

酸性紫色土盐基饱和度和 pH 值的 关联分析及分类学意义

刘彬, 慈恩, 刘俊延, 胡瑾, 陈洋洋

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 探讨酸性紫色土 pH 值和盐基饱和度(Base Saturation, BS)间的关联性, 为酸性紫色土 BS 的估算及分类提供科学参考及建议. 在重庆市采集 24 个典型酸性紫色土剖面的 77 个发生层土样, 测定其机械组成、pH 值、BS 和有机质等理化性质, 采用回归模型和 BP 神经网络两种模型, 对 pH 值和 BS 数据进行拟合分析. 回归模型的拟合结果表明, 一元二次拟合方程的拟合效果优于一元线性方程拟合效果. BP 神经网络模型中随着输入与 BS 相关数据类型的增加, 拟合准确度更高. 基于拟合模型, 假设 BS 的取值为 50% 时, 得到 pH 值的范围为 5.11~5.21. 采用一元二次拟合方程 $y = -0.02024x^2 + 0.34642x - 0.74023$ (y 为 BS, x 为 pH 值), 能够较好实现酸性紫色土 BS 的估算, 在开展紫色土系统分类高级单元划分时, 建议优先采用 $BS < 50\%$ 为“酸性”诊断标准, 若需使用 pH 值为“酸性”检索条件, 建议将原标准 $pH < 5.5$ 调整为 $pH < 5.1$.

关键词: 紫色土; 酸碱度; 盐基饱和度; 拟合方式;

土壤系统分类

中图分类号: S155.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)04-0065-08

Correlation Analysis between Base Saturation and pH of Acidic Purple Soils and Its Taxonomic Significance

LIU Bin, CI En, LIU Junyan, HU Jin, CHEN Yangyang

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To investigate the correlation between base saturation and pH of acidic purple soils, and to provide scientific reference and suggestions for the estimation of BS and the soil taxonomy of acidic purple soils, seventy-seven purple soil samples with different parent material development were collected in

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2020B069).

作者简介: 刘彬, 硕士研究生, 主要从事土壤发生分类研究.

通信作者: 慈恩, 教授, 博士研究生导师.

Chongqing for determination of physicochemical properties such as mechanical composition, pH, BS and soil organic matter, and conducting fitting analysis with regression model and BP neural network. The fitting results of regression model showed that the fitting effect of quadratic equation is better than that of linear equation. The fitting accuracy is higher in the BP neural network model with the increase of input the BS-related type of data. Based on the fitting model, assuming that the value of BS is 50 %, the derived pH range is 5.11–5.21. The quadratic equation of BS fitted by pH is a more direct and convenient estimation method. The fitting effect of trained BP neural network model is the best when there is enough data of BS, pH, soil organic matter and mechanical composition. It is suggested that in the Chinese Soil Taxonomy at the higher category level, the qualification condition of $BS < 50\%$ should be preferred in the retrieval condition of “acidity”. If pH should be used as the retrieval condition, it is suggested to change $pH < 5.5$ to $pH < 5.1$ as the retrieval condition of acidity of purple soil, which is more consistent with the actual situation.

Key words: purple soil; pH; base saturation percentage; fitting methods; soil taxonomy

