

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.009

杨崛园, 方艺, 委亚庆, 等. 重庆稻油轮作区土壤养分状况评价. 土壤, 2022, 54(5): 936–944.

重庆稻油轮作区土壤养分状况评价^①

杨崛园¹, 方艺¹, 委亚庆¹, 何竞舟¹, 张世浩¹, 赵敬坤², 付登伟³, 黄秀芬⁴, 刘邦银⁵, 李泽慧¹, 习向银^{1*}

(1 西南大学资源环境学院, 土肥资源高效利用重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 3 重庆市南川区农业推广中心, 重庆 408400; 4 重庆市永川粮油作物技术推广站, 重庆 402160; 5 重庆市合川区农业技术推广站, 重庆 401519)

摘要: 在重庆稻油轮作区南川、永川和合川典型样田进行耕层土壤样品采集, 并测定土壤有机质、全量及速效氮磷钾等 20 个养分指标来表征土壤肥力, 同时采用 SPSS 软件进行因子-聚类分析, 将所有样本的 IFI 值(土壤养分综合评价值)分为 5 个等级并进行土壤肥力评价。结果表明: 3 个稻油轮作区土壤酸化严重, 有机质和全磷及有效磷含量较低, 全氮、碱解氮、交换性钙和交换性镁及绝大多数微量元素含量丰富, 但有效硼含量缺乏。因子分析显示, 有效硼、碱解氮、有机质、速效钾、交换性钾、有效磷、pH 和交换性钙是影响重庆稻油轮作区土壤肥力的主要因素。土壤养分综合评价 IFI 值的聚类分析表明, 重庆稻油轮作区土壤肥力表现为南川>永川>合川, 且南川以中高肥力为主, 永川和合川以低肥力为主。

关键词: 稻油轮作; 因子分析; 聚类分析; 土壤养分

中图分类号: S158 文献标志码: A

Evaluation of Soil Nutrient Status in Rice-oilseed Rape Rotation Area of Chongqing

YANG Jueyuan¹, FANG Yi¹, WEI Yaqing¹, HE Jingzhou¹, ZHANG Shihao¹, ZHAO Jingkun², FU Dengwei³, HUANG Xiufen⁴, LIU Bangyin⁵, LI Zehui¹, XI Xiangyin^{1*}

(1 Key Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 The Agricultural Technology Extension Station of Chongqing, Chongqing 401121, China; 3 The Agricultural Extension Center of Nanchuan District, Chongqing 408400, China; 4 Grain and Oil Crop Technology Extension Station of Yongchuan District, Chongqing 402160, China; 5 The Agricultural Technology Extension Station of Hechuan District, Chongqing 401519, China)

Abstract: Topsoil samples were collected from the typical fields under rice-oilseed rape rotation in Nanchuan, Yongchuan and Hechuan of Chongqing, and 20 soil indexes such as soil organic matter (OM), total and available contents of nitrogen (TN and AN), phosphorus (TP and AP) and potassium (TK and AK), the contents of exchangeable potassium (EK), sodium (ENa), calcium (ECa) and magnesium (EMg), and the contents of available silicon (ASi), boron (AB), iron (AFe), manganese (AMn), copper (ACu) and Zinc (AZn) were measured, factor cluster analysis was carried out by SPSS software, and then soil IFI (integrated fertility index) of all samples were calculated and divided into 5 grades for soil fertility evaluation. The results show that soils in the areas are seriously acidified, the contents of OM, TP and AP are low, and the contents of TN, AN, ECa, EMg and most trace elements are rich, but the content of AB is lack. Factor analysis shows that AB, AN, OM, AK, EK, AP, pH and ECa are the main factors affecting soil fertility. The cluster analysis shows that IFI is in the order of Nanchuan > Yongchuan > Hechuan, and soils in Nanchuan are mainly at the medium and high levels of fertility, while soils in Yongchuan and Hechuan are mainly at the low level of fertility.

Key words: Rice-oilseed rape rotation; Factor analysis; Cluster analysis; Soil nutrients

土壤养分含量丰缺是评价农田土壤肥力肥沃与否的重要手段^[1]。对土壤肥力进行科学的评价可为农业生产合理施肥提供科学依据^[2]。由于土壤母质、类型等自然条件的差异, 土壤肥力会有不同; 即使

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200100)和国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22)资助。

* 通讯作者(xixiangyin@126.com)

作者简介: 杨崛园(1999—), 女, 云南昆明人, 本科生, 主要从事土壤养分相关研究。E-mail: 383481242@qq.com

自然条件相同，人工条件不同也会造成土壤肥力的差异^[3]，如农田不同利用方式和管理手段等。重庆地区位于长江上游，水稻-油菜轮作作为该区域水旱轮作的主要模式之一，对土地用养有重要战略意义^[4]。近年来，重庆稻油轮作区存在诸多问题，制约了水稻和油菜的健康生产。第一，长江上游地区生态脆弱，水稻和油菜的施肥不当导致了肥料利用率降低，尤其是氮肥施用，对生态环境造成破坏。第二，水稻-油菜增产增效潜力巨大，而农户对养分综合管理措施的采用率低，限制了产量潜力的提高^[5-6]。可见，重庆稻油轮作区合理施肥已成为当务之急。

