

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.02.014

刘懿煜, 慈恩, 蒙薪贇, 等. 基于不同质地分类的紫色土颗粒组成转换研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(2): 170-179.

基于不同质地分类的紫色土颗粒组成转换研究

刘懿煜, 慈恩, 蒙薪贇, 李向阳, 孟倩, 王风香

西南大学 资源环境学院, 重庆 400715

摘要: 为实现国际制与美国农业部制土壤质地资料的转换, 基于 143 个紫色土样品的颗粒组成数据, 采用三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型构建紫色土不同粒级含量的转换模型, 通过一元一次方程、一元二次方程和 SVR 模型关联三次样条插值法的转换值与实际值以及紫色土颗粒当量粒径 $[0.002, 0.02)$ mm 与 $[0, 0.05)$ mm 的粒级含量, 并使用 MAE 和 RMSE 评估各模型的转换精度。结果表明: ① 三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法转换效果较差, 分形模型效果较好。通过 SVR 模型或一元二次拟合方程 $y = -0.00190x^2 + 0.98190x - 4.14130$ 可实现对三次样条插值法预测 $[0, 0.05)$ mm 的粒级含量的校正; 通过一元二次拟合方程 $y = 0.00483x^2 + 0.90944x + 3.63924$ 可实现对三次样条插值法预测 $[0, 0.02)$ mm 的粒级含量的校正; 校正后的三次样条插值法转换精度较高。② 通过一元二次拟合方程 $y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$ 可实现 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量向 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量的便捷转换, 但部分样点转换误差较大; 通过 SVR 模型或一元二次拟合方程 $y = 0.00108x^2 + 0.30965x - 0.48106$ 可实现 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量向 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量的便捷转换, 转换精度较高。

关键词: 紫色土; 土壤颗粒组成; 土壤质地; 质地转换模型

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1673-9868(2026)02-0170-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Particle Composition Transformation of Purple Soil Based on Different Texture Classifications

LIU Siyu, CI En, MENG Xinyun,

LI Xiangyang, MENG Qian, WANG Fengxiang

College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To achieve the conversion of soil texture data between the International System and the United

收稿日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977002); 农业农村部项目(24250048)。

作者简介: 刘懿煜, 硕士研究生, 主要从事土壤发生与分类研究。

通信作者: 慈恩, 教授, 博士研究生导师。

States Department of Agriculture System, this study used cubic spline interpolation method, piecewise cubic Hermite interpolation method and fractal model to construct the conversion model of different particle size content of purple soil, based on the particle composition data of 143 purple soil samples. The conversion value and actual value of cubic spline interpolation method and the contents of particles in the $[0.002, 0.02)$ mm range and $[0, 0.05)$ mm were correlated by one-dimensional linear equation, one-dimensional quadratic equation and SVR model. MAE and RMSE were used to evaluate the conversion accuracy of each model. The results showed that: ① The cubic spline interpolation method and piecewise cubic Hermite interpolation method had poor conversion effect, while the fractal model had better effect. The SVR model or the quadratic fitting equation $y = -0.00190x^2 + 0.98190x - 4.14130$ were used to correct the prediction of the content of particles $[0, 0.05)$ mm by cubic spline interpolation. The quadratic fitting equation $y = 0.00483x^2 + 0.90944x + 3.63924$ were used to correct the prediction of the content of the particles $[0, 0.02)$ mm by cubic spline interpolation method. The corrected cubic spline interpolation method achieved higher conversion accuracy. ② The quadratic fitting equation $y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$ achieved the convenient conversion from $[0.002, 0.02)$ mm particle content to $[0, 0.05)$ mm particle content, but the conversion error of some samples were large. Through the SVR model or the quadratic fitting equation $y = 0.00108x^2 + 0.30965x - 0.48106$, the convenient conversion from the content of particles $[0, 0.05)$ mm to the content of particles in the $[0.002, 0.02)$ mm range were achieved, and the conversion accuracy was high.

Key words: purple soil; soil particle composition; soil texture; texture conversion model

土壤质地是根据土壤颗粒组成划分的土壤类型,反映了土壤的自然属性,对土壤肥力有着极大的影响,对制定土壤利用与管理规划、进行土壤改良意义重大^[1]。常见的土壤质地分类制有国际制、美国农业部制(简称美国制)、卡钦斯基制、中国制等。除中国制外,我国土壤学界先后采用过其他 3 种质地分类标准:20 世纪 50—80 年代多采用卡钦斯基制,第二次全国土壤普查后期汇总采用国际制,《中国土壤》《中国土种志》和各省土壤志采用国际制,中国土壤系统分类、我国土系调查与《中国土系志》编制采用美国制^[2-3]。这表明我国存在不同分类标准的土壤质地资料,要利用这些质地资料必然会涉及不同质地分类的土壤颗粒组成转换问题,因此建立土壤质地转换模型具有重要意义。传统的土壤质地转换方法是图解法,即绘制土壤颗粒级配曲线,读出某粒级百分含量^[4],但此方法效率低、主观影响大。文献[5]利用二次样条插值的数学方法对土壤质地进行转换;文献[6]利用幂函数模型进行土壤质地转换;国外一些学者基于统计数学方法提出 WEIBULL 模型,较好地解决了土壤粒级预测过程中的人为干扰问题^[7-9];对数正态模型、逻辑生长模型、对数线性模型、Gompertz 方程也被一些学者应用于土壤粒级资料的转换^[10-12]。文献[13]对比了三次样条插值法、二次样条插值法和线性插值法在土壤粒径转换中的效果,结果表明三次样条插值法转换精度较高;文献[14]应用分段三次 Hermite 插值法、三次样条插值法和分段线性插值法对土壤质地进行转换,结果表明分段三次 Hermite 插值法效果较好;文献[15]采用分形模型、对数正态模型、逻辑生长模型、WEIBULL 模型预测土壤颗粒累积百分含量,结果表明分形模型预测效果较好。对比发现,三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型是土壤质地转换的常用方法^[13-24]。然而,上述方法仅针对我国部分地区的土壤类型进行了试验,缺乏对紫色土质地转换的研究;大部分研究仅涉及卡钦斯基制向国际制或美国制的转换,缺乏国际制与美国制相互转换的研究;在预测某土壤粒级含量时需要较多的其他粒级含量数据,但一般的土壤调查资料仅涉及砂粒、粉粒和黏粒 3 个粒级,这种情况下上述方法预测效果是否良好未能探究。为此,本文以紫色土为研究对象,选用三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型转换国际制与美国制质地分类的土壤粒级含量,通过一元一次方程、一元二次方程、支持向量回归(SVR)

