

张晓龙,杨倩楠,李祥东,等. 基于主成分和聚类分析的赤红壤区不同土地利用方式土壤肥力综合评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(9):247-254.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.09.034

基于主成分和聚类分析的赤红壤区不同土地利用方式土壤肥力综合评价

张晓龙^{1,2}, 杨倩楠¹, 李祥东³, 陈 静^{1,2}, 王 超^{1,2}, 张 池⁴, 刘科学^{1,2}

(1. 广州新华学院资源与城乡规划学院, 广东广州 510520; 2. 广东省华南城乡经济社会发展研究院, 广东广州 510642;

3. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广东广州 510520; 4. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642)

摘要:为定量评价赤红壤区不同土地利用方式对土壤肥力特征的影响,本研究以亚热带典型赤红壤区不同土地利用方式的土壤(旱地、园地、菜地)为试验对象,分析各地块土壤物理性质、化学性质和腐殖质组成的变化趋势,通过主成分和聚类分析法定量评价不同土地利用类型土壤综合肥力的差异,以欧氏距离衡量不同地块肥力差异的大小,采用最短距离法对各地块土壤综合肥力进行系统聚类。结果表明,不同土地利用方式表层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)土壤的物理性状、化学性状及腐殖质组成存在显著差异($P < 0.05$),其中土壤有机碳含量、胡敏素碳含量、胡敏酸碳含量、富里酸碳含量、容重、孔隙度、全氮含量、全钾含量和 pH 值等对土壤肥力质量评价的贡献度较大,碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量、全磷含量贡献度较小。土壤肥力质量综合得分排序为旱地表层>旱地亚表层>菜地亚表层>菜地表层>园地表层>园地亚表层。不同地块的土壤肥力质量聚为 5 类,分别为一等肥力(旱地表层)、二等肥力(旱地亚表层、菜地表层)、三等肥力(菜地亚表层)、四等肥力(园地表层)、五等肥力(园地亚表层)。总体来看,土壤肥力优劣的评价顺序均为旱地>菜地>园地,其中园地土壤存在容重较大、酸化严重、养分失衡和有机碳含量过低的现象。因此,依据赤红壤肥力敏感性指标和土壤本身存在的问题,该区域应增大土壤外源碳的输入,丰富有机碳库储量,同时加强科学施肥和测土配方施肥,平衡和优化速效养分含量,进而达到改良土壤物理结构,增强土壤缓冲性能,改善土壤养分状况的目标,以期实现赤红壤区农业的可持续发展。

关键词:赤红壤;土地利用;理化性质;土壤肥力;主成分分析;聚类分类;综合评价

中图分类号:S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)09-0247-07

赤红壤是我国亚热带地区主要的土壤类型之一,总面积为 $1.78 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1],广泛分布于广东、广西、云南、福建等地^[2-3]。该地区水热条件充沛,是我国重要的粮、果、蔬生产基地^[4-5]。但是,赤红壤区土壤普遍存在结构简单、有机质含量低、矿质养分贫乏等特点^[6]。再加上农业生产过程中,不合理的利用方式加剧了土壤贫瘠、沙化、板结等问题^[7-9],而土壤质量退化会直接威胁我国“18 亿亩耕地红线”以及粮食及农产品供给安全。评价赤红壤区不同土地利用方式的土壤肥力特征对于该地

区土壤管理和利用至关重要,是赤红壤区农业活动可持续发展的前提^[10-11]。土地利用方式是人类农业活动的重要反映形式,不同利用方式对土壤扰动程度不同,导致土壤肥力存在显著的时空异质性^[11-12]。土地利用方式通过改变土壤物理性状、化学性状及腐殖质结构进而影响土壤肥力^[13-14]。例如,马和平等对西藏沙壤土不同土地利用方式的研究发现,土壤有机质含量与土地利用强度呈负相关,而土壤养分含量则与土地耕作熟化程度呈正相关;且同一土地利用方式不同深度土壤受到人为扰动的程度不同,其理化性质也存在差异^[11]。李立平等对华北平原潮土的研究发现,不同土地利用方式的土壤 pH 值、碱解氮、速效磷和有机碳含量差异显著^[15]。王振芬等研究了三江平原湿地不同土地利用方式土壤养分和酶活性的差异,发现湿地开发利用程度越高,土壤养分含量越低(全磷除外)^[16]。丁晨曦等对山东省盐碱地的研究发现,土地利用方式通过改变土壤机械组成来影响土壤通气、透水、

收稿日期:2022-07-28

基金项目:广东省自然科学基金(编号:2021A1515011543);广东省教育科学“十三五”规划项目(编号:2020XJK116);广州新华学院校级自然科学类重点项目(编号:2020KYZD02)。

作者简介:张晓龙(1995—),男,山东临沂人,硕士,主要从事土地资源与管理研究。E-mail:zx1995cj@126.com。

通信作者:刘科学,博士,副教授,主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail:28257448@qq.com。

