

博斯腾湖西岸湖滨绿洲土壤含盐量高光谱估算*

赵慧, 李新国, 靳万贵, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 牛芳鹏

(新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆乌鲁木齐 830054)

摘要: 以博斯腾湖西岸湖滨绿洲土壤盐分及其对应的高光谱数据为研究对象, 对原始光谱反射率 (R) 进行均方根 (\sqrt{R})、对数 ($\lg R$)、倒数 ($1/R$)、对数倒数 ($1/\lg R$) 变换, 引入分数阶微分对变换的光谱反射率进行 0~2 内的微分预处理, 通过显著性检验优选特征波段, 并利用特征波段进行偏最小二乘回归的建模和验证。结果表明: 1) 通过显著性检验较多的特征波段是: $1/R$ 为 691 个波段, 比通过原始波段多 226 个波段; 且随着阶数的增加, 在各阶数中通过显著性检验的波段数量呈先增加后减少的趋势; 通过数量较多的特征波段是 $1/R$ 的 0.4 阶和 0.6 阶, 分别为 145、150; 2) 原始光谱反射率的相关性极大值绝对值是: 2 阶为 0.53, 其他 4 种数学变换的相关性极大值绝对值比 R 高 0.11~0.16, 特征波段主要集中在 600~1 000 nm 和 2 020~2 330 nm; 3) 在原始光谱反射率及其变换值的各分数阶微分利用偏最小二乘回归建模中, $1/\lg R$ 的 0.2 阶建立的模型为最佳模型, $R^2_c=0.78$, $RMSE_c=1.56$, $R^2_v=0.63$, $RMSE_v=1.44$ 。

关键词: 分数阶微分; 土壤含盐量; 光谱变换; 偏最小二乘回归; 高光谱估算

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 04-0056-08

Hyperspectral estimation of soil salt content in lake oasis on the west bank of Bosten lake

ZHAO Hui, LI Xinguo, JIN Wangui, Mamattursun·Eziz, NIU Fangpeng

(College of Geographic Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University / Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Taking the soil salinity and corresponding hyperspectral data of the lakeside oasis on the west bank of the Bosten Lake as the research object, the root mean square R , logarithmic $\lg R$, reciprocal $1/R$, reciprocal $1/\lg R$ were used to transform the original spectral reflectance. The fractional differentiation was introduced to perform differential preprocessing within 0-2 on the transformed spectral reflectance. The characteristic band through significance test was used to model and verify partial least squares regression. The results show that: 1) The characteristic bands that passed the significance test were mostly $1/R$ of 691 bands, which was 226 more bands than the original band R . With increasing orders, the number of bands that passed the significance test in each order showed a trend of increasing first and then decreasing. The characteristic bands that passed more were 0.4 and 0.6 orders of $1/R$, which were 145 and 150, respectively. 2) The absolute value of the correlation maximum value of the original spectrum R was 2nd order 0.53. The absolute value of the correlation maximum value of the other four mathe-

* 收稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41661047, 41561073)

作者简介: 赵慧 (1994 年生), 女; 研究方向: 干旱区土壤资源变化及其遥感应用; E-mail: ziyuhe528@163.com

通信作者: 李新国 (1971 年生), 男; 研究方向: 干旱区土壤资源变化及其遥感应用; E-mail: onlinelxg@sina.com

matical transformations was 0.11-0.16, higher than R . The characteristic bands were mainly concentrated at 600-1 000 nm and 2 020-2 330 nm. 3) The fractional differential of the original spectral R , the root mean square R , the logarithm $\lg R$, the reciprocal $1/R$, and the logarithm reciprocal $1/\lg R$ was modeled by partial least squares regression. The model established at 0.2th order of $1/\lg R$ was the best one, with $R_c^2=0.78$, $RMSE_c=1.56$, $R_v^2=0.63$, $RMSE_v=1.44$.

Key words: fractional differential; soil salinity; spectral transformation; partial least squares regression methods; hyperspectral estimation

土壤盐分在土壤中的含量决定了土壤盐渍化等级, 土壤含盐量过高, 会危害农作物减产或绝收、影响植被生长并间接造成生态环境恶化^[1-3]。快速、准确地获取土壤盐分信息在土壤开发利用和土壤盐渍化防治等方面具有重要的意义^[4]。传统土壤含盐量的测定需要耗费时间, 且步骤繁琐, 对大面积土壤盐分进行持续性和稳定性的动态检测比较困难, 而高光谱遥感技术的出现成为估算土壤盐分强有力的工具, 可以充分挖掘光谱信息和构建高精度的模型^[5-7]。光谱一、二阶微分在进行土壤含盐量光谱建模中是一种常用的光谱数据预处理方法^[8-9]。但一阶微分和二阶微分的光谱曲线中间相差较多, 导致一些中间的光谱信息会被遗漏掉, 而分数阶微分可以挖掘中间的光谱信息, 能够使光谱信息被充分利用, 且分数阶微分在模式识别和建模等方面被广泛应用^[10-12]。亚森江·喀哈尔等^[13]采用分数阶微分优化光谱指数的方式, 认为1.6阶微分波段预测效果最佳, 精度达到0.84。吾木提·艾山江等^[14]通过高光谱估算含水量, 分析到分数阶微分后的模型能够提高稳定性和预测能力。蒋明等^[15]提出在不同采样间隔下分数阶微分对土壤重金属的影响。分数阶微分能够细化相关系数的趋势, 丰富光谱数据的处理方式^[16-18]。分数阶微分在高光谱预处理中, 能够增加特征波段的数量, 但对于有效地提高相关性还处于弱势, 因此本文将分数阶微分与传统的数学光谱变换相结合, 以提高相关性。基于此, 以博斯腾湖西岸湖滨绿洲的土壤含盐量为研究对象, 将分数阶微分引入高光谱数据预处理中, 且对原始光谱曲线进行数学变化的基础上, 利用偏最小二乘回归建模, 比较原始光谱曲线及4种光谱变换的分数阶微分建模精度。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

