

激光法与吸管法测定黄土及黄土状母质颗粒组成的转换模型研究

周雨顺¹, 崔淑芳², 张怀志¹, 冀宏杰¹, 申哲¹, 李佳钰³, 徐爱国^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081; 2. 山东省滨州市韩墩引黄灌溉管理局, 山东 滨州 256621; 3. 北京工业大学理学部, 北京 100124)

摘要: 为探讨激光法与吸管法对黄土及黄土状母质土壤颗粒组成转换的差异, 提高两种方法测定土壤颗粒组成的转换精度, 于 2016—2019 年, 采集宁夏回族自治区海原县黄土母质 0 ~ 20 cm 土层土样 55 个, 山东省滨州市滨城区黄土状母质 0 ~ 20 cm 土层土样 41 个, 采用两种方法测定土壤颗粒组成, 建立转换模型, 并利用文献数据进行验证。结果表明: (1) 两种方法测定黄土及黄土状母质的砂粒、粉粒和黏粒含量间均表现为极显著相关关系, 可建立转换模型进行粒径转换。两种方法测定砂粒、粉粒和黏粒含量的相关系数, 黄土母质分别为 0.7980、0.7120 和 0.6850, 黄土状母质分别为 0.8970、0.7919 和 0.8223, 黄土状母质转换模型相关性高于黄土母质。(2) 根据建立的空间直角坐标系计算得出, 黄土母质、黄土状母质和混合母质各粒级影响整体误差的贡献值均为黏粒最大。黄土母质、黄土状母质和混合母质转换模型均采用黏粒进行差减法, 以减小转换偏差。根据计算获得的各粒级对整体误差的贡献值, 选择贡献值最大的粒级进行差减法, 可提高转换精度。(3) 采用相同母质的颗粒组成转换模型, 激光法转换后质地与吸管法质地的一致率, 两种母质均为 78%; 而采用另一母质转换模型进行转换, 黄土母质质地一致率为 44%, 黄土状母质为 20%。通过相同母质转换模型可以提高激光法转换吸管法质地的转换精度。

关键词: 土壤颗粒组成; 黄土母质; 黄土状母质; 激光粒度仪; 吸管法

质地是土壤重要的自然属性, 是土壤肥力与耕地质量评价不可或缺的基础资料^[1]。准确测定土壤颗粒组成从而划分质地是深入研究土壤肥力状况和发育状况^[2]等相关问题的前提。

测定土壤颗粒组成的方法主要包括沉降法(吸管法和比重计法)、激光衍射法和筛分法等, 其中吸管法是公认的标准方法^[3-4], 但其操作过程繁琐, 耗时久, 测定精度也受实验室条件和人为操作熟练度的制约^[5]。激光粒度仪由于具有操作简便、速度快和测定范围广等特点, 在土壤颗粒组成测定中得到了快速发展和广泛应用。但国内外诸多研究表明, 激光法和吸管法测定的颗粒组成存在明显差异^[6-11], 与传统吸管法相比, 激光衍射法对黏粒含量存在“低估”现象, 而“高估”了粉粒含

量^[12-17], 这个差异可以通过建立适当的线性模型将激光法与吸管法测得结果进行转换加以解决。国内许多学者对典型土壤类型、泥砂等颗粒组成进行了两种方法转换模型的研究^[9, 18-19], 如杨金玲等^[18]对红壤、砖红壤、黑土、冲积土、棕壤、水稻土、塿土 7 个土类 265 个土样, 吴焕焕等^[19]对潮土、红壤、黑土等 5 个土类 20 个土样, 王大安等^[9]对大兴安岭黑土区 20 个河流泥砂样, 王彬等^[20]对黑土土类 36 个剖面 178 个分层土样做了两种方法的土壤颗粒组成转换, 取得较好的拟合效果。受黏土矿物的影响, 黏粒形状不规则, 多呈片状^[1], 对激光法的测定值影响更大。有研究者发现, 对两种测定结果进行回归分析, 砂粒与粉粒转换模型拟合效果理想, 黏粒拟合效果差, 认为对黏粒精度要求高的情况下不宜使用激光法^[20-21]。目前不同研究的转换模型之间有所差异, 主要原因是土壤的来源不同, 样本量少、粒径范围差异大; 或覆盖土壤类型少, 对模型的广泛适用有不确定性。

已有研究多集中于针对一种或几种典型土类进

收稿日期: 2024-01-23; 录用日期: 2024-03-23

基金项目: 科技基础资源调查专项(2021FY100404); 国家重点研发计划(2022YDF19011601-5)。

作者简介: 周雨顺(1998-), 硕士研究生, 主要从事土壤调查与发生演变相关研究。E-mail: zhouyushun609080@163.com。

通讯作者: 徐爱国, E-mail: xuaiguo@caas.ac.cn。

行两种方法多元回归模型的转换, 或对多种土类进行模型转换, 而对单一母质土壤颗粒组成两种方法的对比和模型研究却鲜有报道。本研究采集宁夏海原县黄土母质和山东滨州黄土状母质的耕层土壤, 采用激光法和吸管法分别测定其土壤颗粒组成, 对测定结果进行差异性比较, 研究两种方法对黄土和黄土状母质土壤颗粒组成的转换关系式, 探讨单一母质两种方法的转换精度, 为激光法对土壤质地测定的广泛应用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 土壤样区概况