保肥性能,从而改变土壤结构和养分状况^[17]。而张立成等针对赤红壤菜地的研究发现,长期不同的施肥方式会致使土壤碱解氮和速效磷含量发生显著变化^[18]。林新坚等对赤红壤旱地(花生—甘薯轮作)平衡施肥的研究发现,该措施可有效增加作物的产量和土壤有机质、碱解氮和速效钾的含量^[19]。张池等对赤红壤区果园的研究发现,园地的全氮(TN)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)含量较高^[13]。土地利用方式会使土壤的性状发生显著改变,并且不同类型土壤对于人类扰动的敏感程度也不尽相同,进而致使土壤综合肥力的变化趋势产生差异。目前亚热带赤红壤区土壤的研究多集中在单一土地利用类型对土壤理化性质的影响方面,针对不同土地利用方式对土壤综合肥力差异性的研究相对较少,因此就缺乏对赤红壤区土壤质量的全面了解,就不能充分发挥赤红壤区农业生产的巨大潜力。因此,本研究以典型赤红壤区(广州市增城区)3种土地利用方式(旱地、园地和菜地)为对象,解析不同土地利用方式土壤各项基本理化性质的差异及其对综合肥力的影响,以期为赤红壤区土壤养分管控和土地优化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 研究区域概况 广州市增城区(23°05′~23°37′N,113°32′~114°00′E)位于珠江三角洲东北部、广东省中南部、广州市东部,毗邻港澳,临惠州,北界从化。地貌主要以丘陵、平原为主,属亚热带季风气候,年均气温 22.2℃,年均降水量为 1 869 mm,境内有大小河流 6 条,自然条件较好。作为典型的赤红壤区域,区内主要以旱地(玉米)、园地(香蕉)、菜地(辣椒)为代表性农业土地利用方式,是珠江三角洲粮食、水果、蔬菜的主要生产基地^[20]。

1.1.2 样品采集 试验田位于华南农业大学野外工作站,旱地(玉米)、园地(香蕉)、菜地(辣椒)均为单一种植模式超过 10 年,于 2021 年 9 月分别采集这 3 种土地利用方式的表层土壤(0~10 cm)和亚表层土壤(10~20 cm)。每个土地利用方式田块随机设置 3 个采样小区,每个小区按照对角线 5 点采样法采集 1 个混合样。将土壤样品带回实验室,经过风干并去除植物根系和碎石,研磨并过 20、60 目筛后,用于后续理化性质和养分的测定。

1.2 测定项目及方法

土壤理化指标测定^[21]:土壤机械组成采用吸管法测定;土壤容重(BD)和孔隙度(SP)采用环刀法测定;土壤 pH 值测定选用 pH 计电位法(土水质量比为 1:2.5);全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;全钾(TK)含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度计读数法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用 Olsen 法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤腐殖质含量采用腐殖质分组修改法测定。

1.3 土壤肥力评价方法

以 13 个肥力评价因子为分析对象,首先对各指标的数据进行无量纲化处理,然后应用主成分分析,评价因子的累计贡献率确定肥力评价因素数量,最后用系统聚类法选择评价的类别和评价因素。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2010 软件和 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对土壤物理性质的影响

由表 1 可知,旱地、园地和菜地土壤的质地均为粉(沙)壤土。3 种土地利用类型表层土壤(0~10 cm)的粉粒含量、沙粒含量、容重和孔隙度均存在显著差异($P < 0.05$),旱地的沙粒含量和孔隙度最高,粉粒含量和容重最低;而园地的沙粒含量和孔隙度最低,粉粒含量和容重最高;菜地的 4 项指标均居中。类似地,亚表层土壤(10~20 cm)的结果显示,园地的粉粒含量、容重和孔隙度与旱地和菜地也存在显著差异($P < 0.05$)。以上结果表明,不同农业土地利用方式会导致土壤物理性状尤其是土壤机械组成、容重及孔隙度大小发生显著变化。

2.2 不同土地利用方式对土壤化学性质的影响

由表 2 可知,不同土地利用方式的表层土壤(0~10 cm)和亚表层土壤(10~20 cm)的 pH 值均存在显著差异($P < 0.05$)。表层土壤 pH 值范围为 4.23~5.45,顺序为旱地>菜地>园地;亚表层土壤 pH 值范围为 4.31~4.98,顺序为菜地>旱地>园地。表层土壤(0~10 cm)中,除菜地和园地的全磷含量没有显著差异($P > 0.05$)外,全氮、全钾、碱解氮、速效钾的含量在不同土地利用方式之间均存在

表 1 不同土地利用方式土壤的机械组成、质地、容重和孔隙度

土层	土地利用方式	含量(%)			质地	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)
		黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~0.05 mm)	砂粒 (>0.05 mm)			
0 ~ 10 cm	旱地	3.00 ± 0.28a	77.30 ± 0.72c	19.70 ± 0.55a	粉(沙)壤土	1.24 ± 0.01c	53.24 ± 1.47a
	园地	2.33 ± 0.11b	84.83 ± 0.06a	12.84 ± 0.15c	粉(沙)壤土	1.33 ± 0.02a	49.83 ± 1.13c
	菜地	2.47 ± 0.13ab	82.30 ± 0.27b	15.24 ± 0.38b	粉(沙)壤土	1.27 ± 0.01b	52.10 ± 1.25b
10 ~ 20 cm	旱地	2.37 ± 0.09a	78.88 ± 0.49c	18.75 ± 0.54a	粉(沙)壤土	1.26 ± 0.01b	52.48 ± 1.32a
	园地	2.05 ± 0.10a	87.63 ± 0.18a	10.31 ± 0.12b	粉(沙)壤土	1.35 ± 0.02a	49.07 ± 1.10b
	菜地	2.39 ± 0.16a	81.27 ± 1.13b	16.34 ± 1.01a	粉(沙)壤土	1.25 ± 0.01b	52.86 ± 1.33a