因为土壤各区域存在差异性，所以并没有一个公认的、统一的评价指标，也没有固定的方法来划分土壤肥力评价等级，必须依据所研究地区的实际情况选取科学合理的评价方法。近年来，国内外关于土壤肥力质量评价方法有很多的讨论，国内外专家采用的评价方法各有千秋。国外专家主要采用多变量指标克里格法^[7]、土壤质量动力学方法^[8]、土壤质量综合评分法^[9]等，而国内专家学者则更多采用灰色关联分析^[10]、因子-聚类分析^[11]、主成分分析法^[12]、模糊综合评判法^[13]等。其中，因子分析和聚类分析的结合，可对大量样本数据进行定量统计分析，将关系复杂的变量归纳为少数几个综合因子，较为精准评价土壤养分的质量状况。目前，因子分析和聚类分析已广泛应用于辣椒^[14]、茄子^[15]、苹果^[16]、杧果^[17]等果蔬的品质检测中。此外，关于重庆稻油轮作区土壤肥力评价研究尚未见到报道。因此，本文通过在重庆稻油轮作区采集具有代表性土样，并测定土壤理化性质，然后通过因子-聚类分析方法来进行土壤养分状况和肥力

评价，以为重庆稻油轮作区的合理施肥和农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

在前期调研的基础上，于 2018 年 8—9 月确定重庆稻油轮作区分布集中的南川、永川、合川为调查区域，并在每个区域选取具有代表性的稻油轮作点进行土样采集。南川区包括水江镇宏图村、大观乡铁桥村、东城街道三秀村、三泉乡三泉村。永川区包括仙龙镇双星村、双石镇太平村、来苏镇大磨滩村。合川区包括龙市镇仙岩村、钵耳村、海慧村、渭沱乡荷叶村以及钱塘乡大油村。每个村依据稻油轮作面积大小布设 4~7 个样点，共 56 个样点。调查区域的地理位置为 105°48′~107°13′E 和 29°5′~30°14′N，海拔在 254~602 m，属于亚热带季风气候。

依据“随机、等量和多点混合”的采样原则进行土壤样品的采集。对于同一稻油轮作采样点，沿田块按“S”形取 10 个样点作为一个混合样。土壤样品采集深度为 0~20 cm。用四分法取样 1 kg 左右带回实验室，经自然风干，去除石块、杂草、根系等杂质后磨细，分别过 2、0.25 mm 网筛，混匀，装袋备用。

1.2 方法

1.2.1 土壤理化指标测定方法 参考鲍士旦^[18]的方法对所采土样的全量氮磷钾、土壤 pH、有机质以及碱解氮、速效磷、速效钾、交换性钙镁、阳离子交换量等 20 个指标进行测定。每个指标重复测定 3 次，最后取平均值。具体测定指标及方法如表 1 所示。

表 1 测定指标及方法
Table 1 Determination index and method of soil samples

指标	方法	指标	方法
pH	水浸提电位法(水土质量比为 2.5 : 1)	有机质(OM)	重铬酸钾容量法外加加热法
全氮(TN)	凯氏法	有效硼(AB)	沸水浸提-姜黄素比色法
碱解氮(AN)	NaOH 碱解扩散法	有效硅(ASi)	柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法
全钾(TK)	高氯酸和硫酸浸提法	交换性钾(EK)、交换性钠(ENa)	原子发射光度法
速效钾(AK)	乙酸铵提取-火焰光度计法	交换性酸(EA)	氯化钾交换-中和滴定法
全磷(TP)	NaOH 熔融钼锑抗比色法	阳离子交换量(CEC)	EDTA-铵盐快速法
有效铁(AFe)、有效铜(ACu)、 有效锰(AMn)、有效锌(AZn)	DTPA 浸提-原子吸收分光光度法	交换性钙(ECa)、交换性镁(EMg)	乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法

1.2.2 土壤养分评价标准 根据查阅相关文献中采用的有关标准^[19]和第二次全国土壤普查的养分分级标准，得到表 2。

1.2.3 土壤养分评价方法 第一步，通过因子分析

确定重庆稻油轮作区调查土壤指标主成分特征值、特征向量和主成分累计贡献率；第二步，根据主成分累计贡献率，选择关键主成分，计算各主成分得分，将因子得分系数矩阵与标准化数据相乘得到 *F* 值，再