土壤盐基饱和度(Base Saturation, BS)是指土壤胶体上所吸附的交换性盐基离子占阳离子交换量的百分数,是土壤中重要的理化指标,不仅可以反映土壤酸化程度,也是土壤肥力评价和土壤分类的重要依据^[1-3].然而,土壤BS的直接测定较为繁琐,耗时费力,且需要一定的实验室条件^[4],因此如何便捷、准确地估测土壤BS成为一个备受关注的科学问题.近年来,有不少学者利用BS值和pH值之间的关联性,建立回归模型以估算BS,相关工作主要集中在红壤、石灰(岩)土等类型土壤上^[5-6].紫色土是我国一类宝贵的农业土壤资源,广泛分布于多个省份,尤以四川盆地最为集中.不少研究显示四川盆地东部紫色土酸化问题日益突出^[7-8],危及农田土壤环境和作物健康^[9],若能便捷、准确地估算其BS,不仅能提高该区域紫色土酸化调查效率,也能显著降低其工作成本.目前,有关紫色土BS估算的研究相对较少,仅毛红安等^[10]针对江津区某柑橘园沙溪庙组(J_2s)地层发育的紫色土,研究建立了相应的BS估算模型($y = -8.4551x^2 + 115.54x - 305.28$, $R = 0.8541$, x 为pH值, y 为BS),虽然拟合效果尚可,但样区范围太小且成土母岩仅涉及 J_2s 地层,制约了估算模型的代表性.研究显示紫色土不同于红壤、黄壤^[11-13]等,具有独特的酸化特征,这势必会影响其BS值和pH值之间关联参数.此外,在中国土壤系统分类单元划分时,常将一定深度土层的 $BS < 50\%$ 或 $pH < 5.5$ 作为“酸性”土类或亚类的检索依据^[14].那么,酸性紫色土的 $BS < 50\%$ 或 $pH < 5.5$ 能否反映大致相同的“酸性”水平,目前尚不清楚.鉴于上述需求,本研究以紫色岩地层出露广泛且类型丰富的重庆市为研究区,着重考察酸性紫色土BS值和pH值的关联性,建立相关拟合模型,探讨酸性紫色土BS值和pH值的定量关联度及其对系统分类的影响,为紫色土退化调查、评价以及定量化分类提供重要科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市地处四川盆地东部,属我国陆地地势第二级阶梯,地理位置为 $105^{\circ}11' - 110^{\circ}11'E$, $28^{\circ}10' - 32^{\circ}13'N$,属亚热带湿润季风气候,年均气温 $16 \sim 18^{\circ}C$,年均降水量 $900 \sim 1\,300\text{ mm}$,降水多集中于5–9月份,年日照时数为 $1\,000 \sim 1\,400\text{ h}$,日照百分率仅为 $25\% \sim 35\%$,为全国年日照较少的地区之一,无霜期 $340 \sim 350\text{ d}$.在重庆市内,紫色沉积岩(简称紫色岩)广泛发育,主要为白垩系、侏罗系、三叠系部分岩石地层的紫色砂、泥(页)岩,受干热或湿热的古地理环境影响,一般呈紫、红、棕等颜色^[15].紫色岩风化残坡积

物是重庆市内最主要的成土母质, 其中沙溪庙组(J_2s)地层紫色岩的出露面积最大^[16].

1.2 样品采集与分析

根据紫色岩在重庆市的分布情况, 在重庆西部方山丘陵区、中部平行岭谷区、渝东北和渝东南的中山区均布设了样点, 涉及沙溪庙组(J_2s)、夹关组(K_2j)、巴东组(T_2b)、自流井组($J_{1-2}z$)、蓬莱镇组(J_3p)等地层的紫色岩. 参照《野外土壤描述与采样手册》^[17]挖掘标准土壤剖面, 划分土壤发生层次, 观察记录特征, 自下而上采集土样, 共采集 24 个典型酸性紫色土剖面的 77 个发生层样, 供试土壤利用方式主要为耕地(表 1).

表 1 供试土壤的岩石地层、利用方式及样品数

岩石地层	剖面数量/ 个	剖面点土壤利用方式/个		土样数量/ 个
		耕地	园地	
夹关组(K_2j)	7	7	0	27
蓬莱镇组(J_3p)	3	3	0	4
沙溪庙组(J_2s)	11	9	2	33
自流井组($J_{1-2}z$)	1	6	0	6
巴东组(T_2b)	2	1	1	7
合计	24	26	3	77

土样经风干研磨过筛后, 参照《土壤调查实验室分析方法》^[18], 测定相关土壤理化指标, 具体分析方法如下: pH 值为水浸提法; 机械组成为吸管法; 土壤有机质为重铬酸钾-硫酸消化法; 阳离子交换量(CEC)为醋酸铵-EDTA 交换法; 交换性 Ca^{2+} 为醋酸铵浸提, 原子吸收分光光度法; 交换性 Mg^{2+} 为醋酸铵浸提, 原子吸收分光光度法; 交换性 K^+ 为醋酸铵浸提, 火焰光度法; 交换性 Na^+ 为醋酸铵浸提, 火焰光度法.

