

川中丘陵区典型紫色土肥力及风化程度的演变趋势及影响因素^①

汪 璇^{1,2}, 邓利梅^{1,2}, 崔荣阳^{1,2}, 刘刚才^{1*}

(1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探明川中丘陵区典型紫色土肥力和风化程度的动态变化特征及影响因素, 根据全国第二次土壤普查的采样点信息, 于2021年4月再次采集典型紫色土耕层(0~20 cm)土壤样品, 测定了相关土壤理化性质, 计算了土壤肥力和风化指标, 并与全国第二次土壤普查结果进行了比较分析。结果表明: ①土壤理化性质中, 除土壤pH降低外, 研究区紫色土其他指标40年来皆有所提升, 其中全钾、有效磷、有机质、阳离子交换量和碳氮比提升显著($P<0.05$), 土壤综合肥力系数IFI也显著增加($P<0.05$); ②40年来研究区紫色土风化程度加深, 但依旧保持中等风化水平, 脱硅富铝铁化程度增强, 表观淋溶作用减弱; ③土壤全氮和有机质含量是限制研究区紫色土肥力提升的主要因素, 土壤pH、阳离子交换量、全钾含量和碳氮比是研究区紫色土风化过程的主控因素。综上可知, 40年来, 在施肥、氮沉降和气候变化等多种因素影响下, 川中丘陵区典型紫色土综合肥力显著提升, 风化程度加深。

关键词: 川中丘陵区; 紫色土; 风化; 土壤肥力

中图分类号: S158.2 文献标志码: A

Evolution and Influencing Factors of Fertility and Weathering Degree of Typical Purple Soils in Hilly Areas of Central Sichuan

WANG Xuan^{1,2}, DENG Limei^{1,2}, CUI Rongyang^{1,2}, LIU Gangcai^{1*}

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to explore the dynamic changes and the influencing factors of fertility and weathering degree of typical purple soils in hilly areas of central Sichuan, based on the information of the sampling sites in the Second National Soil Survey Report (1980s), dryland samples (0–20 cm) of typical purple soils were re-sampled in April 2021, soil physicochemical properties were measured, soil fertility and weathering indicators were calculated and compared. The results showed that: 1) Over the past forty years, all purple soil physicochemical indicators in study area increased except soil pH decreased, among of which, total potassium, available phosphorus, organic matter, cation exchange capacity, and carbon nitrogen ratio increased significantly($P<0.05$), while soil comprehensive fertility index (IFI) also exhibited a significant increase($P<0.05$). 2) Weathering degree of purple soil in study area was strengthened, but still maintained a moderate level of weathering, with increased degrees of desilication and enrichment of aluminum and iron, and a decreased degree of apparent leaching. 3)The contents of purple soil total nitrogen and organic matter were the primary factors limiting the improvement of soil fertility in study area, while soil pH, cation exchange capacity, total potassium content, and carbon nitrogen ratio were the main controlling factors of soil weathering process. In conclusion, over the past forty years, under the influence of multiple factors such as fertilization, nitrogen deposition and climate change, the integrated fertility of typical purple soil in hilly areas of central Sichuan has significantly improved, and the degree of weathering also has enhanced.

Key words: Hilly area of central Sichuan; Purple soil; Weathering; Soil fertility

①基金项目: 四川省重点研发项目(2021YFN0010)资助。

* 通信作者(liugc@imde.ac.cn)

作者简介: 汪璇(1998—), 女, 四川广元人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wangxuan19@mails.ucas.ac.cn

随着社会的发展,人类活动对农田生态系统产生了前所未有的影响^[1-2]。施肥是现代农业中最重要的活动。根据国家统计局的数据,全国 2020 年的化肥使用总量达到 5 250.7 万 t,较 1980 年的 1 269.4 万 t,高出了 313.63%。同时,大规模工业化导致的全球变暖^[3]、降雨模式变化^[4]和氮沉降^[5]等问题也间接影响了农田生态系统的发展方向与速度^[6-8]。因此,长期人类活动必然会造成农田土壤理化性质的改变。王翔宇等^[9]利用因子探测器对土壤肥力进行研究,结果表明,畜禽养殖场、土壤 pH 和土壤质地是土壤肥力的主要影响因子。Liu 等^[10]根据质量平衡计算出人类活动对土壤风化过程的贡献为 16%~40%。施用化肥和氮沉降导致的土壤酸化,会促进盐基离子的淋失和铝的活化,最终导致风化速率增加^[11]。与之相反,施用有机肥引入的有机质,通过增加 CO₂ 浓度抑制风化过程^[12]。以上研究均表明,人类活动引起的土壤性质变化,能在不同程度上影响土壤肥力和风化程度。

紫色土是我国独有的土壤类型,川中丘陵区是其主要分布区域,面积约 8.4 万 km²,区域内人口承载量大,农耕活动密集。作为该区域的主要土壤类型,紫色土的肥力情况是关系川中丘陵区农作物高产稳产及可持续发展的关键。养分是形成土壤肥力的物质基础,由于紫色母岩风化快且富含矿物养分^[13],其风化过程伴随的养分释放是紫色土最重要的养分补偿过程,因此紫色土自然肥力高。但由于川中丘陵区夏季降水丰沛,为土壤侵蚀提供了水动力条件,使得紫色土土层浅薄,通常不超过 50 cm,多为初育土^[14]。