表 2 耕地土壤养分丰缺划分标准
Table 2 Classification standard of soil indexes for farmland

指标	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏	极缺乏
OM(g/kg)	>40	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20	6 ~ 10	<6
TN(g/kg)	>2.0	1.5 ~ 2.0	1.0 ~ 1.5	0.7 ~ 1.0	0.5 ~ 0.75	<0.5
TP(g/kg)	>0.85	0.65 ~ 0.85		0.45 ~ 0.65		<0.45
TK(g/kg)	>20	15 ~ 20		10 ~ 15		<10
AN(mg/kg)	>150	120 ~ 150	90 ~ 120	60 ~ 90	30 ~ 60	<30
AP(mg/kg)	>40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 10	3 ~ 5	<5
AK(mg/kg)	>200	150 ~ 200	100 ~ 150	50 ~ 100	30 ~ 50	<30
ACu(mg/kg)	>1.8		1.0 ~ 1.8	0.2 ~ 1.0	0.1 ~ 0.2	<0.1
AZn(mg/kg)	>3.0		1.0 ~ 3.0	0.5 ~ 1.0	0.3 ~ 0.5	<0.3
AFe(mg/kg)	>20.0		10.0 ~ 20.0	4.5 ~ 10.0	2.5 ~ 4.5	<2.5
AMn(mg/kg)	>30		15 ~ 30	5 ~ 15	1 ~ 5	<1
ECa(mg/kg)	>1000		700 ~ 1000	500 ~ 700	300 ~ 500	<300
EMg(mg/kg)	>300		200 ~ 300	100 ~ 200	50 ~ 100	<50
ASi(mg/kg)	>300	200 ~ 300		100 ~ 200		<100
AB(mg/kg)	>2.0		1.0 ~ 2.0	0.5 ~ 1.0	0.2 ~ 0.5	<0.2
指标	强碱性	碱性	中性	酸性	强酸性	
pH	<8.5	7.5 ~ 8.5	6.5 ~ 7.5	5.0 ~ 6.5	<5.0	

利用综合得分公式(2)求出各样点的 IFI 值^[20]；第三步，根据得出的 IFI 值，采用类平均法对土壤样品进行系统聚类分析，并根据聚类结果和 IFI 值大小评价其土壤肥力高低。

标准化数据公式为：

标准化数据=(原始数据 - 数据平均值)/数据标准差 (1)

IFI 计算公式为：

$$IFI=\lambda_1F1+\lambda_1F2...+\lambda_mFm$$
 (2)

式中： λ 为因子贡献率； F 为计算出的因子； m 为公因数，本文取值 7。

1.3 数据统计分析

本文所有试验数据均采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤养分概况

由表 3 可知，调研地区永川、合川、南川稻油轮作区土壤的平均 pH 为 5.30，变幅在 4.10 ~ 7.50，变异系数为 16.30%；土壤 OM(均值 24.45 g/kg，下同)、TP(0.49 g/kg)、AP(17.00 mg/kg)、AK(135.23 mg/kg)、ACu(2.83 mg/kg)、AZn(3.25 mg/kg)、AFe(46.21 mg/kg)、ASi(381.54 mg/kg)、EK(0.37 cmol/kg)和 ECa(5.65 g/kg)的变异系数较大，均大于 40%，其中，ASi 的变异系数最大，变异系数达 85.45%；TN(1.34 g/kg)、

TK(16.56 g/kg)、AN(121.28 mg/kg)、AMn(38.05 mg/kg)、ENa(0.22 cmol/kg)、EA(6.02 cmol/kg)和 AB(0.33 mg/kg)的变异系数较小；EMg 含量均值仅 0.33 g/kg，变异系数为 36.45%，变化幅度低于 ECa；CEC 均值为 23.60 cmol/kg，变异系数最小，为 15.62%。

2.2 土壤养分分级评价

由表 4 可知，3 个稻油轮作区酸性土壤(pH<6.5)的比例高达 87.50%，且强酸性土壤比例为 48.21%，说明南川、永川和合川稻油轮作区土壤酸化现象严重；有 44.64% 的土壤 OM 属于缺乏或极缺乏水平(<20 g/kg)；TN、AN 处于中等及以上等级土壤比例为 94.64%、78.58%，说明调研土壤中的氮素含量都比较丰富；73.21%的土壤 TP 含量处于较缺乏或更低水平(<0.65 g/kg)；接近一半的土壤 TK(44.62%)和 AK(46.43%)含量处于较缺乏及以下水平。3 个稻油轮作区土壤 ECa 含量均处于丰富状态，83.93% 的土壤 EMg 含量均处于中等及以上水平。3 个地区土壤 AB 含量都处于较缺乏及以下等级，其他微量元素含量还未出现严重缺乏现象。