1.3 数据处理与统计

$$BS = (a_{\text{交换性}K^+} + b_{\text{交换性}Na^+} + c_{\text{交换性}Ca^{2+}} + d_{\text{交换性}Mg^{2+}}) / CEC$$

采用回归模型和 BP 神经网络模型对 pH 值和 BS 值进行拟合. 回归模型主要采用一元线性拟合和一元二次拟合两种方式. BP 神经网络模型使用 MATLAB 2020 软件, 基于 Levenberg-Marquardt 算法进行模型构建, 输入层为相关自变量指标, 隐含层设置为 10 层, 输出层节点个数为 1, 即 pH 值或 BS 值, 训练数据量为 55, 验证数据量为 11, 测试数据量为 11, 共 77 组数据构建模型.

采用 Excel 2016 对数据进行统计及分析, Origin 9.0 和 MATLAB 2020 作图.

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

如表 2 所示, 供试土壤 pH 值范围为 4.27~7.00, 平均值为 5.54, 其中 $pH < 6.5$ 的酸性土壤数量为 65 个, $pH < 5.5$ 的强酸性土壤数量为 39 个, pH 值为 6.5~7.5 的中性土壤数量为 10 个; 有机质质量分数范围为 1.33~19.90 g/kg, 平均值为 9.43 g/kg; BS 范围为 38.0%~71.9%, 平均值为 54.7%, 其中 $BS < 50\%$ 的盐基不饱和土壤数量为 22 个; CEC 范围为 6.43~49.70 cmol/kg, 平均值为 21.70 cmol/kg. 供试土壤交换性盐基离子含量由大到小顺序为: Ca^{2+} (8.77 ± 4.24), Mg^{2+} (2.50 ± 1.56), K^+ (0.12 ± 0.06), Na^+ (0.07 ± 0.11). Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在交换性盐基离子总量中的平均占比分别为 76.30%和 21.85%. 供试土壤的砂粒含量范围为 7.77%~75.47%, 平均值为 40.84%; 粉粒含量范围为 16.62%~66.68%, 平均值为 37.64%; 黏粒含量范围为 7.91%~50.59%, 平均值为 21.51%; 供试土壤质地以壤土类(74 个)为主, 其余为黏土类(3 个).

如表 3 所示, 供试土壤的 pH 值与 BS 值之间存在极显著的正相关关系($r = 0.920$, $p < 0.01$). 此外,

pH 值还与有机质、黏粒、CEC 呈显著的负相关性,与砂粒、粉粒、交换性盐基离子(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})之间相关性无统计学意义. *BS* 与其他理化性质之间的相关性规律与 pH 值相似, *BS* 与有机质、CEC 呈极显著的负相关性,与砂粒、黏粒、交换性 Na^+ 之间呈显著的负相关性,与粉粒、交换性 K^+ 、交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 之间相关性无统计学意义.

表 2 供试紫色土理化性质

	pH 值	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	<i>BS</i> / %	机械组成(美国制)			<i>CEC</i> / ($cmol \cdot kg^{-1}$)	交换性盐基离子/($cmol \cdot kg^{-1}$)			
				砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
最小值	4.27	1.33	38.0	7.77	16.62	7.91	6.43	0.03	0.10	2.94	0.61
最大值	7.00	19.90	71.9	75.47	66.68	50.59	49.70	0.32	0.97	22.40	6.91
均值	5.54	9.43	54.7	40.84	37.64	21.51	21.70	0.12	0.07	8.77	2.50
标准误	0.08	0.53	1.08	2.15	1.51	1.09	1.28	0.01	0.01	0.48	0.18

表 3 供试土壤 pH 值和 *BS* 与其他理化性质之间的相关性

	<i>BS</i>	有机质	砂粒	粉粒	黏粒	<i>CEC</i>	交换性 K^+	交换性 Na^+	交换性 Ca^{2+}	交换性 Mg^{2+}
pH 值	0.920**	-0.346**	0.209	-0.081	-0.287*	-0.230*	-0.179	-0.156	0.134	0.031
<i>BS</i>	1	-0.297**	0.270*	0.166	-0.284*	-0.385**	-0.159	-0.226*	-0.003	0.009

注: ** 表示相关性极有统计学意义, $p < 0.01$; * 表示相关性有统计学意义, $p < 0.05$.