注:同列数据后不同小写字母表示相同土层不同土地利用方式间差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

显著差异($P < 0.05$),并且全氮和全钾养分含量均为旱地最高、园地最低,速效钾和碱解氮含量为园地最高、菜地最低。在亚表层土壤(10 ~ 20 cm)中,除旱地和菜地的全氮含量无显著差异($P > 0.05$)

外,其他各项养分含量在不同利用方式之间均存在显著性差异($P < 0.05$)。其中,全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷含量均为旱地最高;全氮、全磷、全钾、速效磷含量均为园地最低。

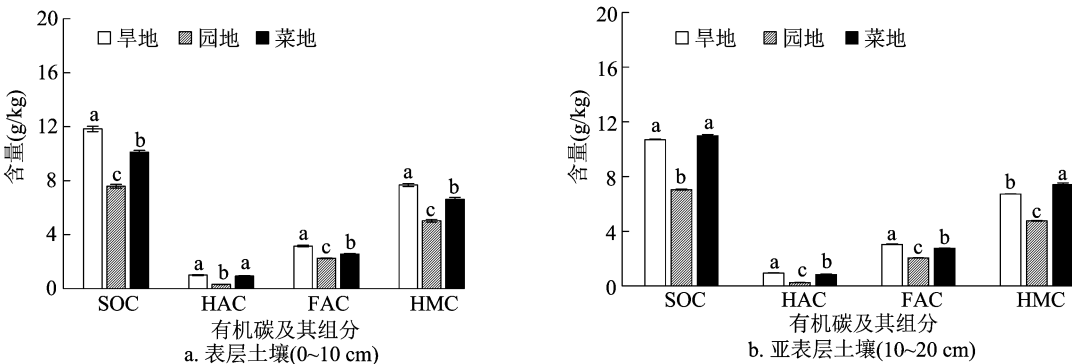
表 2 不同土地利用方式土壤的 pH 值和养分含量

土层	土地利用方式	pH 值	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
0 ~ 10 cm	旱地	5.45 ± 0.05a	1.30 ± 0.01a	1.70 ± 0.04a	17.77 ± 0.20a	106.10 ± 0.90b	250.57 ± 3.00a	271.67 ± 3.33b
	园地	4.23 ± 0.02c	0.90 ± 0.01c	1.49 ± 0.03b	10.53 ± 0.12c	110.63 ± 0.93a	246.93 ± 2.96a	610.00 ± 5.00a
	菜地	5.00 ± 0.05b	1.15 ± 0.01b	1.48 ± 0.05b	13.40 ± 0.23b	86.27 ± 0.85c	196.40 ± 2.00b	186.67 ± 1.67c
10 ~ 20 cm	旱地	4.62 ± 0.02b	1.13 ± 0.01a	1.61 ± 0.02a	16.17 ± 0.26a	93.00 ± 1.56a	258.73 ± 3.97a	126.67 ± 1.67b
	园地	4.31 ± 0.01c	0.92 ± 0.03b	0.50 ± 0.04c	10.43 ± 0.18c	87.90 ± 1.36b	26.67 ± 0.37c	433.33 ± 7.26a
	菜地	4.98 ± 0.03a	1.08 ± 0.03a	1.31 ± 0.02b	14.57 ± 0.28b	82.97 ± 0.83c	203.57 ± 0.69b	88.33 ± 3.33c

2.3 不同土地利用方式对土壤有机碳的影响

腐殖质是土壤养分的重要来源。由图 1 可知,土地利用方式会对土壤有机碳(SOC)的含量以及腐殖质组成产生较大影响。3 种土地利用方式表层土壤(0 ~ 10 cm)的有机碳、富里酸碳(FAC)、胡敏素碳(HMC)含量均差异显著($P < 0.05$),按照从大到小排序为旱地 > 菜地 > 园地,仅旱地和菜地的胡敏

酸碳(HAC)含量差异不显著($P > 0.05$)。亚表层土壤(10 ~ 20 cm)的胡敏酸碳(HAC)、富里酸碳(FAC)、胡敏素碳(HMC)含量在 3 种土地利用类型中也存在显著差异($P < 0.05$),仅旱地和菜地的有机碳(SOC)含量无显著差异($P > 0.05$)。土地利用方式对表层土壤有机碳含量的影响最明显,旱地的有机碳含量分别为菜地、园地的 1.17、1.57 倍。



柱上不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著($P < 0.05$)。下同

图 1 不同土地利用方式的土壤有机碳与腐殖质组分含量

PQ 为胡敏酸碳 (HAC) 在腐殖酸总碳 (HAC + FAC) 中的比例,HA/FA 为胡敏酸碳与富里酸碳的比值,二者均可表征土壤腐殖质的聚合程度。一般,PQ 和 HA/FA 的值越大,胡敏酸碳含量越高,分子量越大、分子结构越复杂,腐殖质状态越活跃、品质越好^[22-23]。由图 2 可知,表层土壤中,土壤 PQ 和 HA/FA 均为菜地最高,旱地次之,园地最低,说