2.3 土壤养分因子分析的数据检验

对稻油轮作区土壤养分进行相关性分析可知(表 5)，pH 与 ECa(0.565)、pH 与 TP(0.561)、OM 与 AB(0.903)、OM 与 AN(0.866)、OM 与 TP(0.692)、OM 与 TN(0.757)、TN 与 AB(0.677)、TN 与 ASi(0.518)、TN 与 ECa(0.567)、TN 与 AN(0.651)、TP 与 AB(0.541)、

表 3 重庆稻油轮作区土壤养分描述性统计

Table 3 Descriptive statistical information of soil indexes in rice-oilseed rape rotation area of Chongqing

土壤指标	极差	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(%)
pH	3.40	4.10	7.50	5.30	0.86	16.30
OM(g/kg)	44.60	7.00	51.60	24.45	11.38	46.53
TN(g/kg)	1.75	0.72	2.47	1.34	0.41	30.50
TP(g/kg)	1.09	0.06	1.15	0.49	0.24	49.06
TK(g/kg)	20.00	10.00	30.00	16.56	5.06	30.55
AN(mg/kg)	153.20	49.80	203.00	121.28	35.40	29.19
AP(mg/kg)	47.60	4.40	52.00	17.00	11.20	65.89
AK(mg/kg)	470.00	40.00	510.00	135.23	105.08	77.71
ACu(mg/kg)	8.10	0.60	8.70	2.83	1.72	60.90
AZn(mg/kg)	6.80	0.60	7.40	3.25	1.63	50.31
AFe(mg/kg)	64.46	0.74	65.20	46.21	20.67	44.74
AMn(mg/kg)	45.70	3.40	49.10	38.05	11.39	29.93
EK(cmo/kg)	0.81	0.17	0.97	0.37	0.17	45.92
ENa(cmol/kg)	0.52	0.11	0.63	0.22	0.09	38.91
ECa(g/kg)	11.55	1.26	12.81	5.65	2.95	52.25
EMg(g/kg)	0.58	0.09	0.67	0.33	0.12	36.45
EA(cmol/kg)	9.57	2.05	11.62	6.02	2.00	33.23
CEC(cmol/kg)	15.36	14.51	29.87	23.60	3.69	15.62
ASi(mg/kg)	2423.00	103.00	2526.00	381.54	326.03	85.45
AB(mg/kg)	0.41	0.16	0.57	0.33	0.09	29.02

表 4 重庆稻油轮作区土壤养分不同等级构成(%)

Table 4 Proportions of soil index grades in rice-oilseed rape rotation area of Chongqing

指标	丰富	较丰富	中等	较缺乏	缺乏	极缺乏
OM	8.93	23.21	23.21	41.07	3.57	0.00
TN	10.71	12.50	71.43	5.36	0.00	0.00
TP	5.36	21.43		23.21		50.00
TK	14.29	41.07		42.86		1.76
AN	17.86	33.93	26.79	16.07	5.36	0.00
AP	5.36	25.00	35.71	30.36	3.57	0.00
AK	19.64	0.00	33.93	37.50	8.93	0.00
ACu	71.43		23.21	5.36	0.00	0.00
AZn	53.57		39.29	7.14	0.00	0.00
AFe	82.14		7.14	7.14	1.79	1.79
AMn	82.14		10.71	3.57	3.57	0.00
ECa	100.00		0.00	0.00	0.00	0.00
EMg	66.07		17.86	14.29	1.79	0.00
ASi	58.93	26.79		14.29		0.00
AB	0.00		0.00	5.36	85.71	8.93
指标	强碱性	碱性	中性	酸性	强酸性	
pH	0.00	0.00	12.50	39.29	48.21	

TP 与 ECa(0.583)、TP 与 AP(0.738)、TP 与 AN(0.525)、AN 与 AB(0.942)、AP 与 AK(0.642)、AP 与 EK(0.670)、AK 与 EK(0.949)之间相关性均大于 0.5, 呈极显著正相关; ENa 与其他指标相关性均不显著。此外, AK 与 EK 相关性最高。因此, 根据相关性分析可

知, 3 个地区除 ENa 外, 各土壤养分指标间均存在不同程度的相关性, KMO 测度为 0.724(>0.6), 球形检验伴随概率 sig = 0.000(<0.05), 巴特利球形度检验统计量为 911.624, 表明这些数据可以进行因子分析。

表 5 稻油轮作区土壤养分相关性
Table 5 Correlation among soil indexes of farmlands under rice-oilseed rape rotation