2.2 供试土壤 pH 值和 *BS* 数据拟合

表 4 为采用一元线性方程和一元二次方程这两种拟合方式对供试土壤的 pH 值和 *BS* 进行拟合的结果. 如表 4 所示, 供试土壤 pH 值和 *BS* 之间的一元线性拟合方程为 $y = 0.119\ 8x - 0.117$, 一元二次拟合方程为 $y = -0.020\ 24x^2 + 0.346\ 42x - 0.740\ 23$, 其中 y 为 *BS*, x 为 pH 值, 两个拟合方程的 R^2 分别为 0.844 4 和 0.856 9, p 值均小于 0.01, 拟合效果较好. 一元线性拟合方程的平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)分别为 3.09%, 3.81% 和 5.92%, 而一元二次拟合方程的上述误差指标均略低于一元线性拟合方程, 分别为 2.99%, 3.65% 和 5.74%.

表 4 使用 pH 值拟合盐基饱和度及误差分析结果

拟合方式	拟合方程	R^2	p 值	MAE/%	RMSE/%	MRE/%
一元线性	$y = 0.119\ 8x - 0.117$	0.844 4	< 0.01	3.09	3.81	5.92
一元二次	$y = -0.020\ 24x^2 + 0.346\ 42x - 0.740\ 23$	0.856 9	< 0.01	2.99	3.65	5.74

注: x 为 pH 值, y 为 *BS*.

BP 神经网络模型是建立非线性预测的有效方法^[19], 具有方便输入多组自变量数据进行拟合的优势, 根据表 3 相关性分析结果, 供试土壤 *BS* 与有机质和机械组成数据有较大的相关性, 众多研究也表明有机质、机械组成等因素与 *BS* 相关^[20-22]. 因此, 采用 BP 神经网络模型, 在 4 种不同数据组合下, 对供试土壤的 *BS* 数据进行了拟合, 数据组合设置如下: 组合 A 仅使用 pH 数据; 组合 B 使用 pH 数据和有机质数据; 组合 C 使用 pH 数据和机械组成数据; 组合 D 使用 pH 数据、有机质数据和机械组成数据. 由图 1 可知, BP 神经网络模型对 *BS* 的拟合效果较好, 在组合 A, B, C, D 下的 R 值分别为 0.937 7, 0.944 2, 0.947 4, 0.969 7. 由表 5 可知, 拟合时所采用的数据越多, 各项误差指标越低, 在组合 A 下, MAE, RMSE, MRE 分别为 2.62%, 3.34% 和 5.16%; 组合 B 和组合 C 的各项误差指标整体相差不大; 在组合 D 下, MAE, RMSE, MRE 分别为 1.72%, 2.36% 和 3.22%.