本研究供试样品采自宁夏回族自治区海原县 (36°6′—37°4′ N, 105°9′—106°10′ E) 和山东滨州市滨城区 (37°12′—37°41′ N, 117°47′—118°10′ E), 海原县采样时间为 2018 年 7 月和 2019 年 4 月, 各样点间距 7 ~ 15 km; 滨城区采样时间为 2016 年 9 月和 2017 年 4 月, 各样点间距 0.2 ~ 3 km。宁夏回族自治区海原县地处黄土高原西北部, 属黄河中游黄土丘陵沟壑区。土壤类型有黄绵土、黑垆土、栗钙土和新积土等, 土地利用类型主要为草地、旱地, 仅北部与同心县交界处有部分黄河提灌区农田分布。采集海原县耕地和草地样品, 所采样品均为黄土母质, 样点分布在坡地和沟间谷地。山东省滨州市滨城区地处黄河下游的鲁北黄泛冲积平原, 采集该区韩墩引黄灌区土样, 所采样品均为黄土状母质, 土壤类型为潮土。本研究采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品, 宁夏回族自治区海原县 55 个, 山东省滨州市滨城区引黄灌区 41 个, 共计 96 个。所有样品经风干研磨后过 2 mm 筛备用。

1.2 颗粒组成的测定

本研究土壤质地分级采用国际制 (砂粒、粉粒和黏粒的粒径范围分别为 20 ~ 2000、2 ~ 20 和 < 2 μm)。土样前处理为用 1:4 的过氧化氢去除有机质, 0.2 mol · L⁻¹ 的盐酸洗去碳酸钙, 0.05 mol · L⁻¹

的盐酸溶液和蒸馏水分别淋洗过量的钙离子和氯离子。

1.2.1 吸管法

测试方法依据《土壤调查实验室分析方法》^[22]。

1.2.2 激光法

本研究采用超声分散法测定, 将静置好的样品放入功率 160 W、频率 25 Hz 的超声仪中分散 15 min, 采用 MasterSizer 3000 型号激光粒度仪测定土壤颗粒组成, 其测量范围为 0.01 ~ 3500 μm, 重复 3 次取平均值。

1.3 数据处理与分析

土壤颗粒组成数据整理采用 Excel 2023, 统计分析采用 SPSS 26.0, 绘图采用 Origin Pro 2021。

2 结果与分析

2.1 激光法与吸管法测定结果比较

2.1.1 黄土母质

以吸管法实测数据为真值, 55 个黄土母质样品两种方法测定值的比较结果见表 1。结果显示, 平均砂粒含量为激光法 53.6%, 吸管法 63.7%, 与吸管法相比, 激光法测定的砂粒含量平均偏低 10.1%, 二者绝对误差为 -19.9% ~ 4.1%; 平均粉粒含量为激光法 41.7%、吸管法 22.9%, 与吸管法相比, 激光法测定的砂粒含量平均偏高 18.8%, 二者绝对误差为 1.3% ~ 26.6%; 平均黏粒含量为激光法 4.8%、吸管法 13.4%, 与吸管法相比, 激光法测定的砂粒含量平均偏低 8.6%, 二者绝对误差为 -15.7% ~ -3.8%。以平均相对误差的绝对值来衡量激光法测定结果的偏离程度, 则偏离程度由大到小依次为粉粒含量 (87.5%) > 黏粒含量 (63.0%) > 砂粒含量 (15.7%)。综上所述, 与吸管法相比, 激光法对黏粒的测定值会偏低, 而对粉粒的测定值会偏高, 导致土壤质地相对吸管法总体偏向粉砂方向, 这与其他研究结果一致^[20]。

表 1 黄土母质激光法与吸管法测定土壤颗粒组成的比较

(%)

测定方式	砂粒 (20 ~ 2000 μm)			粉粒 (2 ~ 20 μm)			黏粒 (<2 μm)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
激光法	70.5	38.9	53.6	55.2	26.3	41.7	7.0	3.2	4.8
吸管法	77.8	46.4	63.7	34.1	13.8	22.9	21.6	8.1	13.4
绝对误差	4.1	-19.9	-10.1	26.6	1.3	18.8	-3.8	-15.7	-8.6
相对误差	6.1	-27.3	-15.7	169.1	5.3	87.5	-47.3	-76.3	-63.0

注: 绝对误差 = 激光法测定结果 - 吸管法测定结果; 相对误差 = 绝对误差 / 吸管法测定结果 × 100。下同。

因两种方法测定颗粒组成的差异, 所对应的土壤质地也有所不同 (图1)。本文55个黄土母质土样, 吸管法测定质地为黏壤土 (8个)、壤土 (1个)、砂质黏壤土 (5个) 和砂质壤土 (41个); 激光法测定质地为粉砂质壤土 (15个)、壤土 (16个) 和砂质壤土 (24个), 其中粉砂质壤