关于紫色土及母岩的风化研究,有学者通过现场观测和盆钵模拟试验,发现紫色泥页岩风化崩解厚度年平均可达 1.5~4 cm^[15],年成土率能达 0.6%~5.1%^[13]。近年来,本课题组也通过一系列室内外试验测定了多种紫色母岩物理崩解速率及其相关影响因素,并从物理机制方面建立了几种母岩风化成土速率的定量估算模型^[16]。以上研究主要是基于自然影响因素如水、热等物理因子的作用,并且同样聚焦于物理崩解过程,对人为影响因素如施肥和自然影响因素如气候变化等综合作用下的化学风化研究还较少。因此,本文以川中丘陵区典型紫色土为研究对象,基于全国第二次土壤普查数据资料,通过对比 40 年前后相关指标差异,分析紫色土在长期施肥、氮沉降和气候变化等作用下土壤肥力和化学风化程度的变化特征,同时进行土壤肥力和风化程度影响因子评估,以探明川中丘陵区典型紫色土肥力和风化程度的演变趋势和影响机理,为紫色土区的高效可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

考虑紫色土类型差异,本研究选择占长江上游地区(川渝境内)紫色土总面积 88.73% 的中性和石灰性紫色土^[14]作为研究对象,其主要分布于川中丘陵区。该区域属于亚热带季风性温润气候,年均温 16~18 ℃,无霜期 280~350 d,年降水量 900~1 000 mm,冬干春旱明显。

本研究于 2021 年 4 月完成样品采集,距全国第二次土壤普查已有 40 余年时间。根据全国第二次土壤普查报告记载的剖面地点、地形及海拔信息^[17],在室内外确定采样点的准确位置,再对确定的样点进行田间采样,其中,中性紫色土采样点 5 个,石灰性紫色土采样点 8 个(图 1)。采样点地形以中浅丘陵为主,作物类型以油菜、小麦、玉米、茶和蚕豆为主(表 1),均采用当地常规施肥方式。采样时,按混合采样法采集耕层 0~20 cm 土层的土壤,并采环刀样以备土壤容重分析。

1.2 相关指标测定

土壤 pH 由电极法测定;土壤有机质由重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮由凯氏定氮仪测定;土壤全磷和全钾采用碱熔法,通过紫外-可见分光光度计和火焰光度计测定;土壤有效磷采用钼锑抗比色法,通过紫外-可见分光光度计测定;速效钾采用火焰光度计测定;土壤容重使用环刀法测定。土壤阳离子交换量(CEC)采用三氯化六氨合钴浸提,紫外-可见分光光度计测定。土壤中 K、Na、Ca、Mg、Al、Fe 含量由等离子体光谱仪(ICP-OES)测定,土壤中 Si 含量由碳酸钠碱熔-重量法测定。具体测定方法见参考文献[18-20]。

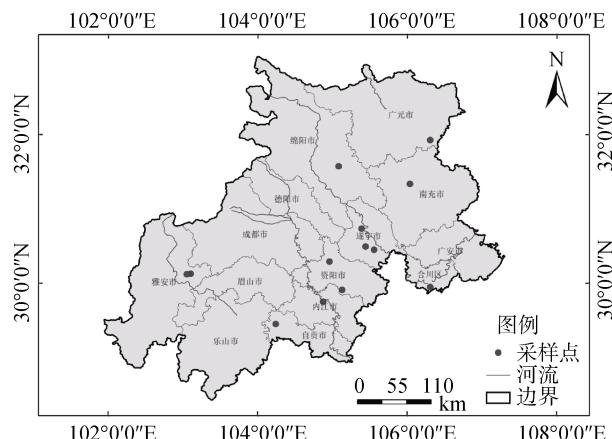


图 1 采样点空间分布
Fig. 1 Spatial distributions of sampling sites

表1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of sampling sites

采样点	紫色土类型	农业利用情况	地形	坡度
雅安中里建强村一组	中性	蚕豆、茶	向斜底部小丘坡脚	17°
自贡荣县五桐乡	中性	油菜	缓坡宽谷地段	-
资中秦安村六村二组	中性	油菜	方山中丘陵缓坡丘顶	10°
重庆合川区南溪村	中性	蚕豆	浅丘宽谷丘坡下部	7°
广元市剑阁县龙源镇一心村三组	中性	蒜苗、油菜	单面山坡腰地段	5°
雅安名山区东乡关田村六组	石灰性	油菜、茶、猕猴桃	中丘中谷丘体下部	12°
资阳安岳县周礼乡十组	石灰性	油菜、蚕豆、玉米	低丘宽谷丘坡中部	11°
资阳乐至文峰玉龙村一组	石灰性	蚕豆	浅丘宽谷	-
遂宁保升镇一村七组	石灰性	油菜、玉米	浅丘宽U型谷-台地	-
遂宁横山乡晒淀村十二组	石灰性	野油菜、核桃	丘陵顶部	7°
射洪市交峰乡五村九组	石灰性	柑橘	中丘宽U型谷-台地	-
南部枣儿乡老君村一组	石灰性	蚕豆、玉米、油菜	浅丘宽谷台地	6°
绵阳梓潼石牛镇五大队二队	石灰性	小麦、玉米	中丘二台地	-