模型校正转换结果,并构建更为便捷的土壤质地转换模型,为实现不同质地分类下的土壤颗粒组成的快速、精确转换提供一定的科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

根据研究需要,在重庆市境内采集了 43 个紫色土剖面的 143 个发生层土样(A 层 51 个、B 层 84 个、C 层 8 个),土壤类型涉及紫色土所有亚类(酸性紫色土 36 个、中性紫色土 53 个、石灰性紫色土 54 个);样品砾石含量范围为 $[0, 90\%]$,其中 $[0, 5\%]$ 75 个, $(5\%, 20\%]$ 39 个, $(20, 40\%]$ 12 个, $(40\%, 90\%]$ 17 个。供试紫色土的母岩地层主要包括夹关组、蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组、自流井组、巴东组、飞仙关组等,基本覆盖了重庆市所有紫色岩地层。将采集的土样及时运至室内,待其自然风干。

1.2 指标测定

取适量上述风干土样,经去杂、研磨过 2 mm 筛后,根据国际制和美国制划分质地的土壤颗粒组成标准(表 1),采用吸管法^[25]测定并统计各当量粒径 $[0.2, 2]$ mm、 $[0.05, 0.2)$ mm、 $[0.02, 0.05)$ mm、 $[0.002, 0.02)$ mm、 $[0, 0.002)$ mm 的土壤样品粒级含量(质量百分比)。

表 1 国际制与美国制划分质地的土壤颗粒组成标准

当量粒径范围/mm	国际制	美国制
$[0.2, 2]$	粗砂粒	砂粒
$[0.05, 0.2)$	细砂粒	
$[0.02, 0.05)$		粉粒
$[0.002, 0.02)$	粉粒	
$[0, 0.002)$	黏粒	黏粒

1.3 研究方法

采用三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型转换国际制与美国制土壤粒级含量,得到 3 种模型的初步转换值;通过 Origin 软件分析 3 种模型初步转换值与实际值的 Pearson 相关性,筛选得到与实际值相关性最强的模型初步转换值,采用一元一次方程、一元二次方程和支持向量回归(SVR)模型关联该模型初步转换值与实际值^[26-27];使用 MATLAB 软件拟合 SVR 模型时,随机抽取 116 个样品数据(约 80%)用于模型训练,剩余 27 个样品数据(约 20%)用于模型性能测试,调整正则化参数为 10,核宽度自动选择。

选择 $[0.02, 0.2)$ mm、 $[0, 0.02)$ mm、 $[0.02, 0.05)$ mm、 $[0.02, 2]$ mm、 $[0.002, 0.02)$ mm、 $[0, 0.05)$ mm、 $[0.05, 2]$ mm、 $[0.002, 0.05)$ mm 粒级含量数据,借助 Origin 软件分析各粒级含量间的 Pearson 相关系数;根据分析结果,筛选出两个相关性最强的变量用于国际制与美国制粒级含量的关联分析,关联方法同上。

使用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)评价模型预测效果,MAE 和 RMSE 越小,表明该模型预测效果越好。

1.3.1 三次样条插值法

区间 $[a, b]$ 上的函数 $F(x)$

$$F(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

有 n 个不同点 x_1, x_2, \dots, x_n , 对应的函数值为 $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n)$, 要求估计函数在 $[a, b]$ 中 $x_i (a \leq x_i \leq b)$ 点的值。

三次样条插值函数是分段函数^[13, 21], $F(x)$ 为三次多项式, 有 4 个系数, 通过 2 个节点, 且三次样条插值函数在 $n-1$ 个内节点上的一阶和二阶导数连续; 第一个和第二个三次多项式的三阶导数相等, 最后一个和倒数第二个三次多项式也做同样的处理。