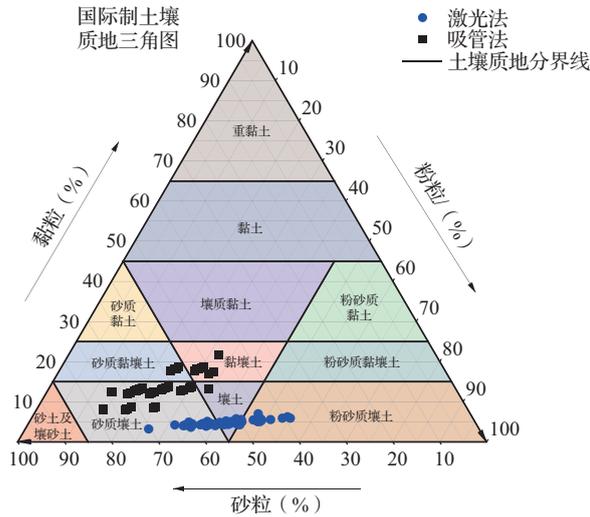


图1 黄土母质激光法与吸管法土壤质地的比较

土对应吸管法的黏壤土 (6个)、壤土 (1个)、砂质黏壤土 (3个) 和砂质壤土 (5个), 而壤土对应吸管法的黏壤土 (12个)、砂质黏壤土 (2个) 和砂质壤土 (2个), 其他质地类型与吸管法相同。

2.1.2 黄土状母质

以吸管法实测数据为真值, 41个黄土状母质样品两种方法测定值的比较结果见表2。结果显示, 平均砂粒含量为激光法47.3%、吸管法51.4%, 与吸管法相比, 激光法测定的砂粒含量平均偏低4.1%, 二者绝对误差为-22.9%~9.9%; 平均粉粒含量为激光法48.0%、吸管法29.2%, 与吸管法相比, 激光法测定的粉粒含量平均偏高18.8%, 二者绝对误差为1.4%~34.0%; 平均黏粒含量为激光法4.7%、吸管法19.5%, 与吸管法相比, 激光法测定的黏粒含量平均偏低14.8%, 二者绝对误差为-27.8%~-1.0%。以平均相对误差的绝对值来衡量激光法测定结果的偏离程度, 则偏离程度由大到小依次为黏粒 (73.8%) > 粉粒 (66.5%) > 砂粒 (7.2%)。这与其他研究结果一致, 即激光法测定的黏粒含量低于吸管法, 而粉粒含量高于吸管法^[18]。

表2 黄土状母质激光法与吸管法测定土壤颗粒组成的比较 (%)

测定方法	砂粒 (20 ~ 2000 μm)			粉粒 (2 ~ 20 μm)			黏粒 (<2 μm)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
激光法	86.2	26.5	47.3	67.6	11.6	48.0	7.7	2.2	4.7
吸管法	89.8	26.7	51.4	40.6	7.0	29.2	34.3	3.2	19.5
绝对误差	9.9	-22.9	-4.1	34.0	1.4	18.8	-1.0	-27.8	-14.8
相对误差	18.8	-43.7	-7.2	113.5	4.5	66.5	-32.5	-82.6	-73.8

因两种方法测定颗粒组成的差异, 所对应的土壤质地也有所不同 (图2)。本文41个黄土状母质土壤, 吸管法测定土壤质地为壤质黏土 (6个)、黏壤土 (21个)、砂土 (1个)、砂质壤土 (9个) 和砂质黏壤土 (4个); 激光法测定质地为粉砂质壤土 (26个)、砂土 (1个)、壤土 (5个) 和砂质壤土 (9个)。总体来看, 激光法测定黄土状母质土壤质地相对吸管法也偏向粉砂方向。

2.2 激光法与吸管法转换模型的建立

2.2.1 应用差减法校正转换模型

为减小转换模型在实际使用中的转换偏差, 本研究尝试建立空间直角坐标系, 将测定的砂粒、

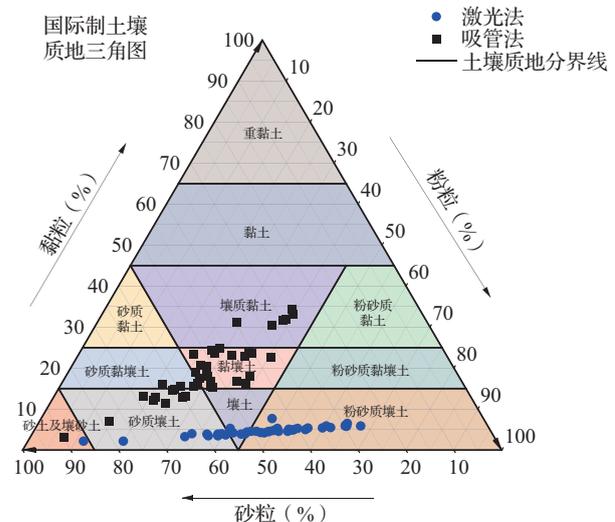


图2 黄土状母质激光法与吸管法土壤质地的比较

粉粒和黏粒含量分别转换为点位在 x、y 和 z 轴上的投影距离，对各组激光法测定数据点位和吸管法测定数据点位进行空间距离计算，将激光法与吸管法测定各粒级数据投影距离差值的绝对值与空间距离占比的平均值作为各粒级影响整体误差的贡献值，贡献值越大表示该粒级对整体误差的影响越大。取贡献度最大的粒级进行差减法以校正转换模型。各粒级对整体误差的贡献度通过以下公式得到，数据分析结果见表 3。