1.3 土壤肥力及风化程度评价方法

1.3.1 肥力系数^[21] 1) 分肥力系数。由于指标的不可相加性, 为综合考虑土壤肥力, 将以下9个土壤基本理化指标按照全国第二次土壤普查制定的养分分级标准^[22]进行分级(表2), 并选择分段式函数对指标进行标准化赋值, 计算其肥力系数 IFI_i , 公式如下:

$$IFI_i = \begin{cases} x/x_a & x \leq x_a \\ 1 + [(x - x_a)/(x_b - x_a)] & x_a < x \leq x_b \\ 2 + [(x - x_b)/(x_c - x_b)] & x_b < x \leq x_c \\ 3 & x > x_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: IFI_i 为分肥力系数; x 为土壤各指标测定值; x_a 与 x_c 为分级标准下、上限; x_b 介于分级标准上、下限间;

表2 土壤指标分级标准
Table 2 Classification standards of soil indicators

等级	pH		全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	CEC (cmol/kg)	容重 (g/cm ³)
	>7	<7								
x_a	9	4.5	0.75	0.4	5	3	40	10	5	1.45
x_b	8	5.5	1.50	0.6	20	10	100	20	10	1.35
x_c	7	6.5	2.00	1.0	25	20	150	30	15	1.25

2) 综合肥力系数。本文选择改进后的Nemerow法进行综合肥力系数计算, 公式如下:

$$IFI = \sqrt{\frac{IFI_{\text{平均}}^2 + IFI_{\text{最小}}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

式中: $IFI_{\text{平均}}$ 为各分肥力系数的平均值; $IFI_{\text{最小}}$ 为各分肥力系数的最小值; n 为参与评价的土壤指标个数。

1.3.2 化学风化程度指标^[23] 国内外学者通常采用地球化学参数来揭示土壤化学风化程度, 本研究根据母质成土过程中物质的转化特性将其分为3类: 一是反映非黏土矿物向黏土矿物的演变状况, 参数为风化蚀变指数($CIA=100 \times Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+K_2O+CaO^*)$); 二是反映土壤脱硅富铝铁化过程, 参数为硅铝铁率($Saf=Si_2O/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$); 三是反映土壤活性

组分与惰性组分的关系, 参数为淋溶系数($ba=(Na_2O+K_2O+CaO^*+MgO)/Al_2O_3$)。各风化参数中氧化物均为其摩尔含量(n), CaO^* 为硅酸盐中 CaO 含量, 若 $n(Na_2O) > n(CaO)$, 那么 $n(CaO)=n(CaO^*)$, 若 $n(Na_2O) < n(CaO)$, 则 $n(Na_2O)=n(CaO^*)$ 。

1.4 数据处理与分析

测试所得数据, 通过SPSS 26和R 4.3.2进行处理与统计分析。其中, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、成对样本t检验和置换多元方差分析(PERMANOVA)进行显著性检验, 采用主成分分析(PCA)对土壤理化性质进行降维计算, 采用Pearson法进行风化指标与土壤理化性质的相关分析, 采用聚类推进树算法(ABT)进行土壤理化性质对风化指标

的解释度评估。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力变化特征

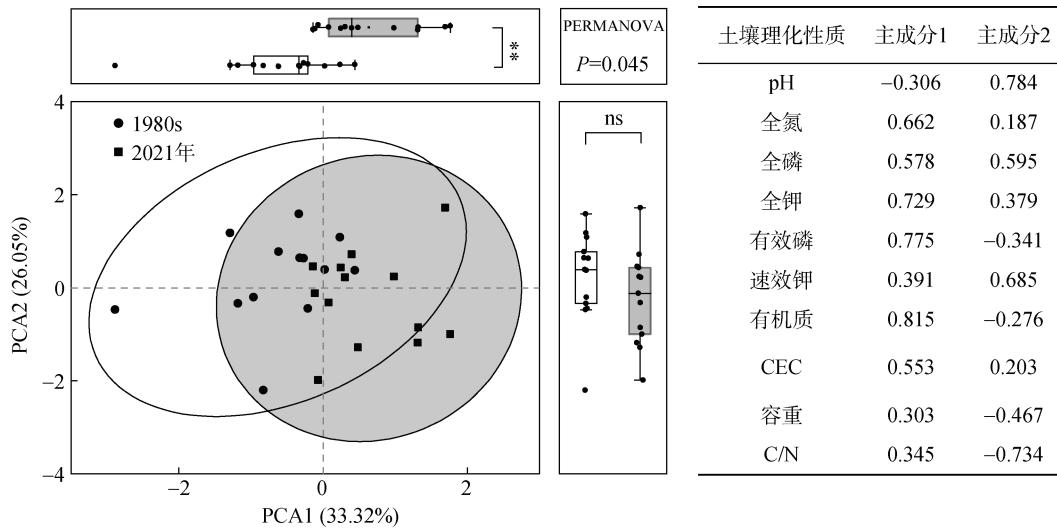
对两次采样的土壤基本理化指标进行成对样本 t 检验, 其中 pH、全钾、有效磷、有机质、CEC 和碳氮比(C/N), 在 40 年间差异显著($P<0.05$), 其他指标无显著变化($P>0.05$)(表 3)。40 年来, 土壤 pH 降低,

