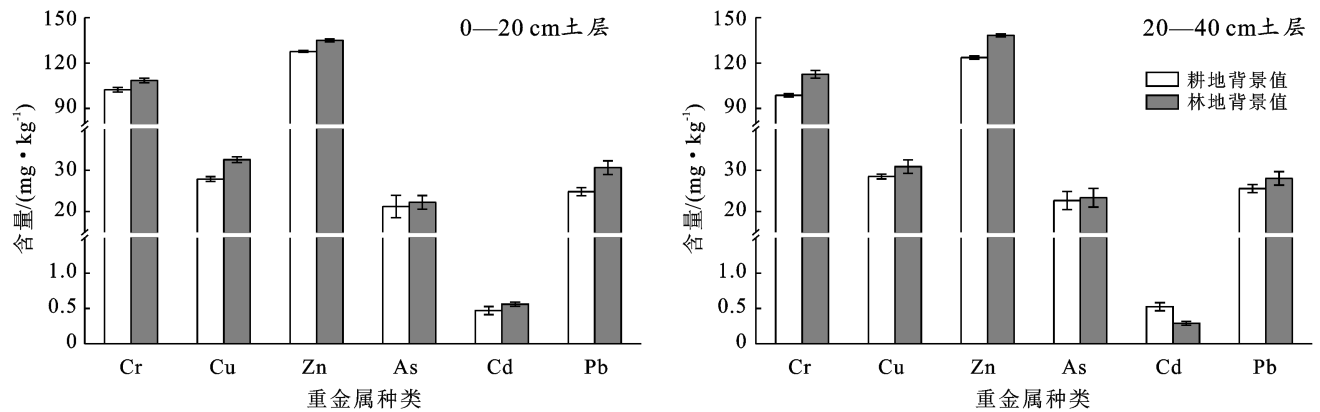


图 3 林地与耕地重金属背景值柱状图

3.2 AHP-PCA 结果

由表 7 可看出,各指标在 AHP 中权重值高的在 PCA 中不一定也高,将两种方法结合可以较为全面地反映问题。

根据公式(3)计算得到综合权重以及各施用处理得分(K 值),将表 2 代入模型计算得到各等级对应得分区间分别为优(1.00~0.68),良(0.68~0.24),中(0.42~0.24),差(< 0.24)。在生活污水不同处理的资源化利用下,除 L_3 得分为“良”(表层土为 0.68 分、深层土为 0.59 分)外,其余处理皆为“优”。在 0—

20 cm 土层中,得分大小排序为 $G_1(0.94) > G_0(0.83) > G_2(0.82)$, $L_0(0.87) > L_2(0.69) = L_1 > L_3(0.68)$,可见耕地最佳施用为 G_1 ,林地最佳施用为 L_0 ;在 20—40 cm 土层中,得分大小排序为: $G_1(0.98) > G_0(0.93) > G_2(0.76)$, $L_1(0.92) > L_0(0.84) > L_2(0.70) > L_3(0.59)$,可见该深度土壤中,耕地最佳施用处理为 G_1 ,林地最佳施用处理为 L_1 。此模型使不同用地类型的试验结果可进行直接比较。可见深浅土层中,耕地的得分都比林地高,即养分改善情况均优于林地。这种差距在 0—20 cm 土层中更为明显。