$$L_i = \sqrt{(X_{ai} - X_{bi})^2 + (Y_{ai} - Y_{bi})^2 + (Z_{ai} - Z_{bi})^2} \quad (1)$$

$$C_{砂} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|X_{ai} - X_{bi}|}{(X_{ai} + X_{bi})/2} / L_i}{n} \quad (2)$$

$$C_{粉} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Y_{ai} - Y_{bi}|}{(Y_{ai} + Y_{bi})/2} / L_i}{n} \quad (3)$$

$$C_{黏} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Z_{ai} - Z_{bi}|}{(Z_{ai} + Z_{bi})/2} / L_i}{n} \quad (4)$$

式中， X_{ai} 、 Y_{ai} 、 Z_{ai} 分别为激光法第 i 组数据砂粒、粉粒、黏粒含量在空间直角坐标系上转换的投影距离； X_{bi} 、 Y_{bi} 、 Z_{bi} 分别为吸管法第 i 组数据砂粒、粉粒、黏粒含量在空间直角坐标系上转换的投影距离； L_i 表示第 i 组激光法数据点位到第 i 组吸管法数据点位的空间距离； $C_{砂}$ 、 $C_{粉}$ 、 $C_{黏}$ 分别为两种方法测定的砂粒、粉粒、黏粒含量的平均贡献度，即各粒级对整体误差的贡献度； n 表示土样数量。

表 3 不同母质各粒级对整体误差的贡献度

母质	土样数量 (个)	砂粒对整体误差的贡献度 (%)	粉粒对整体误差的贡献度 (%)	黏粒对整体误差的贡献度 (%)
黄土母质	55	0.72	2.50	4.22
黄土状母质	41	0.46	2.11	5.27
混合母质	96	0.61	2.34	4.66

2.2.2 黄土母质

两种测定方法对砂粒、粉粒和黏粒含量的测定结果均呈极显著线性正相关。对测定结果进行线性拟合，得到转换模型如下：

$$y_{a砂} = 0.9469x_{a砂} + 13.0174 \quad (r=0.798^{**}, P<0.01) \\ n=55 \quad 0 \leq x_{a砂} \leq 91.860 \quad (5)$$

$$y_{a粉} = 0.624x_{a粉} - 3.1189 \quad (r=0.712^{**}, P<0.01) \\ n=55 \quad 4.998 \leq x_{a粉} \leq 100 \quad (6)$$

$$y_{a黏} = 3.3465x_{a黏} - 2.525 \quad (r=0.685^{**}, P<0.01) \\ n=55 \quad 0.755 \leq x_{a黏} \leq 30.636 \quad (7)$$

由表 3 可以看出，黄土母质黏粒对整体误差影响最大。因此，激光法砂粒、粉粒含量转换为吸管法相应含量分别采用式 (5)(6) 计算获得，黏粒含量采用差减法获得，表达式如下：

$$y'_{a黏} = 1 - y_{a砂} - y_{a粉} \quad (8)$$

以上式中， $x_{a砂}$ 、 $x_{a粉}$ 和 $x_{a黏}$ 分别为激光法测定的黄土母质砂粒、粉粒和黏粒含量， $y_{a砂}$ 、 $y_{a粉}$ 和 $y_{a黏}$ 分别为经模型转换得到的黄土母质砂粒、粉粒和黏粒含量， $y'_{a黏}$ 为经模型转换得到的黄土母质黏粒含量校正值。

2.2.3 黄土状母质

两种测定方法对砂粒、粉粒和黏粒含量的测定结果均呈极显著线性正相关。对测定结果进行线性拟合，得到转换模型如下：

$$y_{b砂} = 0.9405x_{b砂} + 6.8964 \quad (r=0.897^{**}, P<0.01) \\ n=41 \quad 0 \leq x_{b砂} \leq 99.994 \quad (9)$$

$$y_{b粉} = 0.4863x_{b粉} - 5.8224 \quad (r=0.792^{**}, P<0.01) \\ n=41 \quad 0 \leq x_{b粉} \leq 100 \quad (10)$$

$$y_{b黏} = 5.4535x_{b黏} - 6.1265 \quad (r=0.822^{**}, P<0.01) \\ n=41 \quad 1.123 \leq x_{b黏} \leq 100 \quad (11)$$

由表 3 可以看出，黄土状母质黏粒对整体误差影响最大。因此，本研究黄土状母质激光法砂粒、粉粒含量转换为吸管法相应含量分别采用式 (9) (10) 计算获得，黏粒含量同样采用差减法获得，表达式如下：

$$y'_{b黏} = 1 - y_{b砂} - y_{b粉} \quad (12)$$

以上式中， $x_{b砂}$ 、 $x_{b粉}$ 和 $x_{b黏}$ 分别为激光法测定的黄土状母质砂粒、粉粒和黏粒含量， $y_{b砂}$ 、 $y_{b粉}$ 和 $y_{b黏}$ 分别为经模型转换得到的黄土状母质砂粒、粉粒和黏粒含量， $y'_{b黏}$ 为经模型转换得到的黄土状母质黏粒

