

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.027

干旱区绿洲植被高光谱与浅层土壤含水率拟合研究

陈文倩^{1,2} 丁建丽^{1,2} 谭娇^{1,2} 李相³

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 水资源一直是制约我国西北干旱区农业发展的关键因素。以新疆渭库绿洲为研究区域, 选取 41 个土壤含水率与干旱区绿洲植被实测高光谱样本, 以植被指数为桥梁, 采用支持向量机回归 (SVR) 方法, 建立干旱区绿洲土壤含水率与植被指数之间的拟合方程模型, 并与多元回归 (MLSR)、偏最小二乘回归 (PLS) 2 种模型进行对比。实验结果表明: 不同模型的精度各异, 拟合效果由优到劣为: 改进的 SVR 模型、PLS 模型、MLSR 模型, 其中基于干旱区绿洲实测的植被光谱数据改进的 SVR 模型对土壤含水率具有较好的拟合效果, 通过最优参数的定值与最优测试集的抽取, R^2 高达 0.891 6, RMSE 仅为 2.004, 在干旱区绿洲的土壤含水率拟合中获得比较高的预测精度。而 MLSR 模型与 PLS 模型, R^2 分别为 0.630 0、0.654 9, RMSE 分别为 3.001 与 2.749。研究结果表明, 因地制宜开展合理的土壤含水率反演模型规则制定是提高干旱区绿洲土壤浅层含水率监测精度的有效手段, 也可为干旱区农业作物生长提供更精准的数据积累。

关键词: 高光谱; 植被指数; 土壤含水率; 改进 SVR

中图分类号: S273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0229-08

Fitting of Hyperspectral Reflectance of Vegetation and Shallow Soil Water Content in Oasis of Arid Area

CHEN Wenqian^{1,2} DING Jianli^{1,2} TAN Jiao^{1,2} LI Xiang³

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Water resources have become a key factor for restricting the social, economic and agricultural development of arid area in Northwest China. In recent years, agriculture in arid oasis has developed rapidly, and human activities have seriously affected balance on the regional soil moisture, resulting in a large area of salinization. Therefore, the monitoring of soil moisture is of great practical significance to the development of oasis agriculture and economy. Taking the oasis of Weiku in Xinjiang as the study area, totally 41 soil moisture samples and hyperspectral data of the oasis vegetation in arid area were collected, and the vegetation index was taken as bridge. Multiple regression (MLSR), partial least squares (PLS) regression and support vector machine regression (SVR) were used to establish the inversion model of soil water content in oasis, respectively, the regression models were tested respectively. The experimental results showed that the accuracy of different models was different. Through the optimization of parameters and extraction of optimal test set, the fitting effect from good to bad was improved SVR model, PLS model and MLSR model, which were based on the vegetation. The improved SVR model had a good fitting effect, R^2 was 0.891 6, RMSE was only 2.004, the analysis accuracy in the oasis of arid area reached the practical prediction accuracy. The R^2 values of MLSR model and PLS model were 0.630 0 and 0.654 9, and RMSE were 3.001 and 2.749, respectively. The results showed that it was an effective method to improve the monitoring accuracy of shallow soil water content in oasis, and it can also provide more data for monitoring soil moisture in arid area.

Key words: hyperspectra; vegetation index; soil water content; improved SVR

收稿日期: 2017-03-26 修回日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1303381, 41261090)、自治区重点实验室专项基金项目(2016D03001)、自治区科技支疆项目(201591101)、教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目和新疆大学优秀博士科技创新项目(XJUBSCX-2016014)

作者简介: 陈文倩(1988—), 女, 博士生, 主要从事干旱区资源遥感研究, E-mail: chimmyqu@yeah.net

通信作者: 丁建丽(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区生态环境遥感研究, E-mail: watarid@xju.edu.cn

引言

土壤水分是土壤的重要组成部分,是影响陆地表面的吸收、反射和发射等特性的关键因素,在地球表面与大气层之间的物量循环中起着重要的作用^[1]。尤其是表层土壤含水率对微观气象反应较为敏感^[2],可利用它有效地监测土壤与农作物旱情状况。近年来,干旱区绿洲农业发展迅速,人类活动已严重影响到区域性土壤水分的平衡,产生大面积的盐渍化现象。因此,土壤水分的监测对绿洲农业作物与经济的发展均有着十分重要的现实意义。