表 6 各施用方式下不同深度土壤养分含量

土层深度/ cm	施用 方式	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
0—20	G _普	10.1	0.94	0.77	47.00	3.60	120.00
	G ₁	14.32±0.55 ^a	1.07±0.03 ^a	0.89±0.06 ^a	64.94±2.77 ^a	5.4±0.06 ^a	102.23±1.68 ^b
	G ₂	13.37±0.51 ^{ab}	0.98±0.08 ^a	0.87±0.08 ^a	49.22±0.93 ^c	5.6±0.33 ^a	108.39±1.57 ^a
	G ₀	12.6±1.10 ^b	0.98±0.05 ^a	0.83±0.15 ^a	57.94±1.70 ^b	4.3±0.20 ^b	102.23±2.78 ^b
	L _普	17.20	1.20	0.72	70.00	1.30	203.00
	L ₁	11.23±0.49 ^c	1±0.03 ^b	0.67±0.10 ^a	49.15±2.23 ^b	2.3±0.15 ^a	141.98±1.01 ^a
	L ₂	11.95±0.56 ^b	1.03±0.05 ^b	0.68±0.05 ^a	49.22±1.45 ^b	2±0.05 ^b	152.78±1.78 ^b
	L ₃	10.43±0.41 ^d	1.41±0.16 ^a	0.63±0.07 ^a	47.5±1.52 ^b	2.05±0.04 ^b	164.2±2.89 ^c
	L ₀	14.23±0.38 ^a	1.1±0.09 ^b	0.69±0.06 ^a	69.15±2.02 ^a	2.1±0.19 ^b	172.98±1.49 ^d
20—40	G _普	7.20	0.87	0.71	39.00	3.50	117.00
	G ₁	10.41±0.45 ^a	0.88±0.09 ^a	0.82±0.03 ^a	49.29±1.94 ^a	4.1±0.12 ^a	93.79±0.42 ^a
	G ₂	0.64±0.43 ^b	0.67±0.03 ^b	0.8±0.10 ^a	36.51±1.00 ^b	3.5±0.14 ^b	85.33±1.74 ^b
	G ₀	9.88±1.23 ^a	0.86±0.04 ^a	0.79±0.03 ^a	48.29±0.81 ^a	3.4±0.31 ^b	92.79±1.70 ^a
	L _普	8.50	0.79	0.62	31.00	3.10	134.00
	L ₁	10.12±0.27 ^a	0.93±0.02 ^a	0.64±0.02 ^a	48.8±1.72 ^a	2.3±0.12 ^a	129.27±2.49 ^b
	L ₂	7.07±0.11 ^d	0.85±0.03 ^b	0.62±0.04 ^a	35.11±0.24 ^c	1.2±0.25 ^c	114.19±0.33 ^c
	L ₃	8.59±0.26 ^c	0.51±0.03 ^c	0.62±0.02 ^a	28.22±0.54 ^d	0.9±0.02 ^d	123.84±0.35 ^d
	L ₀	9.12±0.16 ^b	0.82±0.05 ^b	0.63±0.04 ^a	44.8±0.13 ^b	1.9±0.23 ^b	135.27±0.49 ^a

注:不同小写字母表示不同施用方式下各指标在不同深度土层中的显著性差异($p < 0.05$)。

表 7 各评价方法权重值

评价指标	有机质		全氮		全磷		碱解氮		速效磷		速效钾	
	0— 20 cm	20— 40 cm	0— 20 cm	20— 40 cm	0— 20 cm	20— 40 cm	0— 20 cm	20— 40 cm	0— 20 cm	20— 40 cm	0— 20 cm	20— 40 cm
AHP 归一化权重 W_A	0.160	0.160	0.171	0.171	0.078	0.078	0.380	0.380	0.137	0.137	0.075	0.075
PCA 归一化权重 W_P	0.235	0.183	0.068	0.184	0.212	0.151	0.220	0.194	0.197	0.167	0.068	0.121
AHP-PCA 权重 W	0.207	0.164	0.064	0.177	0.091	0.066	0.460	0.413	0.149	0.129	0.028	0.051

4 讨论

本研究涉及多变量和多指标,从各指标检测值可直观地得出部分规律。但养分指标、用地类型、污水施用量等因素对结果的影响错综复杂,难以尽数表述到位。为进一步对比每种施用处理的综合效果,采用了 AHP-PCA 结合的方法,将 6 种养分指标进行降维分析,优化了权重,将复杂的结果简单化,同时实现了将不同用地类型土壤的施用结果可进行直接比较,结果较为准确直观。由上文可知,在生活污水不同处理的资源化利用下,除 L₃ 土壤养分评价等级为“良”外,其余生活污水利用处理在各深度土层皆为“优”。说明生活污水中较高的氮、磷、铵盐等组分对土壤养分有一定的补充作用。农村生活污水无害化处理后的利用对于土壤养分是有利而无害的。

研究区的气候特征明显,试验阶段包含了降雨丰富的时期。有研究表明降雨对紫色土表层的速效养分流失影响较大^[20]。本次所选耕地整体有一定坡度,

试验区位于坡体末端,降雨径流携带的养分易聚集于试验区的表层土壤中,且在强降雨时,试验区土壤水分入渗受到限制,壤中流产流和养分淋失显著减少^[21];试验期连续耕作又使得作物根系吸收了深层土壤中的部分养分。以上可能成为耕地养分表层大于深层的原因。且生活污水的适量施用会改善作物根际通气性^[22],增强作物对土壤中养分的吸收能力,由此从土壤的角度来看,G₀ 土壤养分得分大于 G₂。本文试验时间为 2021 年 7—10 月,此时正值玉米成熟期,对氮、磷营养元素吸收最为强烈时期,选择该时段进行试验具有一定典型性和代表性。预测在耕地玉米作物的整个生长期,作物对土壤中氮、磷养分的吸收量会更多,表层和深层土壤养分含量差距会更为明显;20—40 cm 土层中,G₀ 与 G₂ 得分差距也会更为明显。