明菜地表层土壤的腐殖化程度最好,旱地居中,园地最差。亚表层土壤中,旱地与菜地的 PQ 和 HA/FA 均无显著性差异($P>0.05$),但是两者都显著高于园地($P<0.05$),说明亚表层土壤中旱地和菜地的腐殖化程度一致较高,园地较小。总体上,相比较菜地和旱地而言,园地土壤不仅腐殖质含量低,而且腐殖化程度也较差。

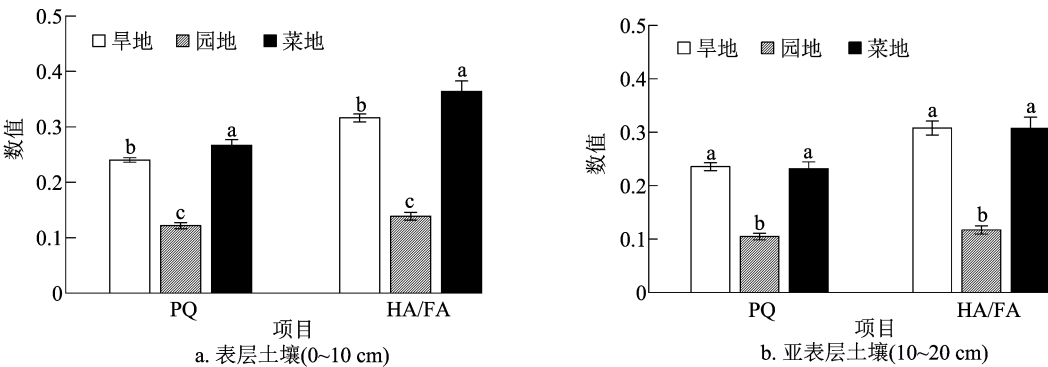
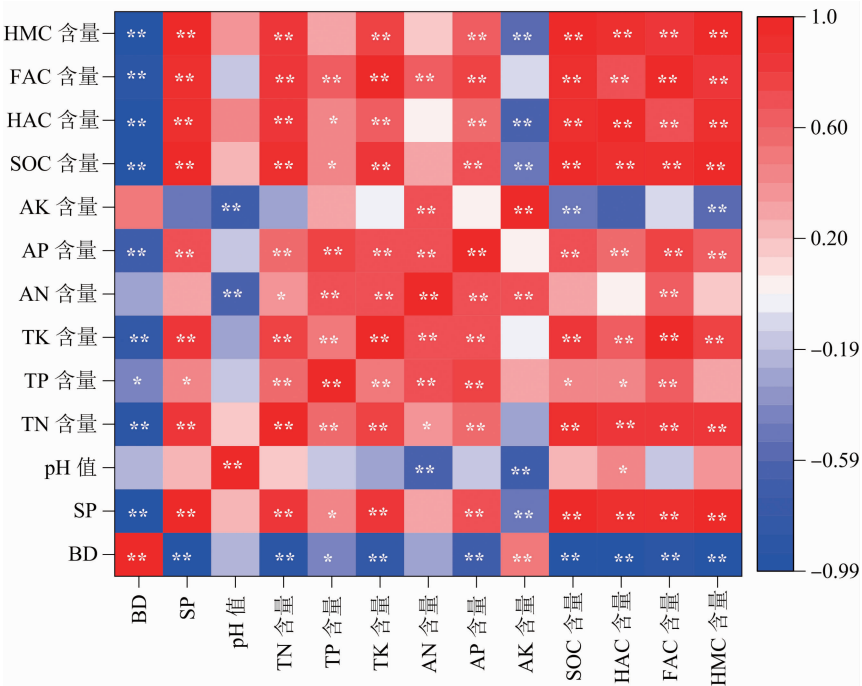


图2 3 种土地利用方式的土壤腐殖质结构特征

2.4 土壤各理化性质指标间的相互关系

不同土地利用方式土壤理化性质之间存在不同程度的相关性。由图 3 可知,土壤容重与孔隙度及全氮、全磷、全钾、速效磷、有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳含、胡敏素碳含量,速效钾含量与孔隙度、pH 值及有机碳、胡敏酸碳、胡敏素碳含量以及碱解氮含量与 pH 值之间均呈显著或极显著负相关。土壤孔

隙度与全氮、全磷、全钾、速效磷、有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素碳含量,全氮含量与全磷、全钾、速效磷、有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素碳含量,全磷含量与碱解氮、速效磷,全钾与碱解氮、速效磷、有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素碳含量,碱解氮含量与速效磷、速效钾、富里酸碳含量,速效磷含量与有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素



* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

图3 土壤各变量间的相关性热图

碳含量以及有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素碳含量彼此互相之间呈显著或极显著正相关。以上结果表明,土壤的物理指标、化学指标、腐殖质组分之间存在复杂的相互关系。直接用这些指标进行土壤肥力评价,必然会造成信息冗余,影响评价结果^[24]。因此,本研究后续选择主成分和聚类分析方法对不同土地利用方式的土壤肥力状况进行综合评定^[25]。