指标	pH	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	ACu	AZn	AFe	AMn	EK	ENa	ECa	EMg	EA	CEC	ASi
OM	0.421**																		
TN	0.454**	0.757**																	
TP	0.561**	0.692**	0.445**																
TK	0.203	0.438**	0.481**	0.297*															
AN	0.181	0.866**	0.651**	0.525**	0.420**														
AP	0.456**	0.442**	0.264*	0.738**	0.245	0.346**													
AK	0.301*	0.23	0.211	0.427**	0.108	0.194	0.642**												
ACu	0.346**	0.484**	0.359**	0.406**	0.261	0.362**	0.339*	-0.036											
AZn	-0.265*	0.109	-0.228	0.176	0.085	0.232	0.362**	0.306*	-0.129										
AFe	-0.554**	-0.156	-0.267*	-0.478**	-0.127	0.033	-0.174	-0.058	0.094	0.25									
AMn	-0.491**	-0.347**	-0.441**	-0.158	-0.15	-0.166	-0.232	0.029	-0.483**	0.405**	0.135								
EK	0.346**	0.258	0.262	0.461**	0.146	0.247	0.670**	0.949**	0.022	0.234	-0.093	-0.015							
ENa	-0.084	0.029	0.056	-0.037	-0.246	0.152	0.001	0.206	0.01	0.003	0.191	0.165	0.195						
ECa	0.565**	0.483**	0.567**	0.583**	0.347**	0.455**	0.323*	0.194	0.252	-0.269*	-0.545**	-0.238	0.296*	0.075					
EMg	-0.147	-0.616**	-0.340*	-0.530**	-0.145	-0.445**	-0.412**	0.028	-0.560**	-0.177	-0.001	0.199	0.025	0.152	-0.069				
EA	-0.064	-0.103	-0.13	0.081	-0.128	-0.115	0.057	-0.018	-0.044	-0.113	0.023	0.06	-0.019	-0.042	0.032	-0.036			
CEC	0.296*	0.067	0.264*	0.168	0.224	0.019	0.221	0.113	0.184	-0.345**	-0.202	-0.182	0.197	0.15	0.478**	0.037	0.234		
ASi	0.297*	0.277*	0.518**	-0.12	0.411**	0.119	-0.009	-0.064	0.162	-0.270*	-0.062	-0.458**	-0.056	-0.137	0.259	-0.102	-0.159	0.280*	
AB	0.206	0.903**	0.677**	0.541**	0.375**	0.942**	0.313*	0.192	0.367**	0.194	0.007	-0.178	0.222	0.178	0.432**	-0.496**	-0.108	0.026	0.144

注：*、**分别表示相关性在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著。

2.4 土壤养分的因子分析

基于以上相关分析结果，可继续进行因子分析。根据特征值 ≥ 1 的原则进行公因子的提取，本研究提取到 7 个公因子，其方差贡献率(λ)依次分别为 31.856%、13.841%、11.988%、7.690%、6.749%、6.429%、5.391%，前 7 个公因子累计贡献率为 83.944%(表 6)，说明重庆稻油轮作区土壤所有肥力指标所提供信息的 83.944%可通过前 7 个因子表征。由表 6 可知，因子所对应的指标载荷值大小与其反映该指标信息的多少成正比。因子

1 主要反映了 AB(因子负载值:0.946,下同)、AN(0.935)、OM(0.886)的信息；因子 2 主要体现了 AK(0.941)、EK(0.931)和 AP(0.788)的信息；因子 3 主要显示了 ECa(0.693)和 pH(0.679)的信息；因子 4 主要体现了 ACu(0.749)的信息；因子 5 主要体现了 ASi(0.820)和 TK(0.645)的信息；因子 6 主要体现了 ENa(0.860)的信息；因子 7 主要体现了 EA(0.846)和 CEC(0.634)的信息。因此,重庆稻油轮作区土壤肥力综合评价的主要影响因素为 AB、AN、OM、AK、EK、AP、ECa 和 pH。

表 6 旋转因子载荷矩阵及累计贡献
Table 6 Rotated component matrix and cumulative contribution

项目	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
pH	0.102	0.323	0.679	0.45	0.156	-0.027	-0.05
OM	0.886	0.164	0.177	0.257	0.134	-0.048	-0.066
TN	0.63	0.094	0.318	0.234	0.491	0.129	-0.058
TP	0.581	0.458	0.485	0.185	-0.233	-0.214	0.163
TK	0.418	0.139	0.06	-0.106	0.645	-0.386	0.063
AN	0.935	0.130	0.007	0.016	0.115	0.087	-0.057
AP	0.287	0.788	0.128	0.285	-0.086	-0.218	0.151
AK	0.064	0.941	0.057	-0.071	0.036	0.138	-0.041
ACu	0.404	0.028	-0.055	0.749	0.023	-0.040	0.135
AZn	0.265	0.429	-0.429	-0.363	-0.284	-0.342	-0.177
AFe	-0.001	-0.026	-0.924	0.066	0.023	0.184	0.014
AMn	-0.048	0.004	-0.196	-0.781	-0.338	0.005	0.093
EK	0.094	0.931	0.116	-0.041	0.074	0.162	0.007
ENa	0.149	0.143	-0.125	-0.075	-0.147	0.860	0.035
ECa	0.411	0.142	0.693	0.023	0.270	0.160	0.227
EMg	-0.602	-0.01	0.099	-0.477	0.221	0.354	-0.101
EA	-0.074	-0.028	-0.029	-0.021	-0.169	-0.064	0.846
CEC	-0.027	0.152	0.265	0.124	0.431	0.241	0.634
ASi	0.074	-0.088	0.050	0.280	0.820	-0.056	-0.090
AB	0.946	0.100	0.029	0.055	0.091	0.116	-0.063
特征值	6.371	2.768	2.398	1.538	1.350	1.286	1.078
方差贡献率(%)	31.856	13.841	11.988	7.690	6.749	6.429	5.391
累计方差贡献率(%)	31.856	45.697	57.685	65.375	72.124	78.553	83.944