使用国际制质地资料预测美国制质地资料时, 在 MATLAB 软件输入参数: $x=[0.002, 0.02, 2]$; $y=[y_1, y_2, y_3]$; $y_0 = \text{spline}(x, y, 0.05)$ 。 y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示 $[0, 0.002)$ mm、 $[0, 0.02)$ mm、 $[0, 2)$ mm 的粒级含量, y_0 为三次样条插值法预测的 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量。使用美国制质地资料预测国际制质地资料时, 在 MATLAB 软件输入参数: $x=[0.002, 0.05, 2]$; $y=[y_1, y_2, y_3]$; $y_0 = \text{spline}(x, y, 0.02)$ 。 y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示 $[0, 0.002)$ mm、 $[0, 0.05)$ mm、 $[0, 2)$ mm 的粒级含量, y_0 为三次样条插值法预测的 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量。

1.3.2 分段三次 Hermite 插值法

$$H(x) = d_0x^3 + d_1x^2 + d_2x + c \quad (2)$$

分段三次 Hermite 插值^[14, 21]函数 $H(x)$ 的原函数和一阶导函数均在区间 $[a, b]$ 上连续。

分段三次 Hermite 插值法和三次样条插值法在 MATLAB 软件输入的参数基本一致, 但需将插值函数 spline 更换为 pchip, 即 $y_0 = \text{pchip}(x, y, 0.05)$ 或 $y_0 = \text{pchip}(x, y, 0.02)$ 。

1.3.3 分形模型

该模型使用土壤颗粒重量表征土壤分形特点^[15], 公式如下:

$$W(\delta < \bar{R}_{\max})/W_0 = (\bar{R}_i/\bar{R}_{\max})^{3-D} \quad (3)$$

式中: δ 为粒级直径; \bar{R}_{\max} 为最大土壤粒径的平均值; W_0 表示粒级重量总和; \bar{R}_i 为 i 粒级的土粒平均直径。在等式两边取常用对数, 分别以 $\ln(\bar{R}_i/\bar{R}_{\max})$ 为自变量, $\ln(W/W_0)$ 为因变量, 拟合直线方程 $y = ax + b$, $3-D$ 为直线方程的斜率。文献[15]认为在 $[0.001, 0.1]$ mm 的粒级区间内, 分形模型散点基本呈现直线型, 则可用已知的土壤质地资料拟合分形模型散点线性方程预测土壤的其他粒级含量。

使用国际制质地资料预测美国制质地资料时, $[0, 0.02)$ mm 和 $[0, 0.002)$ mm 粒级重量数据用于拟合分形模型方程并预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级重量; 使用美国制质地资料预测国际制质地资料时, $[0, 0.05)$ mm 和 $[0, 0.002)$ mm 粒级重量数据用于拟合分形模型方程并预测 $[0, 0.02)$ mm 粒级重量。其中, \bar{R}_{\max} 取 2 mm, W_0 取 100 g。

2 结果与分析

2.1 三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型初步转换的精度评估

表 2 表明, 国际制与美国制土壤粒级含量转换模型中, 分形模型的转换精度相对较好, 两种插值法的转换效果较差。在国际制向美国制土壤粒级含量转换时, 增加粗砂粒 $[0.2, 2]$ mm 粒级含量数据后, spline 和 pchip 转换精度大大提升, 但转换误差仍然较大; 而在增加了 $[0, 0.2)$ mm 粒级含量数据后, 分形模型呈现的拟合效果不佳, 转换精度大大下降。

表 2 3 种模型初步转换的精度评估

	spline		pchip		fractal	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
$I_{0.05a}$	27.01	29.27	15.47	16.47	3.83	5.44
$I_{0.05b}$	17.78	19.51	6.87	8.36	9.17	10.93
$A_{0.02}$	10.14	11.09	6.53	7.46	2.38	3.30

注: spline 表示三次样条插值法, pchip 表示分段三次 Hermite 插值法, fractal 表示分形模型; $I_{0.05a}$ 表示使用国际制质地资料预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量, $I_{0.05b}$ 表示使用国际制土壤粒级制资料预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量, $A_{0.02}$ 表示使用美国制质地资料预测 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量。

2.2 模型初步转换值与实际值的关联分析

各模型初步转换得到的紫色土 $[0, 0.05)$ mm 和 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量与吸管法测定得到的紫色土 $[0, 0.05)$ mm 和 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量的 Pearson 相关性分析结果如表 3、4 所示。结果表明, 各模型初步转换值与实际值间存在显著的相关性, 其中 $S_{0.05b}$ 与 $R_{0.05}$ 、 $S_{0.02}$ 与 $R_{0.02}$ 的相关性最强。本研究采用一元一次方程、一元二次方程和 SVR 模型对这两组变量进行关联分析。

表 3 模型初步转换值与实际值的相关性分析($[0, 0.05)$ 粒级含量)

	$R_{0.05}$	$S_{0.05a}$	$S_{0.05b}$	$P_{0.05a}$	$P_{0.05b}$	$F_{0.05a}$	$F_{0.05b}$
$R_{0.05}$	1	0.973 6	0.973 9	0.959 8	0.946 5	0.953 7	0.953 0
	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$

注: $R_{0.05}$ 表示 $[0, 0.05)$ mm 粒级实际含量; $S_{0.05a}$ 表示使用国际制粒级含量通过三次样条插值法预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量, $S_{0.05b}$ 表示使用国际制质地资料通过三次样条插值法预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量; P 表示分段三次 Hermite 插值法, F 表示分形模型。下同。

表 4 模型初步转换值与实际值的相关性分析($[0, 0.02)$ 粒级含量)