部分点位由中性或石灰性土转化为酸性土; 其他指标均呈增加趋势, 全钾含量提高了 50.68%, 有效磷含量提高了 268.89%, 土壤保肥指标 CEC 提高了 21.19%, 有机质含量提高了 24.70% , 同时土壤 C/N 也随之升高。对土壤理化性质进行主成分分析和置换多元方差分析, 结果表明, 40 年来土壤性质总体变化显著, 以全钾、有效磷和有机质为主导的土壤养分含量变化是造成土壤性质改变的主要因素(图 2)。

表 3 典型紫色土理化性质
Table 3 Physicochemical properties of typical purple soils

时间	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)
1980s ^[17]	7.63 ± 0.54 a	12.80 ± 4.71 a	0.97 ± 0.37 a	0.59 ± 0.22 a	22.18 ± 5.84 a
2021 年	7.07 ± 1.31 b	15.96 ± 3.81 b	1.01 ± 0.28 a	0.65 ± 0.17 a	33.02 ± 4.64 b
时间	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	CEC(cmol/kg)	容重(g/cm ³)	C/N
1980s ^[17]	5.17 ± 4.05 a	116.31 ± 43.04 a	20.46 ± 4.79 a	1.34 ± 0.16 a	7.68 ± 1.65 a
2021 年	20.15 ± 10.62 b	119.08 ± 48.47 a	24.80 ± 1.54 b	1.44 ± 0.10 a	9.40 ± 1.29 b

注: 表中 1980s 表示 20 世纪 80 年代, 即全国第二次土壤普查时期, 下同; 同列不同小写字母表示不同时间各指标差异显著($P<0.05$)。



(ns 代表不同时间无显著差异($P>0.05$), **代表不同时间差异极显著($P<0.01$); 下同)

图 2 土壤理化性质的主成分分析
Fig. 2 Principal component analysis of soil physicochemical properties

根据综合肥力系数 IFI, 将土壤肥力划分为 4 个等级^[24](表 4), 全国第二次土壤普查时期川中丘陵区典型紫色土肥力等级为三等和四等(IFI 值为 0.84 ~ 1.66), 2021 年肥力水平提升至二等和三等(IFI 值为 1.25 ~ 2.01)(图 3)。

2.2 土壤化学风化程度变化特征

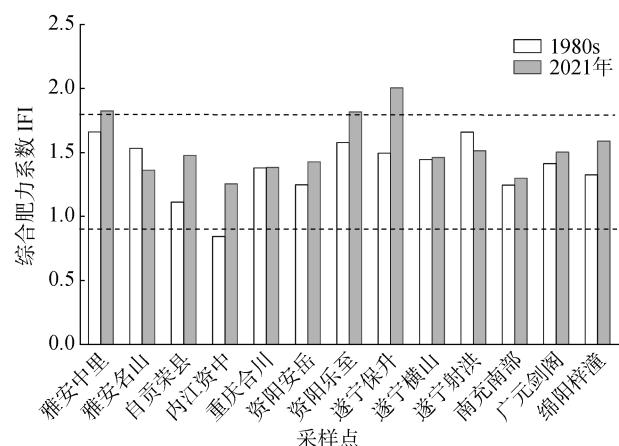
本文选取风化蚀变指数(CIA)、硅铝铁率(Saf)和淋溶系数(ba)3 个指标对土壤的化学风化进行评估(图 4)。研究表明, 不同范围 CIA 值能反映不同的风化程度, 当 CIA=50 ~ 60 时, 表示土壤或岩石处于弱

风化程度; 当 CIA=60 ~ 80 时, 为中等风化程度; 当 CIA=80 ~ 100 时, 为强烈风化程度^[23]。全国第二次土壤普查时期研究区土壤 CIA 值介于 58.66 ~ 76.19, 2021 年土壤 CIA 值介于 64.12 ~ 81.32, 说明川中丘陵区典型紫色土主要处于中等风化程度, 40 年间土壤的风化程度显著加深($P<0.01$)。全国第二次土壤普查时期土壤硅铝铁率为 4.49 ~ 12.42, 2021 年土壤硅铝铁率为 2.79 ~ 6.03, 显著减小($P<0.01$), 所表征的脱硅富铝铁化程度加强。全国第二次土壤普查时期土壤淋溶系数为 0.49 ~ 1.93, 2021 年淋溶系数为 1.07 ~

2.28, 表明土壤不稳定元素淋失度更小, 但差异不显著($P>0.05$)。

表 4 土壤肥力等级划分^[24]
Table 4 Classification of soil fertility levels

肥力等级	一等	二等	三等	四等
肥力评语	很肥沃	肥沃	一般	瘦瘠
综合肥力系数范围	≥ 2.7	$1.8 \sim 2.7$	$0.9 \sim 1.8$	<0.9



(图中虚线划分的3个综合肥力系数范围从上到下分别表示土壤肥力等级四、三、二等)