高光谱技术的发展,使土壤含水率的监测呈现多样化趋势,其中利用植被指数估算土壤含水率成为研究热点之一^[3],基于干旱区植被光谱与土壤含水率的相关性分析的数据建模亦是一个值得探讨的研究方向^[4],它更为直接地影响土壤含水率的反演精度。现阶段,在植被指数估算土壤含水率的研究进展中,大多是利用多元逐步回归(Multiple stepwise regression, MLSR)、偏最小二乘回归(Partial least squares, PLS)等统计方法进行数据之间的建模反演^[5-7],但土壤含水率与植被光谱之间的关系复杂,存在非线性关系,而简单的回归模型在处理非线性、异方差性等复杂问题尚有一定的不足,难以符合研究需求。

支持向量机回归预测模型(Support vector regression, SVR)是以统计学为理论发展起来的机器学习算法^[8],其基本思想是通过一个非线性映射将数据映射到高维特征空间,并在这个空间进行线性回归,从结构风险最小化的角度保证了模型的最大泛化能力。SVR具有较强的非线性逼近能力,能有效建立输入、输出量之间的全局性,陈果等^[9]研究表明,运用SVR模型进行小样本数据回归分析研究,具有较高的预测精度。

本文以大量查阅文献与绿洲实地考察为依据,综合分析干旱区绿洲植被特有属性,选择5个植被指数与实测土壤含水率建立根据干旱区植被特性改进的SVR模型,并与MLSR模型、PLS模型进行对比分析,以期构建精度拟合最佳的干旱区绿洲浅层土壤含水率估算模型,旨在为干旱区农作物灌溉管理和农田旱情预报提供重要依据。

1 实验

1.1 研究区概况

渭干河-库车河绿洲(以下简称为渭库绿洲)位于新疆南部的塔里木盆地北缘,地理坐标为 $82^{\circ}48' \sim 83^{\circ}40'E, 41^{\circ}5' \sim 41^{\circ}56'N$,是典型山前冲积扇平

原^[10]。该区域属温带大陆性干旱气候,光热资源极为丰富,其中干燥度系数为44.37,极端最低气温为 $-26.8 \sim -28.7^{\circ}C$,极端最高气温为 $41.5^{\circ}C$,多年平均降水量51.6 mm,年均蒸发量2 000.7 mm,最高为2 195.0 mm,最低为1 810.4 mm,蒸降比大约为40:1^[11]。植被主要以红柳、柽柳、盐穗木、骆驼刺、花花柴等为主,植被全年生长期为220 d以上,无霜期为209.7~226.3 d。独特的自然地理条件,决定了其生态环境的脆弱性,对气候变化和人类活动的响应极为敏感,加之其处于干旱区绿洲与荒漠带的相互交错区域,对新疆区域农作物生长与经济稳定发展均有着重要意义。

1.2 土壤数据采集与处理

于2014年7月20—28日在渭库绿洲区域采集土壤含水率数据(图1)。充分收集当地的土壤类型资料,样点采集时,选择相同土壤类型上的土壤进行测量,采样样方尺寸为 $30 m \times 30 m$,其中每个样方包含5个土壤采样单元,然后分别采集绿洲浅层土壤深度为0~10 cm的土壤样品(实验采集土壤方法如图2所示),并且当场称取土壤样品湿重,然后带回实验室用干燥箱将土样干燥并测定土壤含水率,取采样单元中5组数据的土壤含水率平均值作为最终土壤含水率测定值,共获取41组数据。

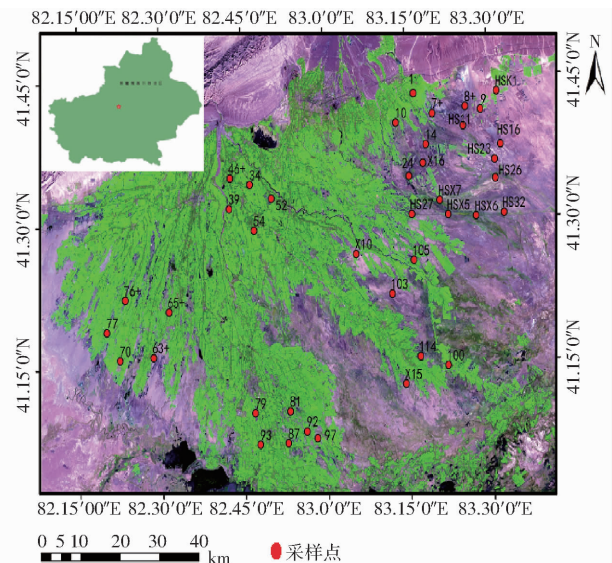


图1 野外采样点

Fig. 1 Locations of sampling points

1.3 光谱数据采集与处理

采用ASD Field spec HR便携式光谱仪进行野外植被光谱测定,光谱仪范围为350~2 500 nm,数据重采样间隔为1 nm,同时剔除水汽吸收影响严重的波段:1 346~1 462 nm、1 796~1 970 nm和2 406~2 500 nm。实验采样选择晴天、云量较少、无风或微风的天进行野外实地测量,以确保光谱获取准确