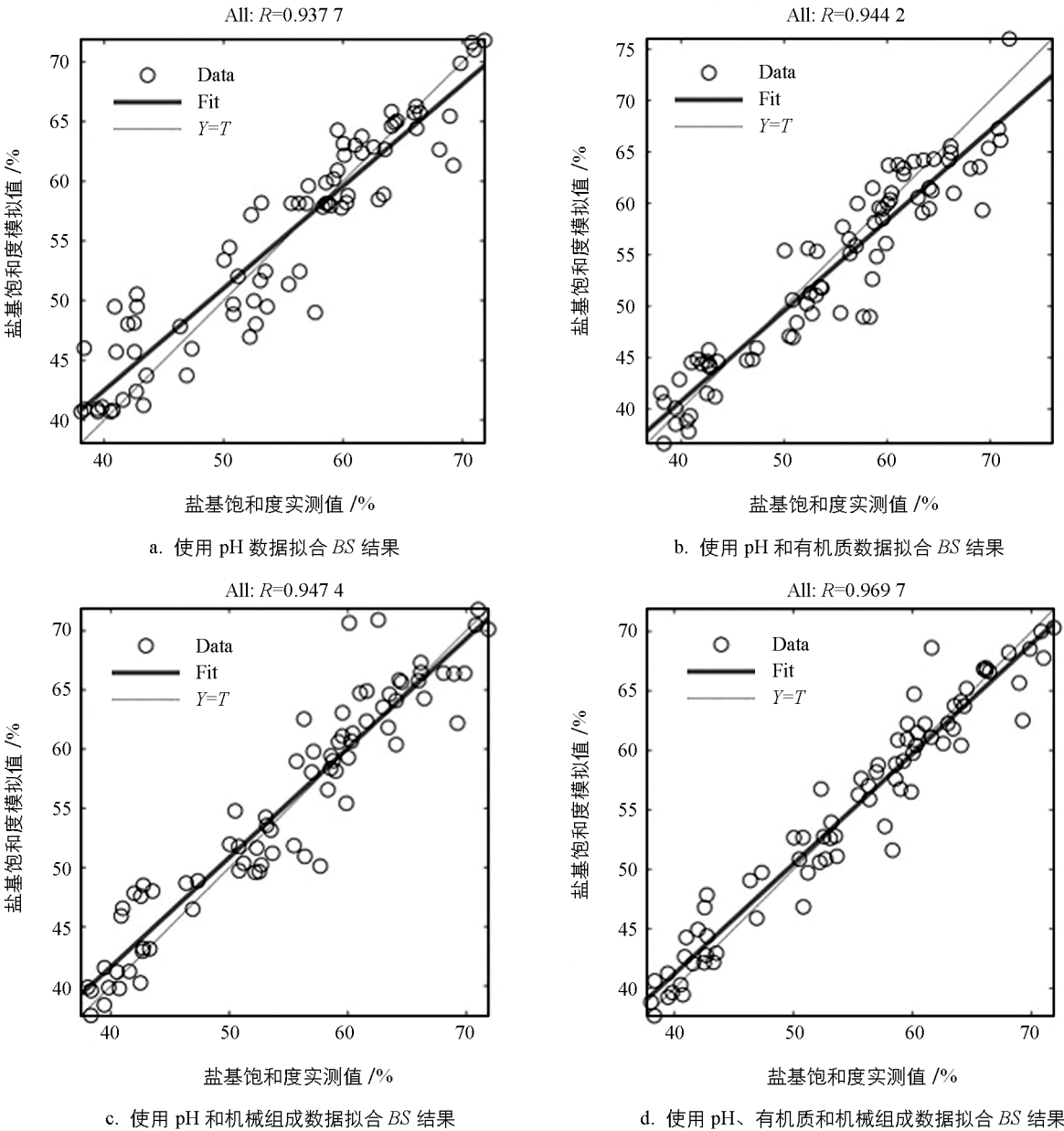


图 1 不同数据组合下采用 BP 神经网络模型对 BS 的拟合结果

表 5 BP 神经网络模型拟合的误差分析结果

指标	BP 神经网络模型			
	组合 A	组合 B	组合 C	组合 D
MAE/%	2.62	2.39	2.37	1.72
RMSE/%	3.34	3.08	3.03	2.36
MRE/%	5.16	4.58	4.42	3.22

2.3 基于土壤 BS 数据对 pH 值进行拟合

图 2a 和图 2b 为仅使用 BS 数据, 采用一元线性方程和一元二次方程对 pH 值进行拟合的结果. 图 2c 为使用 BS、有机质和机械组成数据, 采用 BP 神经网络模型对 pH 值进行拟合的结果. 如图 2 所示, 一元线性拟合方程和一元二次拟合方程的 R^2 分别为 0.844 4 和 0.853 3, p 值均小于 0.01, BP 神经网络模型训练结果的 R 值为 0.943 1, 3 种不同的拟合方式均有较好的拟合效果. 假设 BS 的取值为 50%, 基于拟合模型, 计算得到此时一元线性方程、一元二次方程、BP 神经网络模型下对应的 pH 值分别为 5.21, 5.15, 5.11.