博斯腾湖西岸湖滨绿洲行政区划隶属于新疆

博湖县, 位于新疆焉耆盆地东南部, 地理位置介于 $86^{\circ}15' \sim 86^{\circ}55'E$, $41^{\circ}45' \sim 42^{\circ}10'N$ 。其是典型的人工绿洲和自然绿洲混合的山前湖泊绿洲, 面积为 $1\ 360\text{ km}^2$ 。年平均气温 $8.2 \sim 11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无霜期 $175.8 \sim 211.3\text{ d}$, 年蒸发量 $1\ 880.0 \sim 2\ 785.8\text{ mm}$, 年降水量 $47.7 \sim 68.1\text{ mm}$, 蒸降比高达 $40:1$ 。研究区内土壤类型主要有草甸土、沼泽地、灌耕潮土、盐土、风沙土、棕漠土等, 地下水埋深 $1.0 \sim 2.5\text{ m}$, 矿化度为 $0.1 \sim 10\text{ g/L}$ ^[19]。植物类型有芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、杨树(*Populus*), 农作物有辣椒地(*Capsicum field*)、油葵地(oil sunflower field), 以及裸地(Bare field)等。由于独特的地理位置, 且蒸发强烈, 降水稀少等气候条件, 活跃的地表水以及地下水补给, 富含盐分的母质环境等, 平均土壤盐分含量为 2.84 g/kg ^[20]。

1.2 土壤样品采集及测定

根据研究区土壤类型的现状, 结合研究区的土壤盐分状况, 采用GPS定位技术, 使采样点尽可能遍及研究区范围内的主要土地利用类型, 考虑采样点的水文地貌条件、植被覆盖类型以及土壤盐渍化程度等因素, 每个样本点范围分 $0 \sim 10\text{ cm}$ 深度进行, 共采集37个样点(图1)。将土壤样品带回实验室经过前期处理自然风干后除去枯枝、残叶等杂质, 磨碎过 2 mm 网筛后, 分装自封袋中用于后续土壤含盐量测定和光谱采集。从37个代表性的土壤样品中随机选取25个样本作为建模集, 剩下的作为验证集, 建模集和验证集的平均值分别为 2.64 、 2.86 。

土壤光谱测定采用ASD FieldSpec3型光谱仪, 波段范围为 $350 \sim 2\ 500\text{ nm}$, 重采样间隔为 1 nm 。每次采集回来之后的土壤样品预处理之后, 尽快测量土壤光谱。野外测量需要选择晴朗无风的天气, 测量时间为 $12:00 \sim 14:00$, 测定之前先进行白板校正, 校正间隔控制在 $3 \sim 5\text{ min}$, 测定时始终保证传感器探头位于土面正上方 15 cm 处^[21], 每个