	$R_{0.02}$	$S_{0.02}$	$P_{0.02}$	$F_{0.02}$
$R_{0.02}$	1	0.988 6	0.973 4	0.973 2
	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$	$p < 0.001$

注: $R_{0.02}$ 表示 $[0, 0.02)$ mm 粒级实际含量; $S_{0.02}$ 表示使用美国制质地资料通过三次样条插值法预测 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量。

SVR 模型不能直接给出拟合方程的表达式, 但能够很好地捕捉变量样点间的非线性关系(图 1)。由表 5 可知, 使用 SVR 模型关联 $S_{0.05b}$ 与 $R_{0.05}$ 效果相对最好。此外, 一元二次方程 $y = -0.001 90x^2 + 0.981 90x - 4.141 30$ 关联 $S_{0.05b}$ 与 $R_{0.05}$ 效果也较好。由表 6 可知, 使用一元二次方程 $y = 0.004 83x^2 + 0.909 44x + 3.639 24$ 关联 $S_{0.02}$ 与 $R_{0.02}$ 的效果最好, 其次是 SVR 模型。

表 5 $S_{0.05b}$ 与 $R_{0.05}$ 关联分析

模型类型	回归方程	R^2	p	MAE	RMSE
一元一次方程	$y = 0.616 7x + 11.986 6$	0.96	< 0.001	2.65	3.74
一元二次方程	$y = -0.001 90x^2 + 0.981 90x - 4.141 30$	0.97	< 0.001	2.38	3.20
SVR		0.97		2.35	2.97

注: 回归方程中的自变量 x 表示 $S_{0.05b}$, 因变量 y 表示 $S_{0.05b}$ 的校正值。

表 6 $S_{0.02}$ 与 $R_{0.02}$ 关联分析

模型类型	回归方程	R^2	p	MAE	RMSE
一元一次方程	$y = 1.332 9x - 5.029 5$	0.98	< 0.001	1.67	2.38
一元二次方程	$y = 0.004 83x^2 + 0.909 44x + 3.639 24$	0.98	< 0.001	1.67	2.27
SVR		0.98		1.71	2.34

注: 回归方程中的自变量 x 表示 $S_{0.02}$, 因变量 y 表示 $S_{0.02}$ 的校正值。

本研究绘制了关联 $S_{0.05b}$ 和 $R_{0.05}$ 、 $S_{0.02}$ 和 $R_{0.02}$ 效果较好模型的校正结果与实际值的 1:1 线图(图 2)。SVR 模型校正后的 $S_{0.05b}$ 预测值大多数趋于 1:1 线图附近, 绝对误差较小, 但有约 4% 的样点绝对误差位于 5~8, 有约 1% 的样点绝对误差大于 8, 最大绝对误差为 11; 一元二次方程 $y = -0.001 90x^2 +$

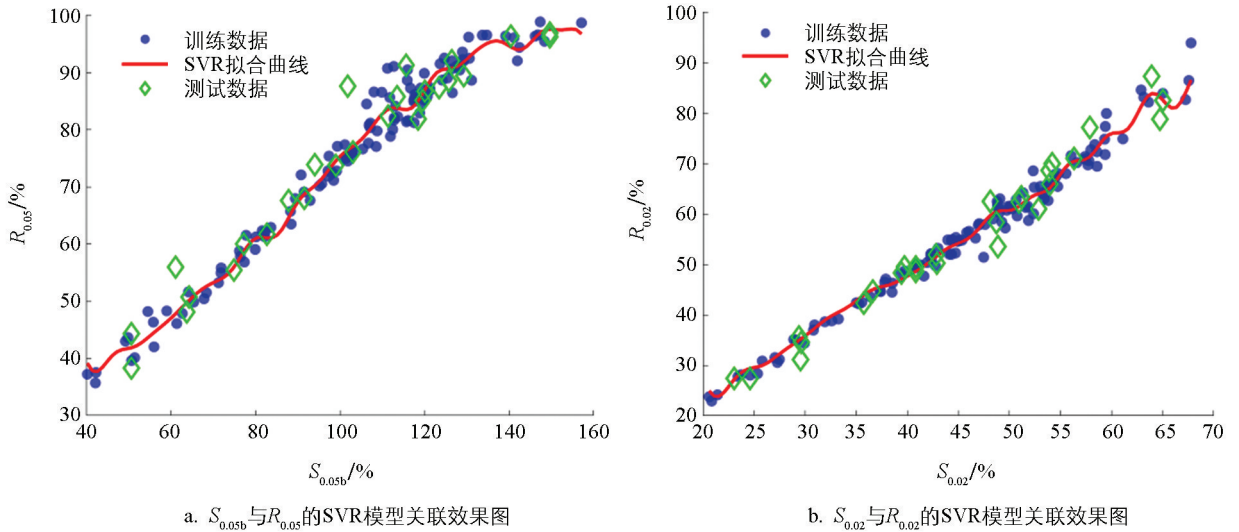


图 1 SVR 模型关联效果

0.981 90x - 4.141 30 校正后的 $S_{0.05b}$ 大多数样点预测值绝对误差较小, 但有约 4% 的样点绝对误差位于 5~8, 有约 2% 的样点绝对误差大于 8, 最大绝对误差为 11.4; 一元二次方程 $y = 0.004 83x^2 + 0.909 44x + 3.639 24$ 校正后的 $S_{0.02}$ 大多数样点预测值绝对误差较小, 但有约 2.7% 的样点绝对误差位于 5~7, 最大绝对误差为 6.5。