2.5 土壤养分的聚类分析

根据公式(1)和表 7 中的数据，可以得出以上 7 个因子的得分表达式，将各个标准化后的指标带入得分表达式，然后得到每个土壤样本 F1 ~ F7 的值，再根据公式(2)可以得到 IFI 的表达式： $IFI = 0.319 F1 + 0.138 F2 + 0.120 F3 + 0.077 F4 + 0.067 F5 + 0.064 F6 + 0.054 F7$ ，再分别带入每个样本 F1 ~ F7 的值，从而可计算出所有土壤样品的 IFI 值。

以欧氏距离(各项值之间平方差之和的平方根)

为衡量样本间差异大小的依据，采用组间联接的方法对调研地永川、合川、南川的稻油轮作田土壤养分水平进行系统聚类。因子-聚类分析结果表明，重庆稻油轮作区土壤样本的 IFI 值可分为 5 个等级，具体包括：一级： ≥ 1.103 ，属于极高肥力；二级：0.404 ~ 0.764，属于高肥力；三级：0.066 ~ 0.347，属于中等肥力；四级： $-0.456 \sim -0.050$ ，属于低肥力；五级： $-0.669 \sim -0.509$ ，属于极低肥力。根据分级结果计算出永川、合川、南川稻油轮作土壤肥力等级所占比例，

表 7 因子得分系统矩阵
Table 7 Matrix of component score coefficients

项目	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
pH	-0.097	0.081	0.256	0.194	-0.049	0.005	-0.142
OM	0.213	-0.043	0.016	0.015	-0.019	0.007	-0.055
TN	0.124	-0.035	0.051	-0.016	0.183	0.104	-0.065
TP	0.104	0.057	0.193	0.007	-0.228	-0.12	0.076
TK	0.079	0.04	-0.087	-0.235	0.411	-0.314	0.104
AN	0.276	-0.06	-0.042	-0.119	0.012	0.09	-0.018
AP	-0.048	0.279	-0.053	0.146	-0.057	-0.146	0.083
AK	-0.09	0.369	-0.057	-0.017	0.067	0.077	-0.066
ACu	0.027	-0.007	-0.141	0.417	-0.085	0.024	0.081
AZn	0.088	0.165	-0.175	-0.18	-0.04	-0.245	-0.068
AFe	0.02	0.081	-0.496	0.151	0.134	0.126	0.099
AMn	0.119	-0.027	0.025	-0.436	-0.076	-0.033	0.133
EK	-0.084	0.356	-0.039	-0.015	0.075	0.093	-0.035
ENa	0.084	0.02	-0.049	0.021	-0.114	0.619	-0.001
ECa	0.093	-0.056	0.276	-0.151	0.041	0.105	0.118
EMg	-0.133	0.054	0.099	-0.232	0.19	0.194	-0.092
EA	0.022	-0.035	-0.074	-0.04	-0.061	-0.082	0.678
CEC	-0.046	0.047	-0.02	-0.019	0.228	0.12	0.468
ASi	-0.059	0.015	-0.113	0.062	0.454	-0.063	-0.059
AB	0.279	-0.076	-0.027	-0.093	-0.015	0.116	-0.029

结果如表 8 所示。由表 8 可知，南川稻油轮作区有 95.0% 土壤处于中等及以上肥力；永川稻油轮作区有 86.3% 土壤处于低及极低的肥力；合川稻油轮作区所有地块均处于低肥力及其以下。重庆稻油轮作区中只有不到 1/5 的土壤处于高肥力及以上水平。综上，说明重庆稻油轮作区土壤养分肥力低下，需要用养结

合。综合而言，南川稻油轮作区土壤 IFI 均值高于永川和合川，且高肥力土壤所占比重远远高于永川和合川，表明南川稻油轮作区土壤肥力水平远高于永川和合川；永川稻油轮作区高肥力土壤占比仅为 13.6%，且其低肥力土壤比重也高于合川，这表明永川稻油轮作区的土壤肥力综合水平高于合川。

表 8 重庆稻油轮作区不同土壤肥力等级所占比例(%)
Table 8 Proportions of soils with different fertility grades in rice-oilseed rape rotation areas of Chongqing