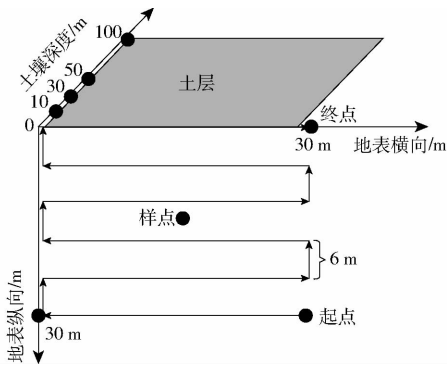


图 2 土壤样品采集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil sampling

性。实验主要按 5 点梅花状采样方式对土壤样点周边多种植被进行测量,取其平均值作为最终光谱值。为了更为客观地研究土壤含水率与植被光谱特征之间的关系,对二者的采样单元面积始终保持相同,参照土壤含水率采样单元面积,最终获得与土壤含水率采样单元相对应的 41 组植被光谱。

对野外获取光谱数据进行处理,首先,对获取的 41 组光谱数据做去除水汽吸收带工作,图 3 为去除水汽吸收带的光谱。再通过 Savitaky - Golay 方法对干旱区绿洲的植被光谱数据平滑,图 4 为 1 950 ~ 2 300 nm 平滑光谱局部图。

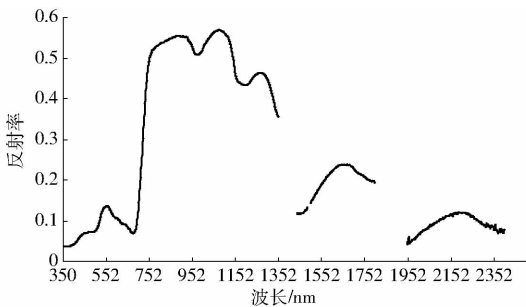


图 3 野外光谱曲线去水汽带处理

Fig. 3 Removing water zone of vegetation spectral in field

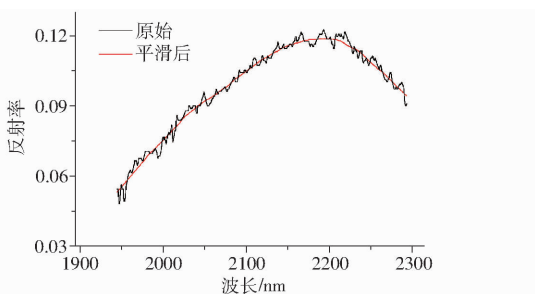


图 4 野外光谱曲线平滑处理

Fig. 4 Smoothing spectral of vegetation in field

1.4 绿洲植被指数筛选

根据文献资料与干旱区绿洲实地考察获取的野外植被光谱数据,结合文献 [12 - 14] 研究成果,通过 Matlab 灰度关联分析,从 12 种植被指数中筛选最适宜表征干旱区渭库绿洲的 5 种植被指数作为实

验使用指标,如表 1 所示。

表 1 筛选表征土壤含水率的植被指数
Tab. 1 Selected vegetation indexes for soil moisture evaluation

植被指数	公式
归一化植被指数 (NDVI)	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$
红边归一化植被指数 (NDVI705)	$\frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$
改进红边归一化植被指数 (Mndvi705)	$\frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{445}}$
改进红边比值植被指数 (mSR705)	$\frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{750} + \rho_{445}}$
增强性植被指数 (EVI)	$\frac{2.5(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1}$
增强性植被指数 2 (EVI2)	$2.5 \left(\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 2.4\rho_{red} + 1} \right)$
三角形植被指数 (TVI)	$60(\rho_{nir} - \rho_{green}) - 100(\rho_{red} - \rho_{green})$
红边指数 1 (VOG1)	$\frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$
土壤调整植被指数 (SRV1)	$(1 + L) \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} + L}$
土壤调整植被指数 2 (SRV2)	$\frac{\rho_{nir}}{\rho_{red} + \frac{b}{a}}$
环境植被指数 (HJVI)	$\frac{2(\rho_{nir} - \rho_{red})}{7\rho_{green} - 7.5\rho_{blue} + 0.9}$
比值植被指数 (RVI)	$\frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}}$