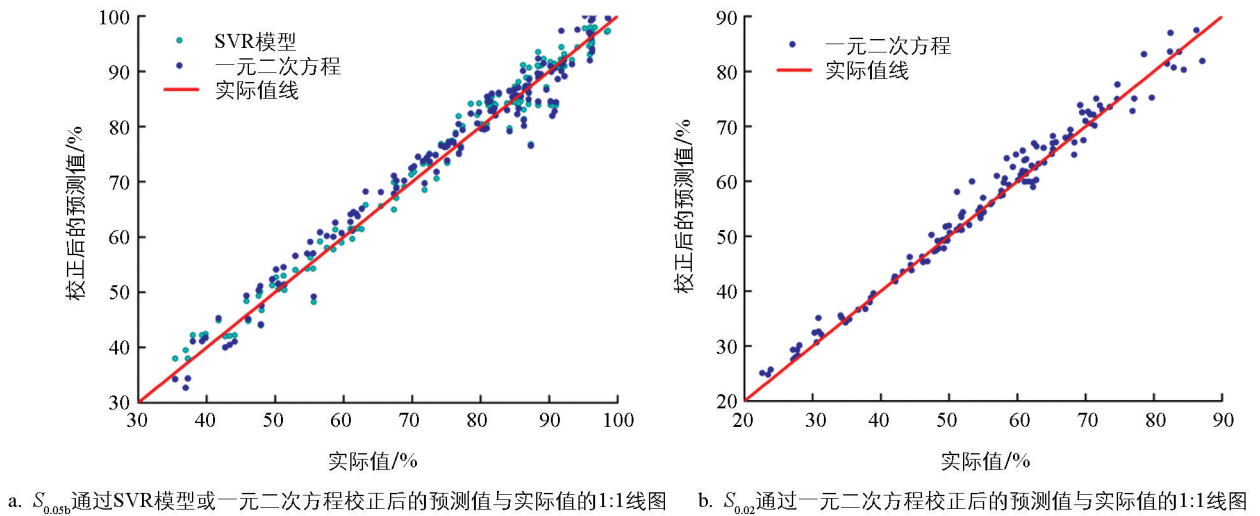
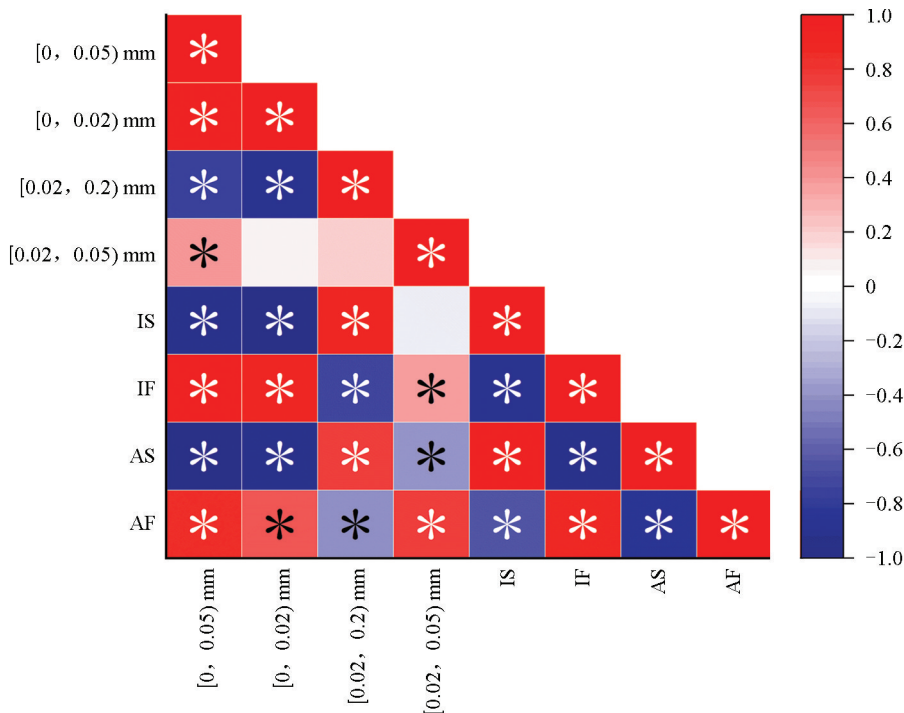


图 2 关联模型校正后的预测值与实际值的 1:1 线图

2.3 土壤粒级相对含量的关联分析

通过上述方法转换国际制与美国制质地资料过程较为繁琐, 本研究建立了国际制与美国制粒级含量的便捷转换模型。选择 $[0, 0.02)$ mm、 $[0.02, 0.2)$ mm、 $[0.02, 0.05)$ mm、 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量、国际制质地分类标准的砂粒和粉粒粒级含量、美国制质地分类标准的砂粒和粉粒粒级含量, 借助 Origin 软件分析各粒级含量间的 Pearson 相关性(图 3)。根据分析结果, 选择国际制质地分类标准的粉粒 ($[0.002, 0.02)$ mm) 粒级含量与 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量 ($r = 0.94, p < 0.001$), 采用一元一次方程、一元二次方程和 SVR 模型进行关联分析。由表 7 可知, 国际制 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量与 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量关联效果最好的模型为一元二次方程 $y = -0.031 82x^2 + 3.769 53x - 5.763 68$, 其次为 SVR 模型和一元一次方程。由表 8 分析可知, $[0, 0.05)$ mm 粒级含量与 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量关联效果最好的模型为 SVR 模型, 其次分别为一元二次方程和一元一次方程, 两回归方程的关联效果基本一致。