地点	样本数	变幅	均值	标准差	极高	高	中等	低	极低
南川	20	-0.132 ~ 1.111	0.393	0.322	10.0	40.0	45.0	5.0	0.0
永川	22	-0.509 ~ 0.341	-0.144	0.206	0.0	0.0	13.6	81.8	4.5
合川	14	-0.669 ~ -0.093	-0.329	0.162	0.0	0.0	0.0	78.6	21.4

3 讨论

养分状况及肥力评价对指导重庆稻油轮作区进行科学施肥有重要作用。永川、南川和合川都处于渝中、渝西高岗丘陵农业区，母质主要以紫色砂、泥页岩为主，土壤以物理风化为主，发育程度较浅^[21]。一般来说，基础地力升高，将导致土壤肥力水平提升^[22]。在目标产量相同的情况下，高肥力土壤对肥料的需求量比低肥力土壤需求量小^[23-25]。可见，科学评价土壤

肥力是合理施肥的重要依据。
本研究结果显示，重庆稻油轮作区有机质较为缺乏，且大部分土壤碱解氮含量处于较高水平。土壤中众多营养元素都来源于土壤有机质，特别是氮素和磷素。同时，有机质也为土壤微生物提供了必不可少的碳源和能源。此外，有机质疏松多孔，又是亲水胶体，能吸持大量水分和阳离子，能促进团粒结构形成，从而使土壤具有良好的保水保肥及通气透水性能。因此，土壤有机质含量是衡量土壤肥力高低的重要化学

指标之一^[26]。本研究结果表明,重庆稻油轮作区有机质较为缺乏,且大部分土壤碱解氮含量处于中上等水平。这与该区域土壤母质容易风化有关,同时与有机肥使用过少及氮肥施用不当有关^[27]。前人研究表明,土壤有机质在水稻土的基础地力中起主导作用^[28]。因此,重庆稻油轮作区应该因地制宜进行秸秆还田或其他有机肥施用,或者调整现有施肥手段,从而提高土壤肥力。

土壤酸碱度对土壤养分有效性和土壤微生物活性起着重要作用。本研究结果显示,重庆稻油轮作区土壤酸化严重。导致土壤酸化的原因有以下方面:第一,重庆稻油轮作区农户复合肥和尿素施用量大,导致铵态氮的硝化过程变快,从而释放大量氢离子,导致土壤 pH 下降;第二,重庆地区降雨量较大,降雨导致土壤中的碱基化合物大量淋失,极大增加了土壤交换性氯及铝含量,从而使土壤呈酸性^[29]。此外,土壤 pH 低下限制了重庆市低肥力稻田产量的提升^[30]。因此,建议重庆稻油轮作区酸化严重的田块进行适量石灰或者草木灰等碱性肥料添加,同时也配合施用有机肥来改善土壤物理性能。

本研究表明,重庆稻油轮作区大多数地块的 TP 含量处于较缺乏或更低水平,且约有 40% 的土壤 AP 含量处于缺乏和极缺乏水平。这与其母质特性和土壤发育浅有关^[21],同时土壤 pH<5 会导致土壤中的活性铁铝增加并易形成磷酸铝铁沉淀而使土壤有效磷含量降低。为提高土壤有效磷含量,部分重庆农户一般按照经验施用磷肥^[31],因为磷肥的当季利用率一般只有 10%~25%,但过量盈余的磷肥会在土壤中聚存^[32]。本研究表明,近半数地块的 TK 和 AK 含量处于较缺乏或更低水平。这主要是因为耕地土壤中钾素的含量会受到许多因素的影响,主要受母质、成土条件以及耕作历史等因素的影响。何竟舟^[27]的调研表明,重庆市农户在水稻和油菜生长前期施用较多钾肥,而生长后期施用较少,前期施入的钾肥由于南方地区降雨较多容易导致流失。研究表明,钾素也会因为土壤酸化快速风化并流失,从而造成农田钾素养分含量下降^[33]。钾素充足与否还可以影响氮肥的利用率,若供钾充足可使作物能够最大限度发挥氮肥的增产作用。因此,土壤中不同的钾肥供应水平将使得作物对施氮量的响应被改变^[34]。

土壤基础地力由于施肥方式不同将朝着不同方向发展,中低产田的改良主要在于培育和提升土壤地力。基础地力高的地块具有更为良好的抗逆性和稳定性,在不利环境下也能保持作物产量的稳定。提高土

壤基础地力还可以减少对化肥的依赖,减轻环境的负担,实现“藏粮于地”^[24]。本研究表明,在重庆稻油轮作区南川土壤肥力高于永川和合川,且南川中高肥力等级比例最高。因此,永川和合川稻油轮作田块需要合理施肥进行地力培育和提升,且南川稻油轮作区对肥料依赖性小于永川和合川。