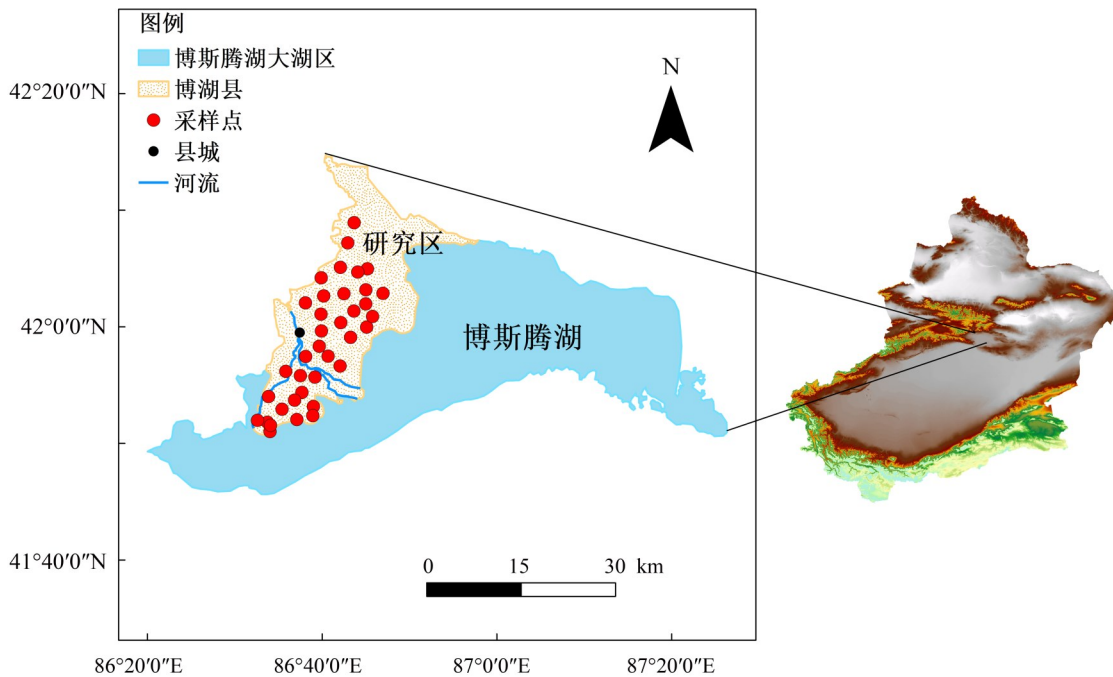


图 1 采样点及研究区示意图

Fig. 1 Sampling point and location of the study area

土壤样品重复测量 15 条光谱曲线, 取其平均值作为此样本的光谱数据。

1.3 数据处理与研究方法

1) 对均值处理后的光谱曲线去除水分吸收波段 1 340 ~ 1 450 nm、1 750 ~ 2 020 nm、2 330 ~ 2 500 nm^[22], 对去除干扰波段的光谱曲线用 Savitzky-Golay 滤波方法进行平滑处理。

2) 分数阶微分是将整数阶微分的阶数扩展至任意阶^[23]。目前, Grünwald-Letnikov^[24-25] 定义的分阶微分较为常用, 主要是应用一元函数差分来实现, 表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{d^V}{d\lambda^V} f(\lambda) = & f(\lambda) + (-V)f(\lambda - 1) \\ & + \frac{(-V)(-V-1)}{2} f(\lambda - 2) + \dots \\ & + \frac{\Gamma(-V+1)}{n! \Gamma(-V+n+1)} f(\lambda - n) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, V -阶数, $\Gamma(\cdot)$ -Gamma 函数, λ -对应的值, n -是微分上下限之差。

在平滑后的原始光谱曲线 R 的基础上, 对均方根 \sqrt{R} 、对数 $\lg R$ 、倒数 $1/R$ 、对数倒数 $1/\lg R$ 进行变换, 再利用 (1) 式分别对原始光谱曲线 R 及 4 种变换进行 0 ~ 2 阶的分阶微分处理 (阶数间隔为 0.2)。

3) 采用偏最小二乘回归 (PLSR) 方法进行建

模及验证, PLSR 方法融合主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析^[26-27]。在多元线性回归里采用逐步回归, 逐步分解输入变量矩阵和输出变量矩阵, 并综合考虑提取的主成分对输入变量矩阵和输出变量矩阵的解释能力, 直到满足性能要求为止。建模和验证的精度分别用决定系数 R_c^2 、 R_v^2 , 均方根误差 $RMSE_c$ 、 $RMSE_v$ ^[28]。 R^2 用来判定建模的稳定程度, 越接近 1 说明模型越稳定; $RMSE$ 用来说明模型的准确度, 值越小表示模型的精度越高^[29]。

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量高光谱特征

对土壤含盐量光谱反射率进行聚类分析, 以 K-means 聚类算法进行划分。由图 2 所示, 利用聚类分析将土壤含盐量光谱反射率划分为 4 类, 分别对 4 类光谱反射率求数学平均, 得到 4 种土壤含盐量的光谱曲线, 土壤含盐量的光谱特征整体较为相似。在波段为 350 ~ 1 340 nm 之间, 土壤含盐量为 4.20 和 2.51 g/kg 的光谱反射率值高于 1.56 和 3.17 g/kg 的光谱反射率值; 在 1 340 nm 之后, 这 4 种土壤含盐量光谱反射率值则显示相反的变化规律, 土壤含盐量为 3.17 g/kg 的反射率值较高。总体上看, 350 ~ 2 100 nm 之间, 土壤含盐量光谱反射率值随着波长的增加而增加, 2 100 nm 之后, 光

谱特征逐渐减弱。

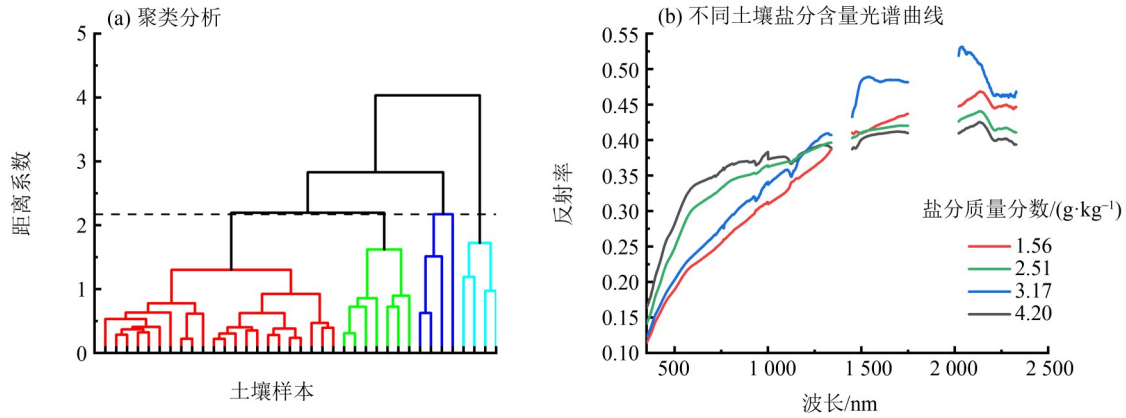


图2 土壤含盐量光谱曲线聚类分析和不同土壤含盐量平均光谱曲线特征

Fig. 2 Cluster analysis of soil salt content spectral curves and characteristics of different soil salt content average spectral curves