IS 表示国际制质地分类标准的砂粒粒级含量, IF 表示国际制质地分类标准的粉粒粒级含量, AS 表示美国制质地分类标准的砂粒粒级含量, AF 表示美国制质地分类标准的粉粒粒级含量; * 表示 $p < 0.001$ 。

图 3 各土壤粒级含量数据的 Pearson 相关性分析

表 7 [0.002, 0.02) mm 粒级含量与 [0, 0.05) mm 粒级含量关联分析

模型类型	回归方程	R^2	p	MAE	RMSE
一元一次方程	$y = 1.9987x + 16.8359$	0.92	< 0.001	3.57	4.68
一元二次方程	$y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$	0.93	< 0.001	3.24	4.15
SVR		0.93		3.46	4.47

注: 回归方程中的自变量 x 表示国际制 [0.002, 0.02) mm 粒级含量, 因变量 y 表示 [0, 0.05) mm 粒级含量。

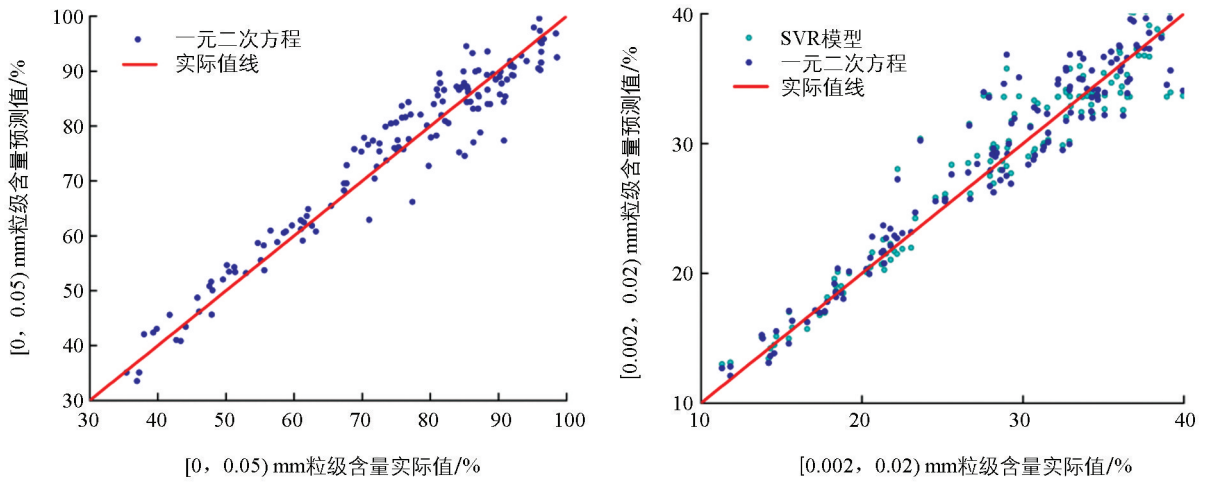
表 8 [0, 0.05) mm 粒级含量与 [0.002, 0.02) mm 粒级含量关联分析

模型类型	回归方程	R^2	p	MAE	RMSE
一元一次方程	$y = 0.4610x - 5.4577$	0.92	< 0.001	1.63	2.21
一元二次方程	$y = 0.00108x^2 + 0.30965x - 0.48106$	0.92	< 0.001	1.62	2.20
SVR		0.92		1.50	2.15

注: 回归方程中的自变量 x 表示 [0, 0.05) mm 粒级含量, 因变量 y 表示 [0.002, 0.02) mm 粒级含量。

选择 [0.002, 0.02) mm 粒级含量与 [0, 0.05) mm 粒级含量关联效果较好的一元二次方程 $y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$ 、[0, 0.05) mm 粒级含量与 [0.002, 0.02) mm 粒级含量关联效果较好的 SVR 模型和一元二次方程 $y = 0.00108x^2 + 0.30965x - 0.48106$, 绘制模型预测值与实际值的 1:1 线图(图 4)。通过一元二次方程将 [0.002, 0.02) mm 粒级含量向 [0, 0.05) mm 粒级含量转换时, 大部分样点转换的绝对误差较小, 但有约 11% 的样点绝对误差位于 5~8, 约 5% 的样点绝对误差大于 8, 最大绝对误差为 14(图 4a), 这表明直接使用拟合的一元二次方程 $y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$ 将 [0.002, 0.02) mm 粒级含量转换为 [0, 0.05) mm 粒级含量的部分转换值误差较大。通过 SVR 模型将 [0,