2.5 土壤肥力质量的主成分分析

以 13 个土壤理化性质指标作为评定综合肥力的基础。对原始数据进行标准化处理,以排除不同量纲和数量级对土壤肥力评价结果的影响,确保分析结果的科学性和客观性^[25]。将标准化后的土壤指标分别记作 Z_{BD} 、 Z_{SP} 、 Z_{pH} 、 Z_{TN} 、 Z_{TP} 、 Z_{TK} 、 Z_{AN} 、 Z_{AP} 、 Z_{AK} 、 Z_{SOC} 、 Z_{HAC} 、 Z_{FAC} 、 Z_{HMC} , 然后进行主成分分析。主成分分析结果的特征值(λ)表示各主成分影响的力度,一般以特征值 >1 作为主成分提取个数的原则。本研究提取出 2 个主成分 ($\lambda_1 = 9.58$, $\lambda_2 = 2.31$), 累积贡献率为 91.49% (表 3), 涵盖了原始数据的大部分信息^[26]。因此,以 2 个主成分作为综合变量对本试验土壤肥力状况进行综合评价是科学可行的。

表 3 肥力指标主成分分析

项目	载荷	
	主成分 1	主成分 2
有机碳(SOC)含量	0.996	-0.058
容重(BD)	-0.996	0.063
孔隙度(SP)	0.991	-0.059
胡敏素碳(HMC)含量	0.978	-0.129
胡敏酸碳(HAC)含量	0.976	-0.063
全钾(TK)含量	0.966	-0.015
富里酸碳(FAC)含量	0.957	0.147
全氮(TN)含量	0.936	0.066
pH 值	0.899	-0.003
速效钾(AP)含量	-0.781	0.567
速效磷(AK)含量	0.653	0.593
碱解氮(AN)含量	-0.066	0.956
全磷(TP)含量	0.368	0.817
特征值	9.58	2.31
贡献率(%)	73.71	17.78
累积贡献率(%)	73.71	91.49

各指标对应主成分的载荷值除以相应主成分特征值的算数平方根,得到各指标在主成分上的特征向量,表征各原指标对于主成分的重要程度。根

据主成分计算公式,得到 2 个主成分与 13 项指标的线性组合,其中有机碳(SOC)含量、容重(BD)、孔隙度(SP)及胡敏素碳(HMC)、胡敏酸碳(HAC)、全钾(TK)、富里酸碳(FAC)、全氮(TN)含量和 pH 值对第 1 主成分的影响较大,速效钾(AP)、速效磷(AK)、碱解氮(AN)、全磷(TP)含量对第 2 主成分的影响较大,各主成分函数表达式如下:

$$F_1 = 0.32 \times Z_{SOC} - 0.32 \times Z_{BD} + 0.32 \times Z_{SP} + 0.32 \times Z_{HMC} + 0.31 \times Z_{HAC} + 0.31 \times Z_{TK} + 0.31 \times Z_{FAC} + 0.30 \times Z_{TN} + 0.29 \times Z_{pH} - 0.25 \times Z_{AP} + 0.21 \times Z_{AK} - 0.02 \times Z_{AN} + 0.12 \times Z_{TP};$$

$$F_2 = -0.04 \times Z_{SOC} + 0.04 \times Z_{BD} - 0.04 \times Z_{SP} - 0.08 \times Z_{HMC} - 0.04 \times Z_{HAC} - 0.01 \times Z_{TK} + 0.10 \times Z_{FAC} + 0.04 \times Z_{TN} + 0.01 \times Z_{pH} + 0.37 \times Z_{AP} + 0.39 \times Z_{AK} + 0.63 \times Z_{AN} + 0.54 \times Z_{TP}。$$

每种土地利用方式的综合得分为每个主成分得分与其对应贡献率乘积的总和[公式为 $F = \sum_{i=1}^n B_i F_i$ (n 为主成分个数; B 为第 i 主成分的贡献率; F 为第 i 主成分的得分)]。计算结果(表 4)显示,不同土地利用方式的表层土壤(0~10 cm)综合得分范围为 -2.01~2.74;亚表层土壤(10~20 cm)为 -3.43~1.33,土壤肥力综合得分顺序为旱地表层>旱地亚表层>菜地亚表层>菜地表层>园地表层>园地亚表层。不论是表层土壤还是亚表层土壤,不同利用方式之间土壤肥力综合得分均为旱地最高,菜地次之,园地最差。

表 4 不同土地利用方式土壤肥力综合得分

土层	土地利用方式	第 1 主成分		第 2 主成分		综合得分 (F)	排名
		得分 (F_1)	排名	得分 (F_2)	排名		
0~10 cm	旱地	3.44	1	1.23	2	2.74	1
	菜地	0.67	2	-0.45	3	0.41	4
	园地	-3.26	3	2.13	1	-2.01	5
10~20 cm	旱地	1.75	1	0.26	1	1.33	2
	菜地	1.53	2	-1.90	3	0.79	3
	园地	-4.37	3	-1.28	2	-3.43	6