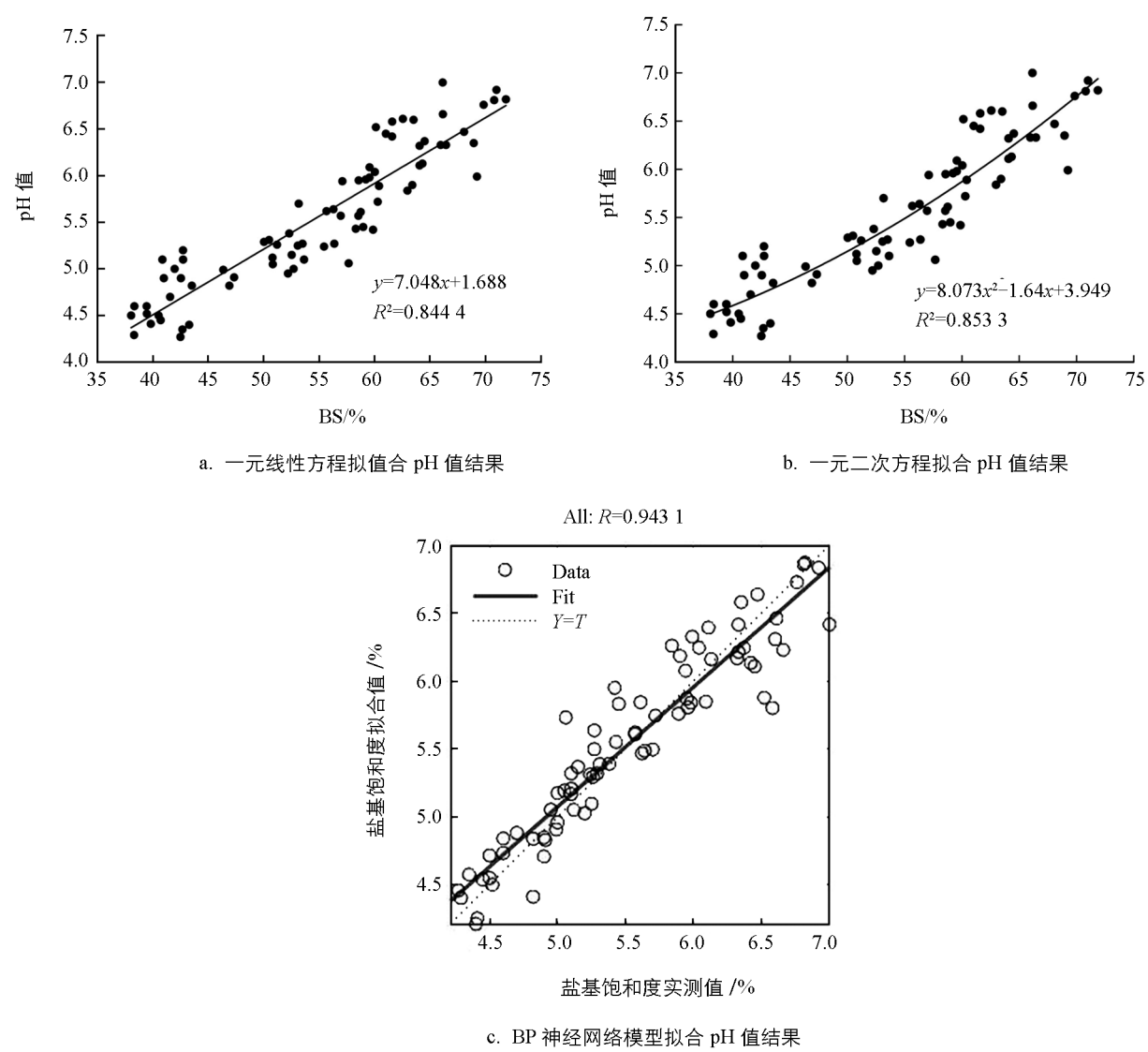


图 2 采用不同方式对 pH 值进行拟合的结果

3 讨论

3.1 酸性紫色土 pH 值和 BS 值的关联性

本研究中供试酸性紫色土 pH 值与 BS 值的一元线性拟合方程和一元二次拟合方程的 p 值均小于 0.01, R^2 值较高, 均大于 0.84, 同时 pH 值和 BS 值之间存在极显著的相关性($r=0.920$, $p<0.01$), 这都表明酸性紫色土 pH 值与 BS 值之间存在极强的关联性, 并且仅使用 pH 数据就能够较好地实现对 BS 的估算. 与一元线性拟合方程相比, 一元二次拟合方程有略高的 R^2 , 略低的 MAE, RMSE 和 MRE, 这表明在进行 pH 值与 BS 值的拟合时, 一元二次方程的拟合效果优于一元线性方程, 这与 Wang 等^[5]的研究结果相似. 本研究中一元二次拟合方程的 MAE, RMSE, MRE 分别为 2.99%, 3.65%, 5.74%, 均远低于毛红安等^[10]构建的 pH 值与 BS 值的拟合方程, 其拟合方程的 MAE, RMSE, MRE 分别为 5.19%, 6.68%, 8.75%, 这说明本研究所构建的一元二次拟合方程的误差更小. 相较于一元二次拟合方程, 在仅使用 pH 数据对 BS 进行拟合时, 采用 BP 神经网络模型拟合具有更低的 MAE, RMSE, MRE, 拟合效果更好. 此外, BP 神经网络模型能更方便地加入多组与 BS 相关的数据对 BS 进行拟合, 随着输入数据类型的增加, 拟合结果中 MAE, RMSE, MRE 整体呈降低趋势, R 值呈增加趋势, 拟合准确度更高. 但 BP 神经网络模

型基于的是暗箱算法^[23],无法给出一个方程进行直接计算,并且采用 BP 神经网络模型进行拟合需要已有一定的 BS 数据。因此,应用一元二次拟合方程对区域酸性紫色土 BS 估算具有更大参考意义,而在具有一定数据量的前提下,应用 BP 神经网络模型可实现对 BS 更为准确的估算。