2.2 分数阶微分对相关系数的影响

将原始光谱反射率的分数阶微分及其4种不同变换形式下的分数阶微分与土壤含盐量在0.01极显著水平下进行相关关系分析。如表2所示,通过显著性检验较多的特征波段数是 $1/R$ 为691个波段,最少的是 $1/\lg R$,为300个波段。原始光谱反射率通过显著性检验的特征波段主要集中在1阶~2阶, $1/R$ 的0阶微分是唯一通过显著性检验的阶数,且通过0.4阶和0.6阶的特征波段比其他光谱反射率分数阶微分的特征波段数多,分别为145和150。随着阶数的增加,通过显著性检验的特征波段呈现先增加后减少的趋势, R 的1.2阶的特征波段最多为142, \sqrt{R} 的0.6阶的特征波段最多为95, $\lg R$ 的0.6阶的特征波段最多为115, $1/\lg R$ 的0.8阶特征波段最多为56。

由图3可知,通过显著性检验的特征波段集中的范围,原始光谱反射率 R 的特征波段分布在638~653, 1166~1181, 1234~1237, 1669~1749和2021~2329 nm。 \sqrt{R} 与 $\lg R$ 的特征波段集中范围较为相似, $1/R$ 与 $1/\lg R$ 的特征波段集中范围较为相似,且4中数学变换的特征波段主要集中在600~1000 nm和2020~2330 nm,这与 R 分布的特征波段数量有很大的不同。 R 的相关性极大值绝对值是2阶为0.53, \sqrt{R} 的相关性极大值绝对值是0.8阶为0.67, $1/R$ 的相关性极大值绝对值是0.6阶为0.69, $\lg R$ 的相关性极大值绝对值是0.8阶为0.67, $1/\lg R$ 的相关性极大值绝对值是0.6阶为0.64。

2.3 土壤含盐量分数阶微分的光谱建模与验证

分别利用通过显著性检验的 R 、 \sqrt{R} 、 $\lg R$ 、 $1/R$ 、 $1/\lg R$ 特征波段与土壤含盐量进行偏最小二乘回

表1 分数阶微分通过显著性检验的波段数

Table 1 Band numbers through significant test of each fractional-order differential

| 微分阶数 | 通过0.01检验水平波段数 | | | | |
|------|---------------|------------|-------|---------|-----------|
| | R | \sqrt{R} | $1/R$ | $\lg R$ | $1/\lg R$ |
| 0.2 | 0 | 8 | 67 | 24 | 3 |
| 0.4 | 0 | 60 | 145 | 81 | 17 |
| 0.6 | 0 | 95 | 150 | 115 | 53 |
| 0.8 | 0 | 75 | 56 | 80 | 56 |
| 1.0 | 76 | 46 | 52 | 49 | 35 |
| 1.2 | 142 | 47 | 58 | 57 | 42 |
| 1.4 | 121 | 42 | 48 | 44 | 27 |
| 1.6 | 62 | 36 | 39 | 38 | 21 |
| 1.8 | 22 | 32 | 37 | 33 | 25 |
| 2.0 | 42 | 26 | 32 | 28 | 21 |

归,建立不同光谱变化下分数阶微分的土壤含盐量估算模型。由表2可知,从总体上看 $1/\lg R$ 的0.2阶和 $1/R$ 的1.8阶的建模效果较好, R^2_c 分别为0.78和0.75, $RMSE_c$ 分别为1.56和1.48。从原始光谱和4种光谱变换下的验证集可知, R 的1.8阶的估算模型较好 R^2_v 为0.47,而 $RMSE_v$ 为1.65; \sqrt{R} 的1.2阶的估算模型较好 R^2_v 为0.57, $RMSE_v$ 为1.48; $1/R$ 的1阶和2阶的估算模型精度较好, R^2_v 分别为0.52、0.53, $RMSE_v$ 分别为1.35、1.34; $\lg R$ 的0.8阶和1阶的估算模型精度较好, R^2_v 分别为0.52、0.52, $RMSE_v$ 分别为1.43、1.33; $1/\lg R$ 的0.2阶和0.4阶的估算模型精度较好, R^2_v 分别为0.63、0.62, $RMSE_v$ 分别为1.44、1.42。由图4可知, $1/\lg R$ 的分数阶微分拟合曲线较为集中,从 R^2_v 来看,最小值为0.47,其他主要在0.50