0.05) mm 粒级含量转换为[0.002, 0.02) mm 粒级含量时, 大部分样点转换的绝对误差较小, 但有约 6% 样点绝对误差位于 5~7, 最大绝对误差为 6.5; 通过一元二次方程 $y=0.001\ 08x^2+0.309\ 65x-0.481\ 06$ 将[0, 0.05) mm 粒级含量转换为[0.002, 0.02) mm 粒级含量时, 大部分样点转换的绝对误差较小, 但有约 5% 样点绝对误差位于 5~8, 最大绝对误差为 7.4(图 4b)。



a. [0.002, 0.02) mm 粒级含量向[0, 0.05) mm 粒级含量转换

b. [0, 0.05) mm 粒级含量向[0.002, 0.02) mm 粒级含量转换

图 4 [0.002, 0.02) mm 与[0, 0.05) mm 粒级含量关联模型预测值与实际值 1:1 线图

2.4 各模型转换精度的对比分析

上述研究中的紫色质地转换模型精度统计如表 9、10 所示。分析可知: ① 国际制质地资料向美国制质地资料转换时, 各模型转换精度由高到低分别是 $S_{S_{0.05}}$ 、 $Q_{S_{0.05}}$ 、 $Q_{0.05}$ 、 $F_{0.05}$ 。考虑到 SVR 模型不能直接应用于实际操作, 所以 $Q_{S_{0.05}}$ 是误差相对较小的方法; 而 $Q_{0.05}$ 可直接进行[0.002, 0.02) mm 粒级含量向[0, 0.05) mm 粒级含量的转换, 转换精度次之但优于分形模型。② 美国制质地资料向国际制质地资料转换时, 各模型转换精度由高到低分别是 S_{IF} 、 Q_{IF} 、 $Q_{S_{0.02}}$ 、 $F_{0.02}$, 各模型转换精度均较好。相比于其他 3 种转换模型, 使用拟合的一元二次方程(Q_{IF})即可实现[0, 0.05) mm 粒级含量向[0.002, 0.02) mm 粒级含量的转换。

表 9 国际制质地转美国制质地各模型精度

	$F_{0.05}$	$S_{S_{0.05}}$	$Q_{S_{0.05}}$	$Q_{0.05}$
MAE	3.83	2.35	2.38	3.24
RMSE	5.44	2.97	3.20	4.15

注: $F_{0.05}$ 表示通过分形模型预测[0, 0.05) mm 粒级含量; $S_{S_{0.05}}$ 表示通过 SVR 模型校正三次样条插值法预测[0, 0.05) mm 粒级含量; $Q_{S_{0.05}}$ 表示通过一元二次方程校正三次样条插值法预测[0, 0.05) mm 粒级含量; $Q_{0.05}$ 表示通过一元二次方程将[0.002, 0.02) mm 粒级含量转换为[0, 0.05) mm 粒级含量。

表 10 美国制质地转国际制质地各模型精度

	$F_{0.02}$	$Q_{S_{0.02}}$	S_{IF}	Q_{IF}
MAE	2.38	1.67	1.50	1.62
RMSE	3.30	2.27	2.15	2.20

注: $F_{0.02}$ 表示通过分形模型预测[0, 0.02) mm 粒级含量; $Q_{S_{0.02}}$ 表示通过一元二次方程校正三次样条插值法预测[0, 0.02) mm 粒级含量; S_{IF} 表示通过 SVR 模型将[0, 0.05) mm 粒级含量转换为[0.002, 0.02) mm 粒级含量; Q_{IF} 表示通过一元二次方程将[0, 0.05) mm 粒级含量转换为[0.002, 0.02) mm 粒级含量。

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究表明,当插值节点过少时,三次样条插值法与分段三次 Hermite 插值法预测效果不佳,三次样条插值法甚至会出现异常值与极端值,这与以往研究结果相符^[14]。国际制与美国制的土壤质地资料一般仅有黏粒、粉粒和砂粒含量,因此直接使用这两种插值方法进行紫色土粒级含量的转换效果较差。本研究在国际制向美国制土壤粒级含量转换中增加了粗砂含量插值节点后,两种插值法的预测精度大大提升,这也说明了增加插值节点有利于提升插值函数的预测精度。相比于两种插值法,分形模型的预测效果较好,以往的研究也表明分形模型适合进行土壤粒级含量的预测^[15, 23],但分形模型需要通过已有的节点构建线性函数,若分形模型散点在某一粒级范围内并不呈直线型,那么此时的预测效果就较差。本研究在使用国际制向美国制质地资料转换时增加了粗砂含量插值节点后,分形模型的预测效果大大降低,这进一步说明分形模型不适合大粒级数据的预测^[15],建议在小粒级区间 $[0.001, 0.1]$ mm 内应用。

在紫色土国际制与美国制粒级含量转换中,三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法和分形模型的转换值与实际值相关性显著。本研究采用一元一次方程、一元二次方程和 SVR 模型关联相关性较强的三次样条插值法的转换值与实际值,通过关联效果较好的 SVR 模型或一元二次拟合方程实现对三次样条插值法转换结果的校正,校正效果较好,明显优于分形模型的预测精度,这有效解决了三次样条插值法在土壤粒级含量转换时常出现的 Runge 问题^[13]。研究发现,紫色土部分粒级含量间的相关性较高,如 $[0.002, 0.02)$ mm 与 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量,这可能是因为紫色土成土速度快、发育缓慢,基本保持了母质的一系列理化特征,而紫色土母质矿物组成较为均一^[28],颗粒破碎后粒径分布呈现出一定的连续性,不同粒径的颗粒在风化过程中亦存在一定的关联性。鉴于紫色土 $[0.002, 0.02)$ mm 与 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量间存在较强的相关性,本研究采用 SVR 模型直接关联两变量,并拟合了关联效果较好的一元二次方程,为实现紫色土国际制与美国制质地资料的转换提供了较为便捷的转换方法。由于缺乏一定量的其他土壤类型颗粒组成数据,本研究未能进一步探究转换方程在其他土壤质地转换中的适用性,这也是研究的局限所在。在未来,可参考本文提供的转换思路,针对其他土壤类型开展质地资料转换试验。