含量校正值。

2.2.4 混合母质

将 96 个样品合并分析, 两种测定方法对砂粒、粉粒和黏粒含量的测定结果均呈极显著线性正相关。对测定结果进行线性拟合, 得到转换模型如下:

$$y_{c砂} = 1.0395x_{c砂} + 5.5622 \quad (r=0.867^{**}, P<0.01)$$

$$n=96 \quad 0 \leq x_{c砂} \leq 90.849 \quad (13)$$

$$y_{c粉} = 0.5743x_{c粉} + 0.0804 \quad (r=0.785^{**}, P<0.01)$$

$$n=96 \quad 0 \leq x_{c粉} \leq 100 \quad (14)$$

$$y_{c黏} = 4.5981x_{c黏} - 5.7634 \quad (r=0.658^{**}, P<0.01)$$

$$n=96 \quad 1.253 \leq x_{c黏} \leq 100 \quad (15)$$

由表 3 可以看出, 混合母质黏粒对整体误差影响最大。因此, 激光法砂粒、粉粒含量转换为吸管法相应含量分别采用式 (13)(14) 计算获得, 黏粒含量同样采用差减法获得, 表达式如下:

$$y'_{c黏} = 1 - y_{c砂} - y_{c粉} \quad (16)$$

以上式中, $x_{c砂}$ 、 $x_{c粉}$ 和 $x_{c黏}$ 分别为激光法测定的混合母质砂粒、粉粒和黏粒含量, $y_{c砂}$ 、 $y_{c粉}$ 和 $y_{c黏}$ 分别为经模型转换得到的混合母质砂粒、粉粒和黏粒含量, $y'_{c黏}$ 为经模型转换得到的混合母质黏粒含量校正值。

2.3 转换模型评价

2.3.1 黄土母质

由表 4 可以看出, 对于黄土母质的 55 个土样, 激光法经模型转换后, 4 种土壤质地共有 43 个土样与吸管法结果一致, 其中砂质壤土 37 个土样一致, 砂质黏壤土和黏壤土各 3 个, 判定土壤质地总一致率达 78%。另有 3 个土样转换后质地与吸管法相差 1 级 (国际制 12 个质地分级, 相邻两级为相差 1 级, 下同), 说明黄土母质模型土壤质地转换效果较好。

表 4 黄土母质吸管法质地与激光法转换

质地	吸管法质地的比较 (个)			
	吸管法质地	激光法转换后质地	激光法转换后质地与吸管法质地相同	激光法转换后质地与吸管法质地相差 1 级
砂质壤土	41	43	37	0
壤土	1	0	0	1
砂质黏壤土	5	8	3	0
黏壤土	8	4	3	2
总计	55	55	43	3

2.3.2 黄土状母质

由表 5 可以看出, 对于黄土状母质的 41 个土样, 激光法经模型转换后, 5 种土壤质地共有 32 个土样与吸管法结果一致。5 种土壤质地中, 砂土 1 个、砂质壤土 6 个、砂质黏壤土 2 个、黏壤土 17 个、壤质黏土 6 个土样一致, 判定土壤质地一致率也达 78%。另有 4 个土样转换后质地与吸管法相差 1 级, 说明黄土状母质模型同样达到较好的转换效果。

表 5 黄土状母质吸管法质地与激光法转换

质地	吸管法质地的比较 (个)			
	吸管法质地	激光法转换后质地	激光法转换后质地与吸管法质地相同	激光法转换后质地与吸管法质地相差 1 级
砂土	1	1	1	0
砂质壤土	9	8	6	0
砂质黏壤土	4	5	2	1
黏壤土	21	19	17	3
壤质黏土	6	8	6	0
总计	41	41	32	4

2.4 不同母质转换模型对比

2.4.1 两种母质转换模型的对比

由表 6 可以发现, 对黄土母质激光法数据采用黄土状母质转换模型, 转换结果与吸管法土壤质地的一致率仅由 44% 提高至 47%; 对黄土状母质激光法数据采用黄土母质转换模型, 转换结果与黄土状母质吸管法土壤质地的一致率仅由 20% 提高至 49%。本研究的数据分析显示, 采用另一种母质转换模型的转换结果, 对吸管法土壤质地判定的一致率低于 50%, 而采用相同母质转换模型, 对吸管法土壤质地判定一致率均达 78%。因此, 根据相同母质转换模型进行转换的质地一致率更高。

2.4.2 混合母质转换模型与相同母质转换模型的对比

采用本研究与文献 [19] 供试土壤母质相同的转换模型, 对文献 [19] 中 6 个激光法颗粒组成数据 (国际制) 进行转换, 其中黏粒含量采用差减法获得。结果 (表 7) 表明, 5 个黄土状母质土样经本研究相同母质的模型 [公式 (9)(10)(12)] 转换后质地与吸管法相同; 而经本研究黄土及黄土状混合母质转换模型 [公式 (13)(14)(16)] 转换后, 3 个土样与吸管法质地相同。可见, 相同母质转换模型比混合模型转换的质地一致率更高。