目前对于林地污水灌溉的研究较少,通常需要经历较长时间才能在植被上产生明显效果^[23]。在本研究的林地区域,20—40 cm 土层的 L₁ 得分最高,说明

深层土壤适量施用有助于养分的改善,而 0—20 cm 土层的 L_0 得分最高,说明林地表层土壤的施用效果较差。与耕地不同,林地无法将吸收的养分进行收割带走,而是通过新陈代谢全部归还给土壤并聚集于表层;而深层土壤容重大,孔隙率小,胶结能力较差,地表养分不易到达,需要一定量的施用促进养分垂向迁移。

耕地与林地的对照组虽无施用处理,但各养分含量依旧比背景值有所增加,说明施用一定程度增加了土壤的通透性,加之试验期间耕地轮作等人为影响,使得相邻无施用区域也随之受益。本试验结果可为川中红层丘陵地区的生活污水无害化处理和资源化利用提供有效参考。

5 结论

(1) 在生活污水资源化利用的不同处理下,除 L_3 土壤养分评价等级为“良”外,其余生活污水利用处理皆为“优”。经处理后的生活污水在多种施用处理下,耕地对提升土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾有明显的效果;林地在少量施用下,对提升 20—40 cm 除速效钾外其余土壤养分的效果较好。耕地中,各施用处理土壤养分评价得分大小排序表现为: $G_1 > G_0 > G_2$;林地中,20—40 cm 土层表现为: $L_1 > L_0 > L_2 > L_3$;0—20 cm 土层为: $L_0 > L_2 > L_1 > L_3$ 。各种施用处理中,对于耕地, G_1 最佳;对于林地, L_0 最佳。短期来看,农村生活污水资源化利用下,适量施用可改善耕地土壤的养分,对于林地无需施用土壤养分就可较好保持。

(2) 综合层次分析法与主成分分析法各自的优势,对生活污水资源化利用下的土壤养分变化进行综合评分,可将耕地林地的试验效果进行直观的得分比较,为农村生活污水的无害化处理和资源化利用提供数据支撑。

[参 考 文 献]

[1] 马灿明,毛云峰,张健,等.我国农村厕所革命相关技术标准规范和实施进展[J].安徽农业科学,2020,48(20):215-221.

[2] 侯怀恩,王子强,赵凤兰.农村生活污水适度处理与资源化利用[J].地域研究与开发,2012,31(6):119-122.

[3] 张增伟,刘庆花,华雪洁,等.农村生活污水土地处理对土壤理化性质的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2012,29(1):26-30.

[4] 李欣.农村生活污水农业利用的可行性及其对作物与土壤的影响研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2018.

[5] Liu Jiantong, Qiu Changqiang, Xiao Bangding, et al.

The role of plants in channel-dyke and field irrigation systems for domestic wastewater treatment in an integrated eco-engineering system [J]. Ecological Engineering, 2000,16(2):235-241.

[6] 钱靖华,林聪,王宇欣,等.都市农业生态系统中污水资源化利用[J].城市环境与城市生态,2004(6):24-26.

[7] 邓利梅,陆传豪,刘刚才.川中丘陵区耕地撂荒对土壤养分的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(3):36-44.

[8] 张维,李启权,王昌全,等.川中丘陵县域土壤 pH 空间变异及影响因素分析:以四川仁寿县为例[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1192-1199.

[9] 刘利昆,赵广举,穆兴民,等.基于最小数据集的青藏公路沿线土壤质量评价[J].水土保持研究,2022,29(2):125-131.

[10] 裴亮,张体彬,陈永莲,等.农村生活污水再生水滴灌对根际土壤特性的影响研究[J].灌溉排水学报,2012,31(4):42-45.

[11] 董君.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].科技资讯,2015,13(29):218,220.

[12] 姚泽清,张洛嘉,熊安邦,等.基于层次分析的主成分分析法及其应用[J].数学的实践与认识,2016,46(18):176-183.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2007:269.

[14] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.

[15] 汪应洛.系统工程[M].2版.北京:机械工业出版社,2003.

[16] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.

[17] 韩小孩,张耀辉,孙福军,等.基于主成分分析的指标权重确定方法[J].四川兵工学报,2012,33(10):124-126.

[18] 闫升,杨建英,史常青,等.基于 AHP-PCA 的铁尾矿不同植被恢复模式土壤养分评价[J].中国水土保持科学,2019,17(6):111-118.

[19] 冯鑫伟.基于多种组合模型的半干旱区次洪量预测[D].陕西 西安:西安理工大学,2018.

[20] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74,101.

[21] 牛文全,郭超.根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J].应用生态学报,2010,21(11):2785-2791.

[22] 赵广.紫色土坡耕地溶解态氮淋失的时空分布特性研究[D].重庆:重庆大学,2014.

[23] 赵丛礼,吴德友.森林在环境保护中的新贡献:林地污水灌溉评价[J].农业环境与发展,1984(2):17-20.