图3 典型紫色土的综合肥力系数
Fig. 3 Integrated fertility index of typical purple soils

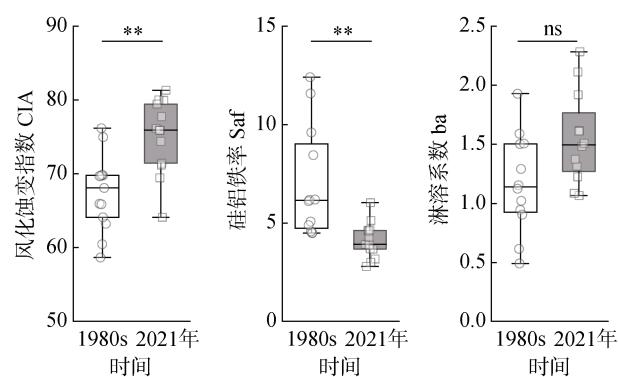


图4 典型紫色土的化学风化指标
Fig. 4 Chemical weathering indicators of typical purple soils

2.3 土壤风化程度与土壤理化性质的关系

相关性分析结果(表 5)显示, 全国第二次土壤普查时期川中丘陵区典型紫色土硅铝铁率与土壤全磷、全钾含量和 CEC 呈极显著负相关($P<0.01$); 淋溶系数与硅铝铁率则相反, 与土壤全磷、全钾含量呈显著正相关($P<0.05$)。2021 年, 研究区土壤化学蚀变指数与土壤全钾含量呈显著负相关($P<0.01$); 硅铝铁率与土壤容重呈显著正相关($P<0.05$); 淋溶系数与 CEC 和 C/N 呈显著负相关($P<0.05$), 与土壤 pH、全钾含量和速效钾含量呈显著正相关($P<0.05$)。

进行聚类推进树算法(ABT)分析, 结果显示, 全国第二次土壤普查时期, 土壤性质中速效钾是影响研究区土壤风化蚀变指数的主要因子(26.00%), 相对贡献率远高于其他因子(图 5); 全钾是影响土壤淋溶系数的首要因子(20.25%), 其次是全磷(15.30%)和 C/N(13.1%)。2021 年, 土壤性质中 C/N 是影响土壤风化蚀变指数的首要因子(14.78%), 其次是容重(12.37%)和全钾(12.28%); 除全磷对土壤硅铝铁率的相对贡献率显著小于其他因子外, 其他因子的相对贡献率差异不大, 其中容重(11.86%)、全氮(11.84%)、全钾(11.43%)和碳氮比(11.07%)为影响硅铝铁率的主要因子; 影响土壤淋溶系数的主要因子是速效钾(12.55%)和 CEC(12.51%)。

3 讨论

3.1 土壤肥力变化特征及其驱动因素

对比各采样点全国第二次土壤普查数据, 40 年来川中丘陵区石灰性及中性紫色土有酸化的趋势。有研究发现, 氮沉降被认为是加速农田生态系统酸化的主要原因。当氮沉降高于 $36 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 时, 土壤酸化效应显著^[25]。在过去几十年内, 我国氮沉降以 NH_4^+ 为主^[26]。 NH_4^+ 在土壤中的硝化作用会增加外源 H^+ , 导致土壤酸化, 其来源主要是化肥施用和牲畜养殖所排放的 NH_3 ^[27]。国内外已开展施肥对土壤酸化的量

表 5 土壤风化指标与土壤理化性质相关性
Table 5 Correlations between soil weathering indicators and physicochemical properties

时间	风化指标	pH	全氮	全磷	全钾	有效磷	速效钾	有机质	CEC	容重	C/N
1980s	风化蚀变指数	-0.195	0.079	-0.288	-0.181	-0.104	-0.538	-0.175	-0.225	-0.255	-0.398
	硅铝铁率	-0.480	-0.539	-0.843**	-0.952**	0.095	-0.551	-0.187	-0.802**	0.364	0.530
	淋溶系数	0.523	0.172	0.844**	0.699*	0.223	0.463	-0.051	0.572	-0.420	-0.319
2021 年	风化蚀变指数	-0.265	-0.413	-0.328	-0.774**	-0.054	-0.313	-0.157	0.298	-0.372	0.569
	硅铝铁率	-0.316	0.219	-0.330	0.131	0.070	0.013	0.107	-0.007	0.610*	-0.250
	淋溶系数	0.732**	-0.015	0.260	0.816**	-0.430	0.652*	-0.403	-0.642*	0.490	-0.734**