表 6 相同母质与不同母质模型转换质地一致率的比较

母质	土样 (个)	吸管法质地与激光法质地 一致率 (%)	模型	吸管法质地与激光法转换后质地 一致率 (%)
黄土母质	55	44	黄土母质转换模型	78
			黄土状母质转换模型	47
黄土状母质	41	20	黄土状母质转换模型	78
			黄土母质转换模型	49

表 7 本研究相同母质与混合母质模型对文献 [19] 激光法颗粒组成转换质地与吸管法的比较

土样	母质	转换前质地	吸管法质地	模型	转换后质地
郑州潮土	黄土状母质	黏土	重黏土	黄土状母质转换模型	重黏土
				混合母质转换模型	重黏土
廊坊潮土	黄土状母质	黏土	重黏土	黄土状母质转换模型	重黏土
				混合母质转换模型	重黏土
徐州潮土	黄土状母质	黏土	黏土	黄土状母质转换模型	黏土
				混合母质转换模型	重黏土
德州潮土	黄土状母质	壤土	黏壤土	黄土状母质转换模型	黏壤土
				混合母质转换模型	砂质黏壤土
辛集潮土	黄土状母质	黏土	黏土	黄土状母质转换模型	黏土
				混合母质转换模型	黏土
杨凌塬土	黄土母质	粉砂质壤土	粉砂质壤土	黄土母质转换模型	壤质黏土
				混合母质转换模型	黏土

采用前人研究的多种母质转换模型进行质地转换, 转换一致率低于本研究相同母质转换模型。采用杨金玲等^[18]的转换模型, 将本研究 96 个土样激光法颗粒组成进行转换, 其中黏粒含量采用差减法获得。转换后质地与吸管法质地对比结果见表 8。黄土母质 55 个土样中有 32 个土样转换后与吸管法质地一致, 一致率为 58%; 而黄土状母质 41 个土样中有 22 个土样转换后与吸管法质地一

致, 一致率也仅为 54%, 均低于本研究相同母质转换模型转换一致率 78%。其原因一方面, 该研究基于全国 7 个土类 (砖红壤、红壤、黑土、冲积土、棕壤、水稻土和塬土), 是多种母质土样的转换模型; 另一方面, 其土壤颗粒组成分级为美国制, 而本研究为国际制, 也对转换结果有一定影响。因此, 选用相同母质、相同质地分级制的转换模型有助于提高转换土壤质地的一致率。

表 8 本研究吸管法质地与文献 [18] 混合母质模型转换本研究激光法颗粒组成质地的比较 (个)

母质	质地	吸管法质地	激光法转换后质地	激光法转换后质地与 吸管法质地相同	激光法转换后质地与 吸管法质地相差 1 级
黄土母质	砂质壤土	41	25	25	0
	黏壤土	8	17	6	4
	壤土	1	13	1	10
	砂质黏壤土	5	0	0	0
	总计		55	55	32

续表

母质	质地	吸管法质地	激光法转换后质地	激光法转换后质地与 吸管法质地相同	激光法转换后质地与 吸管法质地相差 1 级
黄土状母质	粉砂质黏壤土	8	0	0	6
	黏壤土	14	21	13	0
	壤土	7	0	0	2
	砂质壤土	12	10	9	0
	壤质黏土	0	6	0	0
	砂质黏壤土	0	4	0	0
	总计		41	41	22

3 讨论

本研究激光法黏粒含量转换为吸管法黏粒含量采用差减法获得。因黏粒多为片状，激光法将部分黏粒测定为粉粒。因此，相比吸管法，激光法会“低估”黏粒含量而“高估”粉粒含量^[12-17]，本研究也得到相似的结果，同时，本研究对各粒级影响整体误差的贡献值分析，也证明了无论是黄土还是黄土状母质，均表现为黏粒的影响最大。本研究激光法与吸管法黏粒含量差异较大，这与杨金玲等^[18]、刘雪梅等^[23]研究结果类似。Kowalenko 等^[24]利用激光法的研究表明，颗粒数量随粒径的减少呈几何级数增加，这也侧面解释了激光法测定粒径较小的颗粒含量与吸管法相比偏离较大的现象。

选用相同母质、相同质地分级制的转换模型，可提高两种方法转换土壤质地的一致率。对黄土及黄土状母质，本研究分别采用相同母质转换模型将激光法数据转换后，判定土壤质地同吸管法相比一致率均达 78%。将吴焕焕等^[19]的黄土状母质测试数据利用本研究相同母质转换模型转换后，5 个黄土状母质土样经本研究相同母质的模型转换后质地与吸管法相同，判定一致率与本研究结果接近。本研究将刘雪梅等^[23]的河北曲周、沧州 2 个潮土激光法数据以黄土状母质代入同母质转换模型后，因其测试数据接近相邻质地分级，则部分转换后质地与吸管法质地级别接近，而非完全一致，这一结果与杨艳芳等^[25]的研究结果一致。采用王彬等^[20]基于 36 个剖面的 178 个土样的混合母质转换模型（黏粒采用差减法）对本研究 96 个黄土状母质土样数据进行转换，有 76 个土样粉粒和黏粒模型计算出现负值或超过 100%，其余 20 个土样激