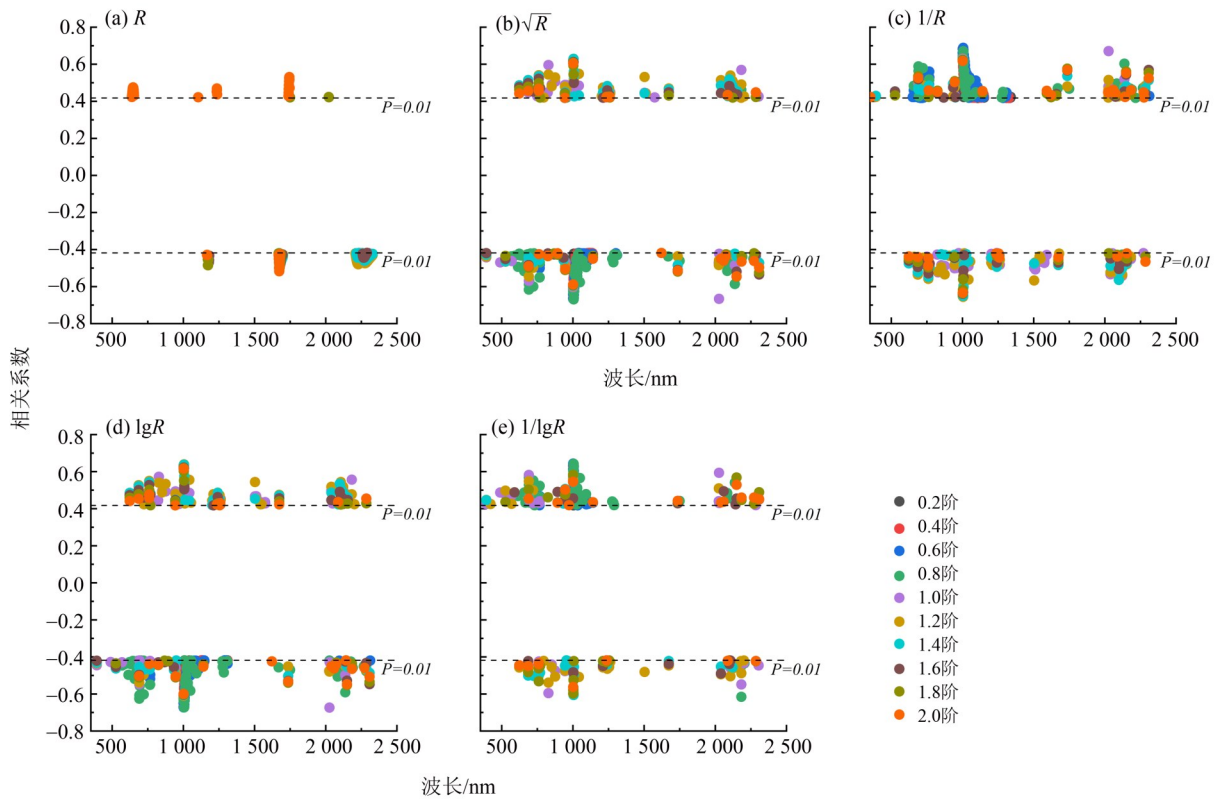


图3 土壤含盐量与不同光谱变换反射率分数阶微分的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients between soil salt content and various order differentials of reflectivity under different spectral transformations

表2 土壤含盐量分数阶微分光谱建模与验证

Table 2 Modeling and verification of fractional differential spectra of soil salinity

| Order | | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | |
|------------|-----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R | 建模集 | R^2_c | - | - | - | 0.35 | 0.47 | 0.47 | 0.44 | 0.68 | 0.59 | |
| | | RMSE _c | - | - | - | 1.82 | 1.91 | 1.90 | 1.93 | 1.96 | 1.89 | |
| | 验证集 | R^2_v | - | - | - | 0.02 | 0.29 | 0.12 | 0.21 | 0.47 | 0.41 | |
| | | RMSE _v | - | - | - | 1.25 | 1.36 | 1.37 | 1.39 | 1.65 | 1.51 | |
| \sqrt{R} | 建模集 | R^2_c | 0.33 | 0.55 | 0.45 | 0.51 | 0.51 | 0.60 | 0.51 | 0.67 | 0.51 | 0.43 |
| | | RMSE _c | 1.57 | 1.61 | 1.54 | 1.59 | 1.54 | 1.35 | 1.42 | 1.60 | 1.61 | 1.57 |
| | 验证集 | R^2_v | 0.36 | 0.33 | 0.31 | 0.55 | 0.54 | 0.57 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.51 |
| | | RMSE _v | 1.43 | 1.32 | 1.52 | 1.42 | 1.36 | 1.48 | 1.35 | 1.35 | 1.35 | 0.98 |
| 1/R | 建模集 | R^2_c | 0.45 | 0.43 | 0.71 | 0.58 | 0.62 | 0.74 | 0.56 | 0.49 | 0.75 | 0.66 |
| | | RMSE _c | 1.67 | 1.43 | 2.01 | 1.63 | 1.92 | 1.46 | 1.44 | 1.34 | 1.48 | 1.55 |
| | 验证集 | R^2_v | 0.20 | 0.32 | 0.36 | 0.49 | 0.52 | 0.50 | 0.48 | 0.49 | 0.48 | 0.53 |
| | | RMSE _v | 1.38 | 1.24 | 1.64 | 1.38 | 1.35 | 1.34 | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 1.34 |
| lgR | 建模集 | R^2_c | 0.35 | 0.32 | 0.29 | 0.46 | 0.56 | 0.66 | 0.57 | 0.47 | 0.72 | 0.58 |
| | | RMSE _c | 1.69 | 1.78 | 1.91 | 1.39 | 1.60 | 1.59 | 1.68 | 1.72 | 1.79 | 1.98 |
| | 验证集 | R^2_v | 0.21 | 0.33 | 0.11 | 0.52 | 0.52 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.49 |
| | | RMSE _v | 1.34 | 1.33 | 1.52 | 1.43 | 1.33 | 1.35 | 1.35 | 1.34 | 1.34 | 1.34 |
| 1/lgR | 建模集 | R^2_c | 0.78 | 0.52 | 0.67 | 0.51 | 0.51 | 0.56 | 0.55 | 0.59 | 0.70 | 0.59 |
| | | RMSE _c | 1.56 | 1.46 | 1.59 | 1.60 | 1.60 | 1.48 | 1.69 | 1.72 | 1.47 | 1.60 |
| | 验证集 | R^2_v | 0.63 | 0.62 | 0.50 | 0.54 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.47 | 0.50 |
| | | RMSE _v | 1.44 | 1.42 | 1.47 | 1.42 | 1.42 | 1.40 | 1.41 | 1.44 | 1.37 | 1.39 |