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

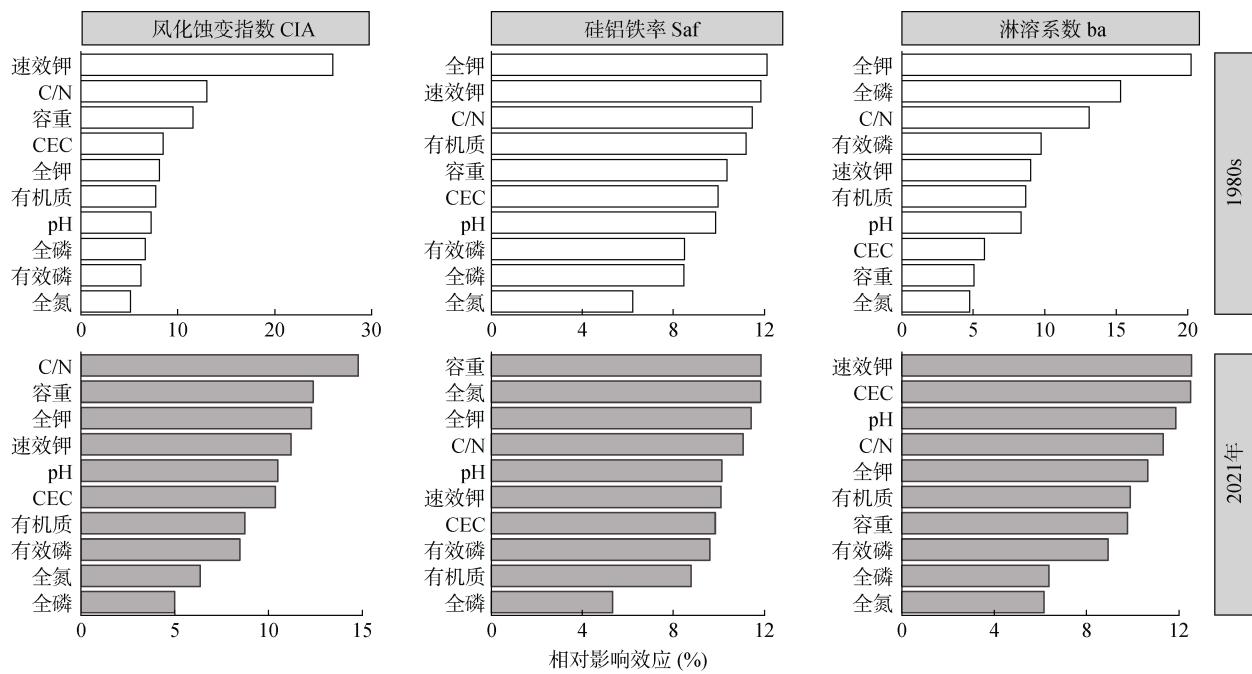


图 5 土壤理化性质对土壤风化程度的相对贡献率

Fig. 5 Relative contribution rates of physicochemical properties to soil weathering degree

化研究, Tarkalson 等^[28]对美国半干旱地区土壤酸化的研究发现, 施肥导致的硝酸盐淋洗致酸量占总酸度的 59%~66%。刘侯俊等^[29]对松辽平原棕壤的研究也表明, 与 1979 年原始土壤相比, 长期化肥处理的土壤 pH 降低了 1~2 个单位。

本研究发现, 除土壤 pH 外, 研究区其他土壤理化性质值均有不同程度的增长, 但仅全钾、有效磷、有机质含量及 CEC 和 C/N 增长显著($P<0.05$), 土壤养分变化不平衡。究其原因, 首先, 紫色土属于母质性土, 紫色母岩能快速且持续向土壤补充矿质养分。朱波等^[13]通过盆钵试验得到, 1 m³ 侏罗系蓬莱镇组紫色母岩 1 年分别有 52.78、121.3、13 948.4 g 氮、磷、钾释放量, 这表明母岩输入的养分具有不平衡性。其次, 川中丘陵区农田多为坡耕地, 再加上紫色土垦殖指数高、侵蚀性强, 土壤侵蚀导致的养分流失^[14]使得紫色土有机质及氮含量较低。气候变化同样对土壤性质存在影响, 黎景锐等^[30]的研究发现, 40 年来川中丘陵区气温呈波动上升趋势, 降雨量变化趋势不显著, 但年际波动较大。温度升高在短时间尺度上可以加快农田生态系统土壤养分周转, 改变养分组分^[31]。降雨量和雨强通过影响土壤侵蚀情况从而改变土壤养分和土壤质地^[32]。最重要的是, 随着农业集约化进程, 人为活动对土壤肥力的影响加剧。40 年来肥料施用量的增加使得土壤由被动地自然恢复地力转变为有目的地定向培肥地力, 养分输入持续增加。但

也有研究发现, 单一增加化肥施用量无法显著提升土壤养分, 作物的种植还会造成土壤养分不平衡, 如王齐齐等^[33]在紫色土区的 29 年定位监测结果显示, 常规施肥模式下, 土壤钾和磷含量显著上升并且作物产量提升, 但土壤全氮含量却下降。这是由于外源养分添加能够通过增加作物收获输出, 使得土壤氮含量无法有效提升甚至降低。除此之外, 农业集约化过程中伴随的强烈土壤扰动也会改变土壤水气热环境从而影响土壤性质^[34]。

在以上因素的综合作用下, 川中丘陵区典型紫色土综合肥力得到显著提升($P<0.05$)。但值得注意的是, 据农业部耕地质量监测点的数据, 多种土壤类型中紫色土中有机质和全氮含量最低^[35]。本研究将两个时期土壤理化性质分别进行主成分分析(表 6), 并与土壤综合肥力系数进行回归拟合(图 6), 结果同样显示, 全氮和有机质是限制土壤综合肥力提升的主要因素。因此, 今后在对紫色土开发利用时需针对性地提升土壤全氮和有机质含量, 保持土壤养分平衡, 并且防治土壤酸化, 降低土壤肥力退化的风险。

3.2 土壤风化程度变化特征及驱动因素

对比各采样点在全国第二次土壤普查时期的化学风化指标, 川中丘陵区典型紫色土的风化程度加深, 脱硅富铝化程度显著加强, 但土壤不稳定元素盐基离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)淋失度减小与风化程度加深相矛盾。这是由于相较其他母岩, 紫色母岩

表 6 不同时期土壤理化性质主成分分析因子矩阵
Table 6 Factor matrix of principal component analysis of soil physicochemical properties in different times