光法数据经模型转换后，判定土壤质地同吸管法相比，有 10 个土样质地等级相同，8 个质地等级相差 1 级，转换一致率仅 10%。采用吴焕焕等^[19]基于 20 个土样的混合母质转换模型（粉粒采用差减法）对本研究 96 个土样数据进行转换，有 48 个土样黏粒模型计算出现负值，其余 48 个土样激光法数据经模型转换后，判定土壤质地同吸管法相比，有 12 个土样质地等级相同，8 个质地等级相差 1 级，转换一致率也仅有 13%。采用杨金玲等^[18]基于 265 个土样的混合母质转换模型（黏粒采用差减法）对本研究 96 个黄土母质土样进行转换，判定土壤质地同吸管法相比，有 54 个土样质地等级相同，22 个质地等级相差 1 级，转换一致率为 58%。采用杨金玲等^[18]和吴焕焕等^[19]的混合母质转换模型转换效果均优于王彬等^[20]的混合母质转换模型，这与吴焕焕等^[19]和杨金玲等^[18]的土样源于多地土壤类型和涉及更多母质有关，而杨金玲等^[18]的混合母质转换模型基于的样本量更多，因而判定质地一致率更高。综上所述可以看出，混合母质转换模型的转换一致率高，与源于多地土壤、涉及多种母质类型、样本量多有关。基于更广的地域、大样本量的转换模型更有助于提高转换准确率。

王彬等^[20]采用东北黑土区宾州河流域黄土状母质的 36 个土壤剖面、不同层次的 178 个土样，将激光法测定数据进行模型转换后，判定土壤质地同吸管法相比一致率为 83%，高于本研究的 78%，这可能与采样范围和土样层次有关。本研究为县域范围采集耕层样，范围大；而王彬等^[20]的研究在几个乡镇内采集，并且每个剖面平均有 5 层土样，土样的物理性质相近，基于小范围内的大样本量，

因此转换后质地一致率更高。李学林等^[10]研究认为,沿垂直剖面采集的系列样品并不适合于讨论两种方法之间的相关性,质地多样化的表层土壤样品组合更适合讨论该问题,本研究的表层土壤样品质地多样,质地间差异相对较小,可通过模型转换提高激光法测定质地的精度。

4 结论

(1) 应用激光法和吸管法测定黄土及黄土状母质土壤颗粒组成,与吸管法相比,激光法对黏粒的测定值明显会偏低,而对粉粒的测定值明显会偏高,导致土壤质地相对吸管法总体偏向粉砂方向。

(2) 根据建立的空间直角坐标系计算得出的黄土母质、黄土状母质、混合母质各粒级影响整体误差的贡献值,均为黏粒最大。因此,黄土母质、黄土状母质和混合母质均采用黏粒进行差减法校正转换模型,以减小转换偏差。

(3) 两种方法测定的黄土及黄土状母质的砂粒、粉粒和黏粒含量均表现为极显著相关关系。其中对黄土母质,两种方法测定砂粒、粉粒和黏粒含量的相关系数分别为 0.7980、0.7120、0.6850;对黄土状母质,两种方法测定砂粒、粉粒和黏粒含量的相关系数分别为 0.8970、0.7919、0.8223。黄土状母质两种方法测定各粒级含量的相关性更高。

(4) 选用相同母质相同质地分级制的转换模型,转换一致性更高。黄土母质激光法测定数据采用黄土状母质转换模型进行转换,判定土壤质地同吸管法相比一致率为 44%;黄土状母质激光法测定数据采用黄土母质转换模型进行转换,判定土壤质地同吸管法相比一致率为 20%;黄土母质和黄土状母质激光法测定数据经自身相同母质的转换模型转换后,其判定土壤质地同吸管法相比一致率均为 78%。

致谢:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所姜赛平、朱国龙、喻科凡,河北农业大学崔丛丛参与了土样采集工作,在此一并致谢。

参考文献:

[1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:116-118.
 [2] 黄成敏,龚子同. 土壤发生和发育过程定量研究进展[J]. 土壤,2000,32(3):145-150,166.
 [3] 段世航,崔若然,江荣风,等. 激光衍射法测定土壤颗粒组成分布的研究进展[J]. 土壤,2020,52(2):247-253.
 [4] Di Stefano C, Ferro V, Mirabile S. Comparison between grain-

size analyses using laser diffraction and sedimentation methods [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106 (2): 205-215.