3.2 结论

在紫色土国际制与美国制质地转换中,三次样条插值法、分段三次 Hermite 插值法转换效果较差,分形模型效果较好。通过 SVR 模型或一元二次拟合方程 $y = -0.00190x^2 + 0.98190x - 4.14130$ 可实现对三次样条插值法预测 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量的校正;通过一元二次拟合方程 $y = 0.00483x^2 + 0.90944x + 3.63924$ 可实现对三次样条插值法预测 $[0, 0.02)$ mm 粒级含量的校正;校正后的三次样条插值法转换精度较高。

通过一元二次拟合方程 $y = -0.03182x^2 + 3.76953x - 5.76368$ 可实现紫色土 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量向 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量的便捷转换,但部分样点转换误差较大;通过 SVR 模型或一元二次拟合方程 $y = 0.00108x^2 + 0.30965x - 0.48106$ 可实现 $[0, 0.05)$ mm 粒级含量向 $[0.002, 0.02)$ mm 粒级含量的便捷转换,转换精度较高。

参考文献:

- [1] 徐建明. 土壤学 [M]. 4 版. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] 何海龙, 齐雁冰, 吕家珑, 等. 中国土壤质地分类系统的发展与建议修订方案 [J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 501-510, 496.
- [3] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨 [J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [4] 胡宏祥, 马友华. 卡庆斯基制与美国制间土粒分析结果的转换 [J]. 安徽农业科学, 2004, 32(6): 1156-1157.

- [5] 吕喜玺,沈荣明. 土壤可蚀性因子 K 值的初步研究 [J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 63-70.
- [6] 黄炎和,卢程隆,傅勤,等. 土壤质地转换模型的探讨 [J]. 福建水土保持, 1993, 5(1): 37-40.
- [7] ZOBECK T M, GILL T E, POPHAM T W. A Two-Parameter Weibull Function to Describe Airborne Dust Particle Size Distributions [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(10): 943-955.
- [8] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. Numerical Recipes in Fortran 90, Vol. 2 [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996
- [9] CRAWFORD J W, SLEEMANT B D, YOUNG I M. On the Relation Between Number-Size Distributions and the Fractal Dimension of Aggregates [J]. Journal of Soil Science, 1993, 44(4): 555-565.
- [10] ZOBECK T M, POPHAM T W, SKIDMORE E L, et al. Aggregate-Mean Diameter and Wind-Erodible Soil Predictions Using Dry Aggregate-Size Distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 425-436.
- [11] SKAGGS T H, ARYA L M, SHOUSE P J, et al. Estimating Particle-Size Distribution from Limited Soil Texture Data [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1038-1044.
- [12] NEMES A, WÖSTEN J H M, LILLY A, et al. Evaluation of Different Procedures to Interpolate Particle-Size Distributions to Achieve Compatibility within Soil Databases [J]. Geoderma, 1999, 90(3-4): 187-202.
- [13] 蔡永明,张科利,李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.
- [14] 谢毅文,陈晓宏,王兆礼,等. 土壤质地转换中优选插值方法研究 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 50-52, 57.
- [15] 郭中领,张科利,董建志,等. 利用分形理论解决不同土粒分级标准间土壤质地资料的转换问题 [J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1254-1260.
- [16] 刘吉峰,李世杰,秦宁生,等. 青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究 [J]. 干旱区地理, 2006, 29(3): 321-326.
- [17] 陆颖, BUCHANAN S, 何大明. 流域水文模型中的土壤质地转换与饱和导水率 K_s 值确定 [J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(5): 29-32.
- [18] 关作正,石岚,徐丽娜. 黄河流域托万区间 SWAT 模型土壤属性数据库的建立 [J]. 内蒙古水利, 2009(4): 5-7.
- [19] 查恩爽,卞建民,姜振蛟,等. 吉林西部降水入渗模拟中有关参数转换及确定 [J]. 节水灌溉, 2010(6): 15-17.
- [20] 吴昌广,曾毅,周志翔,等. 三峡库区土壤可蚀性 K 值研究 [J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(3): 8-12.
- [21] 闫瑞,闫胜军,李晋超,等. 岔口流域不同土壤质地转换模型精度验证 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2013, 33(2): 109-113.
- [22] 刘钦,王雯涛. SWAT 模型土壤物理属性数据库构建方法探究 [J]. 水科学与工程, 2015(6): 40-42.
- [23] 汪邦稳. 安徽省土壤可蚀性 K 值及其分布特征 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(6): 132-139.
- [24] 管飞,叶明亮,马友华. 江淮丘陵区土壤可蚀性 K 值研究——以肥东县为例 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(1): 105-111.
- [25] 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.
- [26] 刘彬,慈恩,刘俊延,等. 酸性紫色土盐基饱和度和 pH 值的关联分析及分类学意义 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 65-72.
- [27] 王凤香,蒙薪赞,慈恩,等. 吸管法和激光法测定紫色土机械组成对比研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(9): 164-172.
- [28] 石孝均,李振轮,王红叶. 中国紫色土 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.

责任编辑 廖坤

崔玉洁