土壤理化性质	1980s			2021年		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
pH	0.668	-0.284	0.397	0.821	-0.408	-0.019
全氮	0.297	0.769	-0.485	0.267	0.874	0.349
全磷	0.691	0.434	0.322	0.742	0.393	-0.405
全钾	0.869	0.379	-0.037	0.904	-0.099	-0.037
有效磷	-0.311	0.423	0.677	-0.138	0.944	0.026
速效钾	0.575	0.408	0.302	0.856	0.231	-0.153
有机质	-0.118	0.919	-0.302	-0.126	0.927	0.186
CEC	0.872	0.05	-0.002	-0.76	0.114	-0.021
容重	-0.534	0.695	0.069	0.082	-0.513	0.714
C/N	-0.71	0.472	0.383	-0.729	-0.107	-0.464

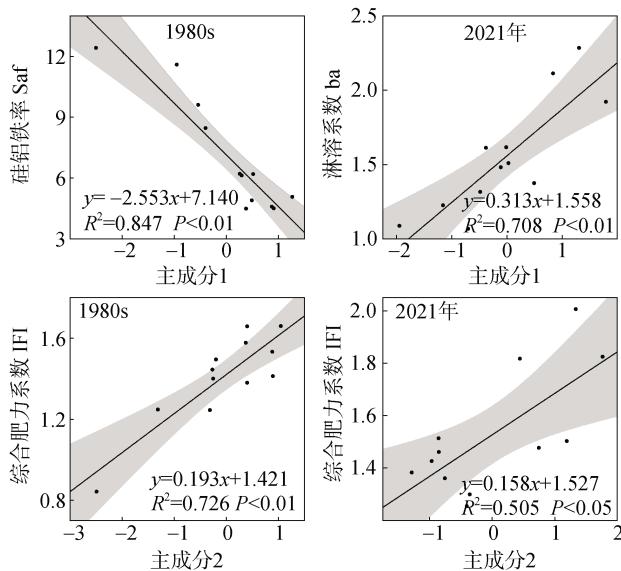


图 6 土壤综合肥力系数和风化指标与主成分得分的线性回归

Fig. 6 Linear regressions between soil IFI, weathering indicators and principal component score

风化快且富含矿质养分, 其风化过程伴随的养分释放是紫色土最重要的盐基离子补偿过程^[11], 再加上施肥带来的外源盐基离子, 导致输入大于淋溶和作物收获等输出, 土壤矿物不断与土壤溶液及母岩进行盐基物质的交换, 诱导了土壤矿物表观淋溶减弱。

相关性分析和 ABT 分析表明, pH、全磷、全钾、速效钾、CEC、容重和 C/N 为化学风化的影响因子。但土壤性质往往多种因子相互制约互相作用, 共同影响土壤化学风化。为进一步探究土壤化学风化机理, 本研究对两个时期土壤理化性质进行主成分分析(表 6), 其中全国第二次土壤普查时期以全钾、CEC 和 C/N 为主导的第一主成分与硅铝铁率呈显著线性

相关; 2021 年以 pH、全磷、全钾、速效钾、CEC 和 C/N 为主导的第一主成分与淋溶系数呈显著线性相关(图 6)。这说明土壤理化性质在一定程度上决定了土壤风化的方向与速度。土壤 pH 对土壤矿物的分解起着重要作用, 矿物与土壤溶液中的 H⁺产生置换反应, 影响土壤矿质元素释放的同时还能使矿物颗粒或晶格间的连接减弱, 促进矿物的风化崩解^[11]。由于紫色土黏土矿物中富钾的伊利石占比较高, 甚至能达到 50% 以上^[36], 这使得土壤全钾含量能直接体现紫色土中矿物的迁移转化情况。土壤 CEC 是土壤胶体能吸附和交换盐基离子的总量, 能较为直观地反映土壤盐基离子赋存情况^[37]。并且, 土壤 C/N、全磷、速效钾和 pH 等理化性质改变还会导致微生物丰度、多样性及群落组成的变化^[38-40]。通过原位采样分析和室内模拟观测, 微生物可以通过产生有机酸、金属配位载体、改变氧化还原条件或形成生物膜来加速矿物风化^[41-42]。

由此可以看出, 40 年来各因素带来的土壤理化性质改变均对紫色土风化有一定促进作用, 并且由施肥和紫色母岩快速风化等因素带来的外源盐基离子输入可以在一定程度上弥补风化带来的损失, 维持紫色土的盐基离子平衡。

4 结论

在施肥、氮沉降、气候变化等多因素影响下, 对比全国第二次土壤普查结果, 40 年来川中丘陵区中性和石灰性紫色土有向酸性紫色土转化的趋势。理化性质中, 全钾、有效磷、有机质含量及 CEC 和 C/N 提升显著($P<0.05$), 但养分变化存在不平衡性。土壤综合肥力等级由瘠薄和一般提升至一般和肥沃, 化学

风化和脱硅富铝铁化程度均显著增强($P<0.05$)，淋溶程度无显著差异($P>0.05$)。土壤理化性质在一定程度上反映了土壤肥力和风化情况。土壤 pH、CEC、全钾和 C/N 等是土壤化学风化过程的主控因素。土壤全氮和有机质含量是限制土壤肥力提升的主要因素。因此，今后在对紫色土开发利用时需针对性地提升土壤氮和有机质含量，保持土壤养分平衡。