- [5] Syvitski J P. Principles, methods, and application of particle size analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press Cambridge, 1991.
- [6] 李慧茹, 刘博, 王汝幸, 等. 土壤粒度组成分析方法对比[J]. 中国沙漠, 2018, 38 (3): 619-627.
- [7] Ryzak M, Bieganowski A. Determination of particle size distribution of soil using laser diffraction-comparison with areometric method [J]. International Agrophysics, 2010, 24 (2): 177-181.
- [8] Yudin A V, Fomin D S, Valdes-korovkin I A, et al. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method [J]. Eurasian Soil Science, 2020, 53: 1579-1595.
- [9] 王大安, 刘刚, 王翔鹰, 等. 用激光法和吸管法测定东北黑土区侵蚀泥沙颗粒组成的差异分析[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14 (1): 114-122.
- [10] 李学林, 李福春, 陈国岩, 等. 用沉降法和激光法测定土壤粒度的对比研究[J]. 土壤, 2011, 43 (1): 130-134.
- [11] 白雪, 杨扬, 黄婷婷, 等. 激光衍射法与湿筛-吸管法测定中国3种典型土壤颗粒组成分布的差异分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28 (4): 84-90.
- [12] Eshel G, Levy G, Mingelgrin U, et al. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (3): 736-743.
- [13] Muggler C C, Pape T, Buurman P. Laser grain-size determination in, soil genetic studies 2. clay content, clay formation, and aggregation in some brazilian, Oxisols [J]. Soil Science, 1997, 162 (3): 219-228.
- [14] Stevenson A, Hartemink A E, Zhang Y. Measuring sand content using sedimentation, spectroscopy, and laser diffraction [J]. Geoderma, 2023, 429: 116-268.
- [15] Mako A, Szabo B, Rajkai K, et al. Evaluation of soil texture determination using soil fraction data resulting from laser diffraction method [J]. International Agrophysics, 2019, 33 (4): 445-454.
- [16] Loizeau J L, Arbouille D, Santiago S, et al. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments [J]. Sedimentology, 2010, 41 (2): 353-361.
- [17] Konert M, Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction [J]. Sedimentology, 1997, 44 (3): 523-535.
- [18] 杨金玲, 张甘霖, 李德成, 等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J]. 土壤学报, 2009, 46 (5): 772-780.
- [19] 吴焕焕, 吕家珑, 段英华, 等. 激光衍射法测定中国典型土壤颗粒分布的模型建立与验证[J]. 中国农业科学, 2013, 46 (20): 4293-4300.
- [20] 王彬, 郑粉莉, 安娟, 等. 激光衍射法与吸管法对东北黑土区土壤颗粒组成分布测定的差异性研究[J]. 水土保持通



- 报, 2009, 29 (2): 134-139, 143.
- [21] Pieri L, Bittelli M, Pisa P R. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils [J]. *Geoderma*, 2006, 135: 118-132.
- [22] 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: 8-16.
- [23] 刘雪梅, 黄元仿. 应用激光粒度仪分析土壤机械组成的实验研究 [J]. *土壤通报*, 2005, 36 (4): 579-582.
- [24] Kowalenko C G, Babuin D. Inherent factors limiting the use of laser diffraction for determining particle size distributions of soil and related samples [J]. *Geoderma*, 2013, 193-194: 22-28.
- [25] 杨艳芳, 李德成, 杨金玲, 等. 激光衍射法和吸管法分析黏性富铁土颗粒粒径分布的比较 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (3): 405-412.

Investigation of a conversion model for the determination of the particle composition of loess and loess-like parent matrices by laser and pipette methods

ZHOU Yu-shun¹, CUI Shu-fang², ZHANG Huai-zhi¹, JI Hong-jie¹, SHEN Zhe¹, LI Jia-yu³, XU Ai-guo^{1*} (1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Land in Northern China, Beijing 100081; 2. Handun Yellow Irrigation Management Bureau of Binzhou City, Shandong Province, Binzhou Shandong 256621; 3. Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: In order to explore the differences between the laser method and the pipette method on the conversion of soil particle size distribution (PSD) of a single parent material, and to improve the conversion accuracy of the two methods for determining soil PSD, 55 soil samples of 0-20 cm of loess-like parent material from Haiyuan County of Ningxia Province and 41 soil samples of 0-20 cm of loess-like parent material from Binzhou of Shandong Province were collected, soil PSD was determined by using the two methods to establish the model of the conversion relationship, and it was verified by using the data from the literature. The results showed that: (1) Both methods showed highly significant correlations between the sand, powder and clay content of loess and loess-like matrices, and a conversion model was developed for particle size conversion. The correlation coefficients of the two methods for the determination of sand, powder and clay content were 0.7980, 0.7120 and 0.6850 for the loess matrix and 0.8970, 0.7919 and 0.8223 for the loess-like matrix, respectively, and the correlation between the two methods for the determination of the three particle sizes of the loess-like matrices was higher. (2) According to the established spatial right-angled coordinate system, the calculated contribution values of each grain level of loess matrices, loess-like matrices and mixed matrices affecting the overall error were all the largest for clay grains. The loess matrices, loess-like matrices and mixed matrices conversion models all used clay grains for the difference subtraction method in order to reduce the conversion bias. According to the contribution value of each grain level to the overall error obtained from the calculation, selecting the grain level with the largest contribution value for the difference subtraction method could improve the conversion accuracy. (3) Using a conversion relationship model for the PSD of the same mother materials, the consistency rate between the laser method and the pipette method texture was 78% for both parent materials; and another parent material conversion model was used for the conversion, with a consistency rate of 44% for loess parent material texture and 20% for loess-like parent material. By using the same parent material conversion model, the conversion accuracy of laser method to straw method texture can be improved. The laser method could be used as an effective tool for rapid determination of soil texture based on the identical mother material transformation relationship modelling.

Key words: particle size distribution; loess parent material; loess-like parent material; laser particle size analyzer; pipette method