为了评定不同土地利用方式下土壤肥力的差异,本研究使用系统聚类法对 3 种土地利用类型土壤肥力主成分得分进行聚类分析。以欧氏距离法^[27]将 3 种土地利用方式的表层土壤(0~10 cm)和亚表层土壤(10~20 cm)共分为 5 类(图 4 中虚线所示),同时结合主成分分析结果赋予 5 个肥力

等级^[24,27]:一等肥力为旱地表层、二等肥力为旱地亚表层、菜地表层、三等肥力为菜地亚表层、四等肥力为园地表层、五等肥力为园地亚表层。聚类分析结果最终依然显示旱地肥力最好,菜地次之,园地最差。

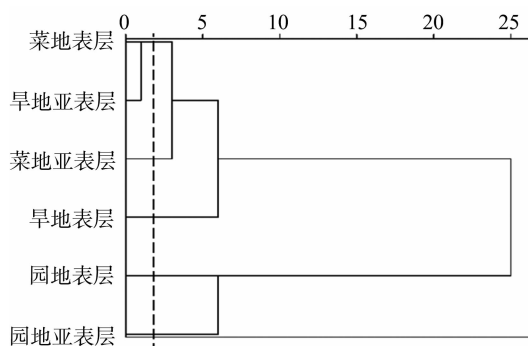


图4 不同利用方式土壤肥力聚类分析谱图

3 讨论与结论

土壤物理性质可以通过影响土壤水分、空气和热量状况制约矿质养分的转化、存在形态和供给平衡,其对于持续培肥土壤、提高土壤生产力、实现土壤资源可持续利用等具有十分重要的意义^[28]。研究发现,表层土壤的容重和孔隙度大小顺序分别为园地>菜地>旱地和旱地>菜地>园地,沙粒含量大小顺序为旱地>菜地>园地,结合土壤肥力指标的 Pearson 相关分析可得,沙粒含量变化规律与容重相反,与孔隙度相一致,这与王玮璐等的研究结果^[29]一致。沙粒含量产生差异的原因可能与不同土地利用方式的耕作制度和施肥模式有关,其中旱地(玉米)采用秸秆还田+翻耕起垄的耕作种植模式,菜地仅为翻耕起垄,园地则为免耕种植。路明等研究证实,秸秆还田和耕作强度都可有效增加土壤中沙粒的含量^[30-31]。土壤化学性质是土壤的保肥能力、缓冲能力、自净能力的重要反映,土壤的酸碱度、矿质养分和有机碳含量等均是化学性质的重要指标。参照《全国第二次土壤普查》分级标准^[32],旱地和菜地的 pH 值范围为 4.62~5.45,属酸性土壤,园地的 pH 值范围为 4.23~4.31,属强酸性土壤。园地土壤酸化较为严重,原因可能与该地区园地矿质养分的投入过量有关。分析园地的土壤养分可知,其表层土壤的全氮、全钾及有机碳含量均为四级,属于中下水平;碱解氮属于三级,属于中上水平;而全磷、速效磷、速效钾含量均为一级,属于极丰水平,并且各含量分别比一级标准临界值

高 49%、517% 和 205%。这表明园地各养分含量呈现两极分化的现象,除碱解氮含量较为合理外,全氮、全钾及有机碳含量较低,而全磷、速效磷、速效钾的含量又过高,尤其是对于速效钾和速效磷而言,含量已经高出其一级临界值的 2 倍和 5 倍以上。而已有研究证明,单一种植模式和长期过量单施化肥会加速土壤酸化^[33-36],而有机肥的投入则会缓解土壤酸化的速率^[37-38]。园地种植作物为香蕉,香蕉为喜钾作物^[39],在实际农业生产过程中过量高钾复合肥的投入可能导致土壤速效养分失衡,加之较低的外源碳输入种植模式,加剧了其酸化的过程。

土壤肥力是土壤各项基本理化性质指标的综合反映,对于农业生产的高效稳定具有重要的现实意义^[40-42]。由于不同土地利用方式对土地的影响强度不同,致使土壤各项肥力指标发生变化,进而导致土壤综合肥力变化^[43-44]。而仅凭 1 项或者几项指标不能科学地反映土壤综合肥力的变化趋势,本研究以 BD、SP、pH 值及 TN、TP、TK、AN、AP、AK、SOC、HAC、ZFAC、HMC 含量共 13 个土壤理化性质指标作为评定综合肥力的基础,通过采用主成分分析和聚类分析方法^[23-24],将原始的 13 个肥力指标降维,主成分综合得分计算和聚类分析结果均显示,无论是表层土壤还是亚表层土壤,旱地的肥力状况均为最好,菜地次之,园地最差。在评价不同土地利用方式的 13 个土壤肥力指标中,土壤 SOC 含量、BD、SP 及 HMC、HAC、TK、FAC、TN 含量和 pH 值等对土壤肥力质量的贡献度较大,AP、AK、AN、TP 含量的贡献度较低。因此,赤红壤区土壤的综合肥力主要对有机碳及其组分、物理结构(BD 和 SP)、全量养分(TP 含量除外)和 pH 值的敏感性较高,对速效养分(AN、AP、AK 含量)的敏感性较低。综上可得,赤红壤区不同土地利用方式的综合肥力评价结果为旱地>菜地>园地,依据赤红壤综合肥力对不同理化指标敏感性程度的高低,建议赤红壤区应科学施肥和测土配方施肥,同时增大土壤外源碳的输入,丰富土壤有机碳库储量,进而达到改良土壤物理结构,增强土壤缓冲性能,改善土壤养分状况的目标^[45-49],以期实现赤红壤区农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 李桂芳,杨任翔,谢福倩,等. 不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J]. 水土保持学报,2020,34(2):101-107,230.
- [2] 钟继洪,郭庆荣,谭 军. 南亚热带丘陵赤红壤理化性质变化及其原因[J]. 地理研究,2004,23(3):312-320.