参考文献：

- [1] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016[J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 639–643.
- [2] Li J W, Du J, Zhong S Q, et al. Changes in the profile properties and chemical weathering characteristics of cultivated soils affected by anthropic activities[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20822.
- [3] Them T R, Gill B C, Selby D, et al. Evidence for rapid weathering response to climatic warming during the Toarcian Oceanic Anoxic Event[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5003.
- [4] Otto C, Piontek F, Kalkuhl M, et al. Event-based models to understand the scale of the impact of extremes[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(2): 111–114.
- [5] Zhang Q Y, Zhu J X, Mulder J, et al. High environmental costs behind rapid economic development: Evidence from economic loss caused by atmospheric acid deposition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 334: 117511.
- [6] Li S C, Tang S M, Chen H Y, et al. Soil nitrogen availability drives the response of soil microbial biomass to warming[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 917: 170505.
- [7] Zhu X Q, Miao P, Zhu H, et al. Extreme precipitation accelerates nitrate leaching in the intensive agricultural region with thick unsaturated zones[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 918: 170789.
- [8] Wei H, Liu Y L, Zhang J E, et al. Leaching of simulated acid rain deteriorates soil physicochemical and mechanical properties in three agricultural soils[J]. *Catena*, 2021, 206: 105485.
- [9] 王翔宇, 张学霞, 胡韵哲, 等. 基于地理探测器的耕地土壤肥力及影响因子[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7378–7389.
- [10] Liu W J, Xu Z F, Sun H G, et al. Geochemistry of the dissolved loads during high-flow season of rivers in the southeastern coastal region of China: Anthropogenic impact on chemical weathering and carbon sequestration[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(16): 4955–4971.
- [11] 李春培, 李雪, 汪璇, 等. 酸化环境对紫色母岩风化产物交换性盐基离子及其酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(1): 258–271.
- [12] Song C, Liu C L, Zhang Y, et al. Impact of animal manure addition on the weathering of agricultural lime in acidic soils: The agent of carbonate weathering[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2017, 5(2): 202–212.
- [13] 朱波, 罗晓梅, 廖晓勇, 等. 紫色母岩养分的风化与释放[J]. *西南农业学报*, 1999, 12(S1): 63–68.
- [14] 何毓蓉. 中国紫色土-下篇[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 郭永明. 四川盆地紫色岩风化成土的研究[J]. *西南农业大学学报*, 1991, 13(5): 527–531.
- [16] Zhang D, Chen A Q, Wang X M, et al. A quantitative determination of the effect of moisture on purple mudstone decay in Southwestern China[J]. *Catena*, 2016, 139: 28–31.
- [17] 四川省土壤普查办公室, 四川省农牧厅. 四川省第二次土壤普查数据资料汇编[R]. 1992.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [20] 环境保护部. 土壤阳离子交换量的测定三氯化六氨合钴浸提一分光光度法: HJ 889—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [21] 袁浩亮, 张江林, 鲁艳红, 等. 紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(6): 1216–1222.
- [22] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 139–144.
- [23] 马晓晨, 王家生, 陈粲, 等. 华北房山景儿峪组顶部古风化壳常量元素地球化学特征及其古气候意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(11): 3853–3872.
- [24] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 245–247.
- [25] van Breemen N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J]. *Nature*, 1984, 307(5952): 599–604.
- [26] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 731–746.
- [27] Formosa L, Singh B. Spatial variability of ammonium and nitrate in soils near a poultry farm[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120(3): 659–669.
- [28] Tarkalson D D, Payero J O, Hergert G W, et al. Acidification of soil in a dry land winter wheat-sorghum/corn-fallow rotation in the semiarid U.S. great Plains[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1): 367–379.
- [29] 刘侯俊, 王俊梅, 张承昕, 等. 长期不同施肥对土壤和玉米锌含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 37–43.
- [30] 黎景锐, 王谢, 罗怀良, 等. 四川省农作物种植结构与气候变化耦合协调性研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(12): 69–73.
- [31] 黄伟根, 倪浩为, 黄瑞林, 等. 不同气候条件下土壤有机碳水热响应驱动机制研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1260–1270.
- [32] Li X, Hu Q, Zhang Q, et al. Response of rainfall erosivity to changes in extreme precipitation in the Poyang Lake basin, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(4): 537–548.
- [33] 王齐齐, 徐虎, 马常宝, 等. 西部地区紫色土近 30 年来

- 土壤肥力与生产力演变趋势分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1492–1499.
- [34] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 43–55.
- [35] 王乐. 长期施肥下华北土壤化学肥力指标和作物产量演变及影响因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [36] 邓予炜, 邓翔, 戚明辉, 等. XRD-Rietveld 全谱拟合法定量土壤矿物可行性研究——以四川盆地常见紫色土为例 [J]. 矿物岩石, 2024, 44(3): 13–24.
- [37] 姜林, 耿增超, 李珊珊, 等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3368–3377.
- [38] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(4): 629–632.
- [39] 王琪, 徐佳慧, 程诚, 等. 不同风化程度凝灰岩表生细菌群落结构与功能比较[J]. 土壤, 2024, 56(3): 517–524.
- [40] Zhang Y T, Shen H, He X H, et al. Fertilization shapes bacterial community structure by alteration of soil pH[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1325.
- [41] 吴涛, 陈骏, 连宾. 微生物对硅酸盐矿物风化作用研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(3): 263–268, 275.
- [42] 毛欣欣, 何琳燕, 王琪, 等. 具矿物风化效应伯克霍尔德氏菌的筛选与生物学特性研究[J]. 土壤, 2017, 49(1): 77–82.