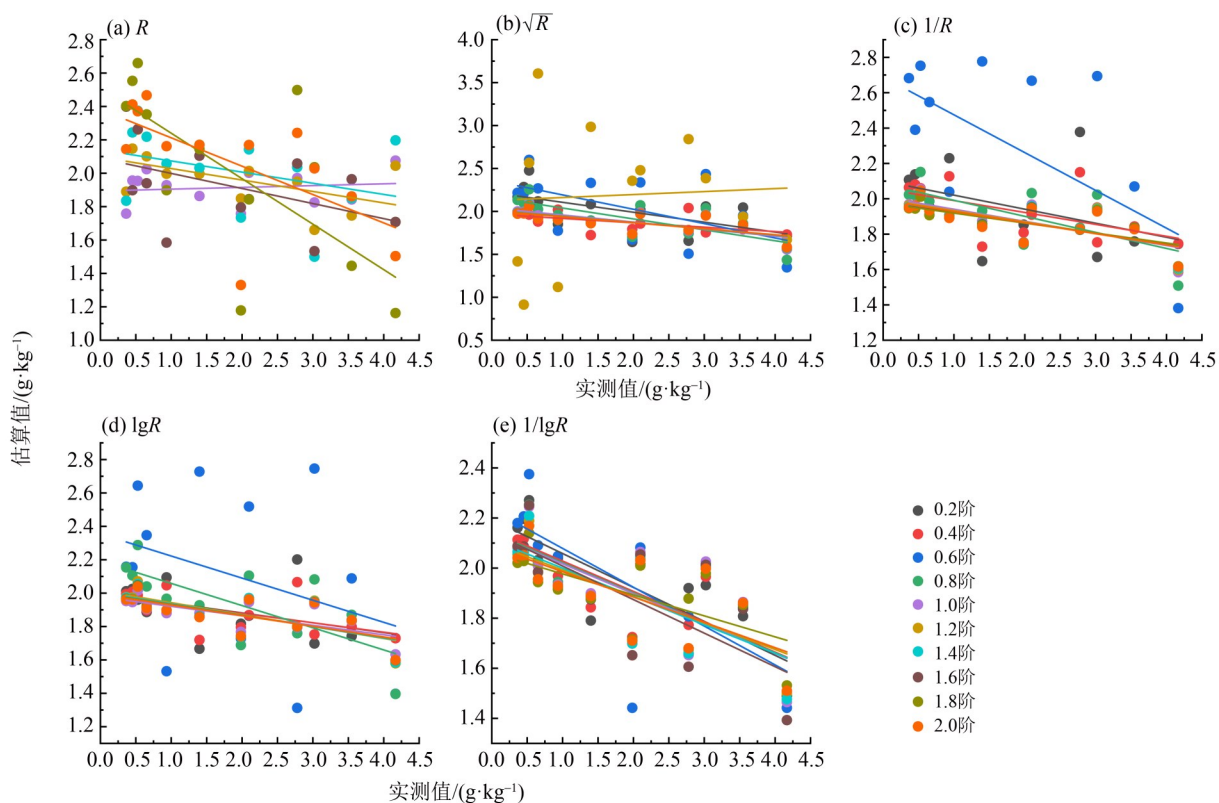


图4 基于不同分数阶微分光谱变换的土壤含盐量偏最小二乘回归模型验证

Fig. 4 Verification of soil salinity partial least squares regression model based on different fractional differential spectral transformation