3.2 紫色土盐基饱和临界 pH 值的分类学意义

我国现行土壤系统分类中“酸性”土类或亚类的检索标准通常为在一定深度的土层内,土壤的 $BS < 50\%$ 或 $pH < 5.5$ ^[14],而本研究中共有 17 个 $BS > 50\%$ 但 $pH < 5.5$ 的盐基饱和的紫色土符合此检索要求,这将会导致此类土壤的土类或亚类的划分不准确。根据前文 BS 值与 pH 值之间的拟合模型,假设 $BS = 50\%$,可得 pH 值为 5.11~5.21,远低于 Wang 等^[5]在红壤中推测 BS 为 50% 时对应的 pH 值(5.93)。这可能是由于红壤发育程度高,风化淋溶作用强,铁铝氧化物富集^[24-25],而紫色土成土时间短,崩解后有不少岩石碎屑保留其中^[26],发育程度低,黏土矿物组成丰富,尤其是有较高的蒙脱石含量,使得酸性紫色土仍具有较高的交换性盐基离子含量(Ca^{2+} , Mg^{2+})和盐基饱和度^[27-28]。北方部分土壤如白浆土,在土壤呈酸性时,可能会出现交换性盐基总量较高,BS 较高的情况^[29],这可能是受土壤自身盐基离子含量较丰富,或降雨、气候、地形等因素影响,在此不做讨论。综上,紫色土并不适用于中国土壤系统分类中“酸性”检索为 $pH < 5.5$ 的统一标准,因此,建议在紫色土定量化分类时,优先采用 $BS < 50\%$ 的“酸性”检索条件,如需采用 pH 值为检索条件,将 $pH < 5.5$ 修改为 $pH < 5.1$,可能更加符合实际情况。

4 结论

酸性紫色土 pH 值和 BS 值之间存在着极强的关联性,采用一元二次拟合方程 $y = -0.020\ 24x^2 + 0.346\ 42x - 0.740\ 23$ ($R^2 = 0.856\ 9$, y 为 BS, x 为 pH 值),能够较好实现酸性紫色土 BS 的估算。在具有一定数据量的前提下,应用 BP 神经网络模型可实现对 BS 更为准确的估算。