- [3] 杜爱林, 傅丰贝, 李伏生. 赤红壤碳库管理的滴灌施氮模式研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 1–7.
- [4] 刘序, 李华兴, 胡月明, 等. 大尺度下广东赤红壤全钾含量与地形因子相关分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 886–891.
- [5] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 326–335.
- [6] 农泽梅, 史国英, 曾泉, 等. 赤红壤条件下宿根甘蔗根际可培养细菌的多样性研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(5): 1079–1086.
- [7] 朱永青, 崔云霞, 李伟迪, 等. 太滂运河流域不同用地方式下土壤 pH 值、有机质及氮磷含量特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 171–178.
- [8] 李泽霞, 董彦丽, 马涛. 黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 43–49.
- [9] 黄金生, 谢如林, 曾艳, 等. 长期不同施肥对赤红壤稻田区肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(5): 1144–1149.
- [10] 廖琪, 胡月明, 胡小飞, 等. 广东省典型赤红壤区耕层土壤养分的空间变异[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 322–328.
- [11] 马和平, 屈兴乐, 王建科, 等. 西藏尼洋河中上游流域不同土地利用方式土壤养分含量差异分析[J]. 中国农学通报, 2021, 37(25): 103–108.
- [12] 张永慧, 李贝贝, 张紫妍, 等. 不同土地利用方式对哈尼梯田土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 25–34.
- [13] 张池, 高云华, 陈旭飞, 等. 不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2140–2149.
- [14] 刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡不同土地利用方式下土壤理化性质及空间变异性分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1864–1871.
- [15] 李立平, 邢维芹, 成永霞, 等. 华北平原中部典型农区不同土地利用方式下的土壤性质比较[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1275–1281.
- [16] 王振芬. 三江平原湿地不同土地利用方式对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 43–48.
- [17] 丁晨曦, 李永强, 董智, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲盐碱地土壤理化性质的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 84–89.
- [18] 张立成, 李娟, 李志辉, 等. 基于主成分分析的不同轮作施肥模式下赤红壤肥力质量变化[J]. 山东农业科学, 2021, 53(10): 79–84.
- [19] 林新坚, 章明清, 林琼, 等. 不同施肥模式对赤红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 27–31, 37.
- [20] 龚建周, 刘彦随, 张灵. 广州市土地利用结构优化配置及其潜力[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1391–1400.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 刘鑫, 窦森, 李长龙, 等. 开垦年限对稻田土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 137–145.
- [23] Nebbioso A, Piccolo A. Basis of a humeomics science: chemical fractionation and molecular characterization of humic biosuprastructures[J]. Biomacromolecules, 2011, 12(4): 1187–1199.
- [24] 张成君, 康文娟, 张翠梅, 等. 基于主成分–聚类分析评价不同轮作模式对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 292–300.
- [25] 李霞, 朱万泽, 舒树森, 等. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3891–3900.
- [26] 辛明, 李昌宝, 孙健, 等. 基于主成分和聚类分析的冬瓜品质评价[J]. 热带作物学报, 2019, 40(8): 1638–1644.
- [27] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 325–334.
- [28] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [29] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 等. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2): 69–77.
- [30] 路明, 王丽玄, 程东娟, 等. 秸秆还田下耕作深度对土壤机械组成和土壤密度影响[J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 183–188.
- [31] 陈进豪, 范毅, 户红红. 滇东海峰岩溶盆地石漠化坡地土壤机械组成和有机碳的变化特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 33–39.
- [32] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1158–1165.
- [33] 曲均峰, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和 Olsen-P 的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 90–98.
- [34] 孔宏敏, 何圆球, 吴大付, 等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 782–786.
- [35] Fang H, Liu K L, Li D M, et al. Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105137.
- [36] Liu J A, Shu A P, Song W F, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [37] Xie S W, Yang F, Feng H X, et al. Organic fertilizer reduced carbon and nitrogen in runoff and buffered soil acidification in tea plantations: evidence in nutrient contents and isotope fractionations[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143059.
- [38] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1784–1791.
- [39] 姚丽贤, 周修冲, 彭志平, 等. 巴西蕉的营养特性及钾镁肥配施技术研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 116–121.
- [40] Huang J, Jiang D H, Deng Y S, et al. Soil physicochemical properties and fertility evolution of permanent gully during ecological restoration in granite hilly region of South China[J]. Forests, 2021, 12(4): 510.
- [41] Zhu Y, Guo B, Liu C, et al. Soil fertility, enzyme activity, and microbial community structure diversity among different soil textures under different land use types in coastal saline soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(6): 2240–2252.