~0.54, R 的分数阶微分拟合曲线较为杂乱。

3 讨论

适当的光谱增强变换有利于土壤盐分信息的高光谱识别和提取,采用4种数学光谱变换的分数阶微分进行预处理,有助于通过显著性检验优选最优光谱变换的分数阶微分特征波段。本文利用分数阶微分在阶数上,能够突破整数的限制,范围更加广泛的优势预处理数据,发现分数阶微分预处理方法可以有效地不同程度的提高数学光谱变换的相关性值。从光谱变换微分值与含盐量的相关系数最大值,均出现在分数阶,这与文献[11,18]的研究结果基本一致。从建模集和验证集精度和误差来看,分数阶的建模效果优于整数阶,这与亚森江·喀哈尔等^[13]的研究结果基本一致。分数阶微分为高光谱数据定量估算土壤盐分含量提供新的角度,说明该方法在利用高光谱数据估算研究区土壤盐分含量是可行的。研究区属于干旱区绿洲,因此,光谱变换的分数阶微分在不同地区的最佳参数并找出普适性高光谱参数,值得进一步研究。

4 结论

1) 不同的光谱数学变换的分数阶微分可以增加通过显著性检验的波段数,通过显著性检验较多的特征波段是 $1/R$ 为 691 个波段,比通过 R 多 226 个波段;突显某些波段的光谱反射率与土壤含盐量的相关性,扩大特征波段的选择空间, \sqrt{R} 、 $\lg R$ 、 $1/R$ 、 $1/\lg R$ 通过显著性检验的特征波段主要集中在 600 ~ 1 000 nm 和 2 020 ~ 2 330 nm。

2) 随着分数阶微分的增加,通过显著性检验的特征波段呈现先增加后减少的趋势, $1/R$ 、 \sqrt{R} 、 $\lg R$ 均在 0.6 阶通过的特征波段数最多,分别为 150、95、115, R 的 1.2 阶的特征波段最多为 142, $1/\lg R$ 的 0.8 阶特征波段最多为 56,均在分数阶微分达到最多。

3) 在原始光谱 R 、均方根 \sqrt{R} 、对数 $\lg R$ 、倒数 $1/R$ 、对数倒数 $1/\lg R$ 的各分数阶微分利用偏最小二乘回归建模中,从总体上看 $1/\lg R$ 的建模效果优于其他 4 种建模,且 $1/\lg R$ 在 0.2 的建模精度和验证精度较高, $R^2_c=0.78$, $RMSE_c=1.56$, $R^2_v=0.63$, $RMSE_v=1.44$ 。通过光谱变换进行分数阶微分预处理优选特征波段,以提高土壤电导率的估算精度,为土壤盐分含量相关研究提供一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] SUN X, GAO Y, WANG D, et al. Stoichiometric variation of halophytes in response to changes in soil salinity [J]. *Plant Biology*, 2017, 19(3): 360-367.
- [2] JIN P B, LI P H, WANG Q, et al. Developing and applying novel spectral feature parameters for classifying soil salt types in arid land [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 54: 116-123.
- [3] YANG L, BIAN X, YANG R, et al. Assessment of organic amendments for improving coastal saline soil [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 3204-3211.
- [4] 彭翔, 胡丹, 曾文治, 等. 基于 EPO-PLS 回归模型的盐渍化土壤含水率高光谱反演 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 167-173.
- PENG X, HU D, ZENG W Z, et al. Estimating soil moisture from hyperspectral in saline soil based on EPO-PLS regression [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(11): 167-173.
- [5] 吴一全, 周杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 322-331.
- WU Y Q, ZHOU Y, LONG Y L. Small target detection in hyper spectral remote sensing image based on adaptive parameter SVM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0928001.
- [6] SRIVASTAVA R, SETHI M, YADAV R K, et al. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for rapid characterization of salt-affected soil in the Indo-Gangetic Plains of Haryana, India [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017, 45(2): 307-315.
- [7] CHEN K, LI C, TANG R. Estimation of the nitrogen concentration of rubber tree using fractional calculus augmented NIR spectra [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 108: 831-839.
- [8] 陈思明, 邹双全, 毛艳玲, 等. 土壤光谱重建的湿地土壤有机质含量多光谱反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 912-917.
- CHEN S M, ZOU S Q, MAO Y L, et al. Inversion of soil organic matter content in wetland using multispectral data based on soil spectral reconstruction [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 912-917.
- [9] ZHANG D, TASHPOLAT T, DING L, et al. Quantitative estimating salt content of saline soil using laboratory hyperspectral data treated by fractional derivative [J]. *Journal of Spectroscopy*, 2016(1): 1-11.
- [10] KOTHA P, KRISHNA B T. Comparative study of fractional order derivative based image enhancement techniques [J]. *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, 2014, 3(2): 231-235.
- [11] 张文文, 杨可明, 夏天, 等. 光谱分数阶微分与玉米叶片重金属铜含量的相关性分析 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(25): 33-38.
- ZHANG W W, YANG K M, XIA T, et al. Correlation analysis on spectral fractional-order differential and the content of heavy metal copper in corn leaves [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(25): 33-38.
- [12] TARASOV V E. On chain rule for fractional derivatives [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2016, 30(1/2/3): 1-4.
- [13] 亚森江·喀哈尔, 杨胜天, 尼格拉·塔什甫拉提, 等. 基于分数阶微分优化光谱指数的土壤电导率高光谱估算 [J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7237-7248.
- SH J·KA HA ERY, YANG S T, L·TA SHEN FU LA TIN G, et al. Hyperspectral estimation of soil electrical conductivity based on fractional order differentially optimised spectral indices [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7237-7248.
- [14] 吾木提·艾山江, 买买提·沙吾提, 马春玥. 基于分数阶微分和连续投影算法-反向传播神经网络的小麦叶片含水量高光谱估算 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 251-259.
- T·AI SHAN JIANG W M, T·SHA WU TIM M, MA C Y. Hyperspectral estimation of wheat leaf water content using fractional differentials and successive projection algorithm-back propagation neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 251-259.
- [15] 蒋明, 郭云开, 钱佳, 等. 不同采样间隔下分数阶微分对土壤重金属高光谱数据的影响 [J]. *测绘通报*, 2018(10): 37-40+45.
- JIANG M, GUO Y K, QIAN J, et al. Effect of fractional differential on soil hyper metallic hyperspectral data at different sampling intervals [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(10): 37-40+45.
- [16] TIAN A, ZHAO J, XIONG H, et al. Application of fractional differential calculation in pretreatment of saline soil hyperspectral reflectance data [J]. *Journal of Sensors*, 2018, DOI: 10.1155/2018/8017614.
- [17] 徐继刚, 冯新泸, 管亮, 等. 分数阶微分在红外光谱数据预处理中的应用 [J]. *化工自动化及仪表*, 2012, 39(3): 347-351.