注: ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{green} 、 ρ_{blue} 分别表示近红外波段、红波段、绿波段、蓝波段的反射率; ρ_{705} 、 ρ_{750} 、 ρ_{445} 分别表示近波段 705、750、445 nm 处的反射率; L 为盖度背景调节因子,取 0.5; a 、 b 表示土壤线系数,分别取 1.0、0.5。

1.5 模型建立方法

1.5.1 MLSR 模型

将基于高光谱的植被指数与土壤含水率作 MLSR 分析,模型的建立可表述为将研究对象构建成一个或一组函数,并确定函数的各项参数。MLSR 方程的一般表达式为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \lambda \quad (1)$$

式中 y ——样本变量 β_k ——回归系数

k ——第 k 个解释变量

x_k ——第 k 个样本的取值

λ ——随机项,服从正态分布

假如 $(y_1; x_{11}; x_{21} \dots x_{k1}), \dots, (y_n; x_{1n}; x_{2n} \dots x_{kn})$ 是一个总容量为 n 的样本,从 y_1 到 y_n 的表达式为

$$\begin{cases} y_1 = \sum_{j=0}^k \beta_j x_{j1} + \lambda_1 \\ \vdots \\ y_n = \sum_{j=0}^k \beta_j x_{jn} + \lambda_n \end{cases}$$

式中 j ——第 j 个样本

x_{jn} ——第 n 个 x_j 的取值

求出模型参数 β_j 的估计值 β'_j , 可进而求出 y 对 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的线性回归方程

$$y' = \beta'_0 + \beta'_1 x_1 + \dots + \beta'_k x_k + \lambda \quad (2)$$

式中 β'_k —— β_k 的估计值

x_k, y' ——样本变量

均方根误差 (RMSE) 为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [P^*(Z_i) - P(Z_i)]^2}{N}} \quad (3)$$

式中 $P^*(Z_i)$ ——真实值

$P(Z_i)$ ——模型计算值

N ——真实值的个数

1.5.2 PLS 模型

PLS 回归分析是近年来产生和发展的一种具有广泛适用性的多元统计分析方法, 其具有主成分分析、典型相关分析和线性回归分析等特点, 能有效解决变量存在多重共线性的问题^[15-17]。在解决变量存在多重共线性问题方面, 采用成分提取的方法, 通过对信息进行重组, 排除噪声干扰, 从而保证了模型的稳定。其原理如下:

设有 m 个因变量和 s 个自变量。为了研究因变量与自变量的统计关系, 观测了 p 个样本点, 由此构成了自变量与因变量的数据表 $\mathbf{x} = (y_1, y_2, \dots, y_m)_{p \times s}$ 和 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)_{p \times m}$ 。偏最小二乘回归分别在 X 与 Y 中提取出成分 a_1 和 b_1 , 在第一个成分被提取后, PLS 回归分别实施 X 对 a_1 的回归以及 Y 对 b_1 的回归。如果回归方程已经达到满意的精度, 则算法终止。

1.5.3 SVR 模型

SVR 基本思想是通过一个非线性映射将数据映射到高维特征空间, 并在这个空间进行线性回归, 回归模型的具体公式表达如下:

对于给定的训练样本 $(x_i, y_i), x_i \in \mathbf{R}^d, y_i \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, n, \mathbf{R}$ 是实数, \mathbf{R}^d 是 \mathbf{R} 的 d 维度。回归的目标就是求下列回归函数

$$f(x) = \langle \omega \cdot x \rangle \quad (4)$$

式中 $\langle \omega \cdot x \rangle$ —— ω 与 x 的内积

ω ——权重系数

首先, 标准的 ε 不敏感支持向量机问题可转化为数学表达求解优化问题。

$$\min \frac{1}{2} = \langle \omega \cdot x \rangle + C \sum_{i=1}^n (\delta_i + \delta_i^*) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } y_i - \langle \omega \cdot x \rangle + z \leq \varepsilon + \delta_i \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \langle \omega \cdot x \rangle \leq -y_i + z \leq \varepsilon + \delta_i^* \quad (7)$$