4 结论

1)重庆南川、永川和合川稻油轮作区的土壤酸化严重,OM、TP 和 AP 含量较低,TN、AN、ECa、EMg 含量及大部分微量元素丰富,AB 含量严重缺乏。

2)因子分析表明,AB、AN、OM、AK、EK、AP、pH 和 ECa 是影响重庆稻油轮作区土壤养分综合状况的主要因素。聚类分析显示,南川稻油轮作土壤处于中高等级肥力的比例为 95.0%;永川有 86.3% 的稻油轮作土壤处于低以及极低的肥力水平;合川所有稻油轮作土壤都在低肥力水平及其以下。土壤养分综合评价价值(IFI)具体表现为:南川>永川>合川。

3)重庆稻油轮作区应因地制宜进行秸秆还田或其他有机肥施用,适量增施磷钾肥,控制氮肥和补充硼肥,并通过添加石灰或者草木灰等碱性肥料来改善土壤酸化现状,而且要特别重视合川和永川中低产田的地力培育。

参考文献:

- [1] 高祥照,马文奇,崔勇,等.我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):363-369.
- [2] 骆东奇,白洁,谢德体.论土壤肥力评价指标和方法[J].土壤与环境,2002,11(2):202-205.
- [3] 李梅,张学雷.基于GIS的农田土壤肥力评价及其与土体构型的关系[J].应用生态学报,2011,22(1):129-136.
- [4] 范明生.水旱轮作系统养分资源综合管理研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [5] 鲁剑巍.中国油菜生产的高产高效氮素管理[J].中国农业科学,2016,49(18):3504-3505.
- [6] 傅廷栋.油菜生产品种改良与机械化[J].农业装备技术,2010,36(2):22-25.
- [7] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 743-749.
- [8] 李鑫,张文菊,邹磊,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.
- [9] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[M]. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy,1994.

- [10] 许瑶, 肖亨, 伍钧, 等. 基于灰色关联分析法的 Cd 污染土壤-植物系统安全生产评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1051–1059.
- [11] 徐帆, 蒋梦丹, 柴伟国, 等. 不同种源三叶青的农艺性状和品质性状的因子分析和聚类分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 408–415.
- [12] 赵瑞芬, 程滨, 滑小赞, 等. 基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 61–68.
- [13] 吴小芳, 张振山, 范琼, 等. 海南省果园土壤肥力综合评价研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 2109–2118.
- [14] 桂敏, 龙洪进, 钟秋月, 等. 引进辣椒种质资源果实性状的多元统计分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(2): 772–776.
- [15] 鲍锐, 吴丽艳, 黎志彬, 等. 引进茄子种质资源产量相关性状的多元统计分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 659–664.
- [16] 匡立学, 聂继云, 李志霞, 等. 不同苹果品种果实矿质元素含量的因子分析和聚类分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2807–2815.
- [17] 马小卫, 马永利, 武红霞, 等. 基于因子分析和聚类分析的杧果种质矿质元素含量评价[J]. 园艺学报, 2018, 45(7): 1371–1381.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 郭继阳, 张汉卿, 杨越, 等. 基于因子-聚类分析的菠萝园土壤养分状况评价[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 137–143.
- [20] 殷冬梅, 张幸果, 王允, 等. 花生主要品质性状的主成分分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(4): 507–512, 518.
- [21] 詹江渝. 重庆农地土壤基本状况及肥力特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [22] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1070–1078.
- [23] 夏圣益. 土壤基础地力、施肥水平与农作物产量的关系[J]. 上海农业科技, 1998(1): 6–8.
- [24] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2886–2894.
- [25] 廖育林, 鲁艳红, 聂军, 等. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1249–1258.
- [26] 杨瑞吉, 杨祁峰, 牛俊义. 表征土壤肥力主要指标的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(1): 86–91.
- [27] 何竞舟. 重庆稻油轮作区氮肥综合管理技术研究[D]. 西南大学, 2020.
- [28] 胡少宜. 漳州市水稻土的地力贡献率初探[J]. 土壤, 1992, 24(1): 46–47.
- [29] 王存龙, 张殿成, 刘华峰, 等. 烟台市土壤有机氯农药分布及迁移规律[J]. 地球与环境, 2012, 40(2): 171–178.
- [30] 梁涛, 廖敦秀, 陈新平, 等. 重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(16): 3106–3116.
- [31] 范明生, 樊红柱, 吕世华, 等. 西南地区水旱轮作系统养分管理存在问题分析与策略建议[J]. 西南农业学报, 2008, 21(6): 1564–1568.
- [32] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 I. 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360–364.
- [33] 梁涛. 基于土壤基础地力的施肥推荐研究——以重庆水稻和玉米为例[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [34] Bruns H A, Ebelhar M W. Nutrient uptake of maize affected by nitrogen and potassium fertility in a humid subtropical environment[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37(1/2): 275–293.