- XU J G, FENG X L, GUAN L, et al. Fractional differential application in reprocessing infrared spectral data [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2012, 39(3):347–351.
- [18] 田安红,熊黑钢,赵俊三,等. 分数阶微分对盐渍土野外光谱预处理精度提升的机理分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(8):2495–2500.
- TIAN A H, XIONG H G, ZHAO J S, et al. Mechanism improvement for pretreatment accuracy of field spectra of saline soil using fractional differential algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(8):2495–2500.
- [19] 李志,李新国,毛东雷,等. 博斯腾湖西岸湖滨带不同植被类型土壤剖面盐分特征分析[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(2): 260–268.
- LI Z, LI X G, MAO D L, et al. Analysis of salinity characteristics of different vegetation types in soil profile in western side of Bosten lake of Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(2): 260–268.
- [20] 梁东,李新国,阿斯耶姆·图尔迪,等. 博斯腾湖西岸湖滨带土壤剖面盐分特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 151–158.
- LIANG D, LI X G, TU ER DI·A S Y M, et al. Salinity characteristics of soil profiles in the western lakeside of Bosten Lake, Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4):151–158.
- [21] 刘克,赵文吉,郭道宇,等. 基于地面实测光谱的湿地植物全氮含量估算研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2):465–471.
- LIU K, ZHAO W J, GUO X Y, et al. Estimation total nitrogen content in wetland vegetation based on measured reflectance spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(2): 465–471.
- [22] 张贤龙,张飞,张海威,等. 基于光谱变换的高光谱指数土壤盐分反演模型优选[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1):110–117.
- ZHANG X L, ZHANG F, ZHANG H W, et al. Optimization of soil salt inversion model based on spectral transformation from hyperspectral index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1):110–117.
- [23] 林世敏,许传炬. 分数阶微分方程的理论和数值方法研究[J]. *计算数学*, 2016, 38(1):1–24.
- LIN S M, XU C J. Theoretical and numerical investigation of fractional differential equations [J]. *Mathematica Numerica Sinica*, 2016, 38(1):1–24.
- [24] 杨柱中,周激流,晏祥玉,等. 基于分数阶微分的图像增强[J]. *计算机辅助设计与图形学报*, 2008, 20(3): 343–348.
- YANG Z Z, ZHOU J L, YAN X Y, et al. Image enhancement based on fractional differentials [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3):343–348.
- [25] 张绍阳,解源源,张鑫,等. 基于分数阶微分的模糊交通视频图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 779–786.
- ZHANG SH Y, XIE Y Y, ZHANG X, et al. Enhancement of fuzzy traffic video images based on fractional differential [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3):779–786.
- [26] LIU K, CHEN X, LI L, et al. A consensus successive projections algorithm–multiple linear regression method for analyzing near infrared spectra [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 858(1):16–23.
- [27] 李志,李新国,刘彬,等. 博斯腾湖西岸湖滨带土壤盐分高光谱反演[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 40(2): 33–39.
- LI ZH, LI X G, LIU B, et al. Hyperspectral inversion of soil salinity in the western lakeside of Bosten lake [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2019, 40(2):33–39.
- [28] 王圆圆,李贵才,张立军,等. 利用偏最小二乘回归从冬小麦冠层光谱提取叶片含水量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4):1070–1074.
- WANG Y Y, LI G C, ZHANG L J, et al. Retrieval of leaf water content of winter wheat from canopy hyperspectral data using partial least square regression [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1070–1074.
- [29] SONG L, JIAN J, TAN D J, et al. Estimate of heavy metals in soil and streams using combined geochemistry and field spectroscopy in Wan-sheng mining area, Chongqing, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 1–9.