张抒情,王 月,张 亚,等. AM 真菌联合柠檬酸对紫云英生长的协同效应[J]. 江苏农业科学,2023,51(9):254-260.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.09.035

AM 真菌联合柠檬酸对紫云英生长的协同效应

张抒情¹,王 月¹,张 亚^{1,2},王立龙^{1,2},柯丽霞^{1,2},杨安娜^{1,2}

(1. 安徽师范大学生命科学学院,安徽芜湖 241000;2. 安徽师范大学安徽省重要生物资源保护与利用重点实验室,安徽芜湖 241000)

摘要:为了解 AM 真菌联合柠檬酸对紫云英生长发育及生理特性的影响,通过接种 *Funneliformis mosseae* 和联合施加柠檬酸进行紫云英温室盆栽试验,测定紫云英幼苗植株形态、根系发育、养分吸收、抗氧化酶活性、渗透调节系统等指标。结果表明,AMF 联合柠檬酸的组别相较于 CK 组株高、分枝数和生物量均显著增加($P < 0.05$)。在不同柠檬酸浓度下,接菌后的紫云英比 CK 组的根冠比和根系活力均显著提升,4 mmol/L 浓度组的根冠比提升了 51.9%、2 mmol/L 浓度组的根系活力提升了 1.34 倍;单独施加柠檬酸可显著增加紫云英磷含量和叶绿素含量,接菌之后进一步提升二者的含量,在接菌且柠檬酸浓度为 4 mmol/L 条件下,磷含量和叶绿素含量较 CK 组分别增加 92.2%、48.2%;AMF 联合柠檬酸可显著促进紫云英抗氧化酶活性:在柠檬酸浓度为 2 mmol/L 条件下的超氧化物歧化酶活性最佳,达 378.38 U/g;在柠檬酸浓度为 4 mmol/L 条件下的过氧化物酶和过氧化氢酶活性最佳,分别达到 1 617.50、1 834.89 U/(g·min);在相同柠檬酸浓度下,联合处理组与单施柠檬酸组相比,进一步显著增加紫云英可溶性糖和可溶性蛋白含量且显著降低丙二醛含量。综上,AM 真菌联合柠檬酸可以通过促进根系发育和养分吸收,进而提高紫云英幼苗生理代谢水平,对紫云英幼苗生长具有一定协同作用。

关键词:AM 真菌;柠檬酸;紫云英;生长发育

中图分类号:S182;S541+.304 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)09-0254-07

丛枝菌根真菌(arcusbular mycorrhizal fungui, AMF)是土壤真菌的重要成员。它属于菌物界球菌门球菌纲,是一类最古老的、专性活体营养共生菌。地球约 90% 的陆生植物都可与丛枝菌根真菌共

生^[1-2]。AMF 如同在土壤和植物之间形成了一座营养互通的桥梁——碳水化合物与矿质养分交换^[3]。AMF 通过共生在植物根皮层细胞中获取植物提供的碳水化合物,作为回报,AMF 根外菌丝帮助植物吸收土壤中的矿质养分(如氮和磷)输送到植物根部,从而促进宿主植物的生长^[4-5]。在可持续农业生产中,利用 AMF 菌根生物技术可以改善植物的生长状况与生态环境^[6]、提高农作物产量^[7]等,AMF 与植物的互作研究已经成为生态农业研究的热点且受到广泛关注。柠檬酸(citric acid)别称枸橼酸,学名 3-羧基-3-羧基戊二酸。在农业植

收稿日期:2022-10-31

基金项目:安徽省自然科学基金(编号:1908085MD104)。

作者简介:张抒情(1995—),女,河北廊坊人,硕士,主要从事土壤微生物学研究。E-mail:550890757@qq.com。

通信作者:杨安娜,博士,副教授,主要从事土壤微生物学研究。E-mail:anyz@163.com。

[42] Lynn T M, Zhuran M, Wang L F, et al. Effect of land use on soil properties, microbial abundance and diversity of four different crop lands in central Myanmar[J]. 3 Biotech, 2021, 11(4):154.

[43] Jemal K, Tesfaye H. Soil physico-chemical property characterisation along with different land use system in Gurage zone, southern Ethiopia[J]. Modern Chemistry, 2020, 8(3):40-47.

[44] Sofo A, Mininni A N, Ricciuti P. Soil macrofauna: a key factor for increasing soil fertility and promoting sustainable soil use in fruit orchard agrosystems[J]. Agronomy, 2020, 10(4):456.

[45] Shu X X, Qi L, Wang Q Y. Effects of different organic fertilizer management modes on phosphorus and potassium content in wheat field[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,

2021, 804:022004.

[46] Li X Q, Su Y, Ahmed T, et al. Effects of different organic fertilizers on improving soil from newly reclaimed land to crop soil[J]. Agriculture, 2021, 11(6):560.

[47] 周喜荣, 张丽萍, 孙 权, 等. 有机肥与化肥配施对果园土壤肥力及鲜食葡萄产量与品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(6):861-868.

[48] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25(10):1669-1678.

[49] 刘学彤, 黄少辉, 邢素丽, 等. 有机肥氮替代部分化肥氮对冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11):71-75.