在紫色土 BS 为 50% 时,基于不同拟合模型所得 pH 值为 5.11~5.21,明显低于中国土壤系统分类高级单元(土类和亚类)中“酸性”诊断标准($BS < 50\%$ 或 $pH < 5.5$)。因此,建议在开展紫色土系统分类时优先采用 $BS < 50\%$ 的“酸性”诊断标准,若使用 pH 值为检索条件,可将原标准 $pH < 5.5$ 调整为 $pH < 5.1$,这样不仅更符合实际情况,也更能确保该类土壤系统分类的准确性。

参考文献:

- [1] 范庆锋,张玉龙,张玉玲,等.不同灌溉方式对设施土壤交换性盐基组成及比例的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):264-268.
- [2] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [3] KABAŁA C, ŁABAZ B. Relationships between Soil pH and Base Saturation-Conclusions for Polish and International Soil Classifications[J]. Soil Science Annual, 2018, 69(4): 206-214.
- [4] RAWAL A. Determination of Base Saturation Percentage in Agricultural Soils via Portable X-Ray Fluorescence Spectrometer[J]. Geoderma, 2019, 338: 375-382.
- [5] WANG A Q, JU B, LI D C. Predicting Base Saturation Percentage by pH: A Case Study of Red Soil Series in South China[J]. Agricultural Sciences, 2019, 10(4): 508-517.
- [6] 李光超,杨慧,张春来,等.典型岩溶区板栗树下土壤 pH 值与盐基饱和度关系研究[J].中国水土保持,2012(8):49-52.
- [7] 李忠意,程永毅,杨剑虹.重庆地区中性紫色土酸化特征[J].水土保持学报,2012,26(6):234-237,242.
- [8] 李士杏,王定勇.重庆地区 20 年间紫色土酸化研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2005,22(1):70-73.
- [9] 翁昊璐,慈恩,连茂山,等.重庆市酸性紫色土成因及其对发生分类的意义[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(9):32-39.

- [10] 毛红安, 谢德体, 杨剑虹. 重庆市江津柑橘果园土壤 pH 与盐基饱和度的关系探讨 [J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 877-879.
- [11] 程永毅, 李忠意, 白颖艳, 等. 电渗析法研究紫色土、黄壤和砖红壤的酸化特征 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(7): 1325-1333.
- [12] 刘康怀, 蓝俊康, 张力, 等. 广西红壤特征及其环境影响分析 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(1): 32-34.
- [13] 谭孟溪, 刘莉, 王朋顺, 等. 微地形作用下紫色母岩发育土壤的酸化特征 [J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1441-1449.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索 [M]. 3 版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2001.
- [15] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土-上篇 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] 张甘霖, 慈恩. 中国土系志·重庆卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [17] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [18] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] 郑文. 基于神经网络模型的城市生活垃圾预测 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(8): 51-56.
- [20] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 河南三种土壤阳离子交换量相关性及其预测模型研究 [J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 627-631.
- [21] 李锦芬, 瞿明凯, 黄标, 等. 区域土壤 CEC 与相关控制因子的空间非平稳关系评估 [J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 638-646.
- [22] 廖凯华, 徐绍辉, 程桂福, 等. 土壤 CEC 的影响因子及 Cokriging 空间插值分析: 以青岛市大沽河流域为例 [J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 26-32.
- [23] 贺琦琦, 郭向红, 雷涛, 等. 基于改进的 BP 神经网络对蓄水坑灌冬季果园土壤温度预测 [J]. 节水灌溉, 2019(7): 16-20.
- [24] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [25] 赵凯丽, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 不同母质和植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4818-4826.
- [26] 青长乐, 牟树森, 王定勇, 等. 紫色土再研究 I 紫色土的母质—红层 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(7): 120-125.
- [27] 李江文, 冉卓灵, 韩珍, 等. 含岩屑紫色土水分扩散规律 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 178-185.
- [28] 刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 887-897.
- [29] 李建维. 吉林省典型土系的研究及建立 [D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2015.

责任编辑 包颖