式中 z ——偏置项系数

δ_i ——松弛因子 y_i ——样本变量

ε ——损失函数参数

C ——惩罚系数, 用于控制模型复杂度和逼近误差的折中, C 越大则对数据的拟合程度越高

再将上述优化问题转化为其相应的对偶问题, 引进核方法则转化为求解如下约束问题的最大值, 解得

$$Q = (\alpha, \alpha^*) =$$

$$\sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j + \alpha_j^*) K(x_i, x_j) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C$$

$$0 \leq \alpha_i^* \leq C$$

式中 i, j ——训练样本 K ——函数常量

α_i, α_i^* ——拉格朗日乘子

y_i, x_i, x_j ——训练样本

最后模型方程可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 干旱区植被指数评价结果

利用灰色关联分析法定量分析 12 种植被指数与土壤含水率的关联度, 并对其关联度进行排序, 分析结果见表 2。

表 2 植被指数的灰色关联度排序

Tab. 2 Grey relational degree and ranking of evaluation index

植被评价指标	关联度	排序
NDVI	0.770 3	2
NDVI705	0.751 9	7
mNDVI705	0.756 7	4
mSR705	0.807 2	1
EVI	0.743 3	9
EVI2	0.752 9	6
TVI	0.747 2	8
VOG1	0.759 6	3
SRVI	0.754 7	5
SRVI2	0.616 3	12
HJVI	0.714 6	11
RVI	0.725 2	10

由表 2 可以看出, 干旱区实测土壤含水率与各指数关联度由大到小为: 改进红边指数 (mSR705)、归一化植被指数 (NDVI)、红边指数 1 (VOG1)、改进

红边归一化植被指数 (mNDVI705)、土壤调整植被指数 (SRVI), 因此, 选取以上 5 种植被指数作为模型的自变量与土壤含水率进行拟合。

2.2 土壤含水率估算模型的构建

2.2.1 MLSR 模型的构建

将以上 5 个关联度最高的植被指标作为自变量, 实测土壤含水率作为因变量, 使用 SPSS 进行多元线性回归分析, 得到

$$y = -1.699x_1 + 12.811x_2 + 2.412x_3 + 14.245x_4 - 7.083x_5 - 18.824 \quad (10)$$

将 41 组样本数据代入估算模型, 获取预测值, 并与实测数值进行回归分析。

2.2.2 PLS 模型的构建

运用偏最小二乘回归专业分析软件 SIMCA - P11.5 构建偏最小二乘回归模型, Analysis 中点击 Auto fit 功能对模型进行自动拟合。当提取 1 个 PLS 成分时对 y 的交叉有效性是 0.8642, 第 2 个成分是 0.5146, 因此系统只提取了 1 个 PLS 成分。模型对 x 和 y 的解释能力分别为 0.8512 和 0.8492。最终得到标准化偏最小二乘回归方程为

$$y = -2.556x_1 + 15.401x_2 + 2.777x_3 + 13.447x_4 - 7.995x_5 - 18.426 \quad (11)$$

将 41 组样本数据代入估算模型, 获取预测值, 并与实测数值进行回归分析。

2.2.3 SVR 模型的构建

根据 SVR 模型选择的原则, 实验采用尽量简单的预测模型以降低复杂性, 从而提高模型的泛化能力, 使得模型结果更加准确。选择 5 种植被指数作为自变量, 实测土壤含水率作为因变量, 进行数据训练与回归预测。具体步骤如图 5 所示: ①将植被指数数据与实测土壤含水率数据分别保存成 2 个独立的文件导入软件, 且分别保存为矩阵类型, 以便于后续模型训练。②将 5 种植被指数作为自变量, 实际土壤含水率作为因变量, 分别命名为 test-x, test-y, 对自变量进行归一化处理, 使得数据被规整到 $[-1, 1]$ 之间, 利用 PCA 进行降维处理, 将维数由 5 变为 4, 进而提取有效数据。且在代码编写中将 2 个文件全部加载进去, 以免每次运行, 数据重复出现。③参数寻优开始, 选取模型最优参数, C 值为 32 时, g 为 1, 交叉验证的折数 V 为 5, GA (PSO) 进化代数 100, GA (PSO) 种群数量为 20 时预测模型效果最佳, 尤其是 C 与 g 二者的取值过大或过小时, 均会出现数值不同程度的异质性。根据干旱区绿洲植被光谱与实测土壤含水率之间的关系, 将植被数据分为两部分, 一部分用于训练, 另一部分作为测试样本输入到预测模型, 选择训练函数在 SVR predict

模块进行预测, 获取最终预测结果, 将获取的结果定义 x 、 y 属性值, 最终得到可视化图像 (图 6、7)。

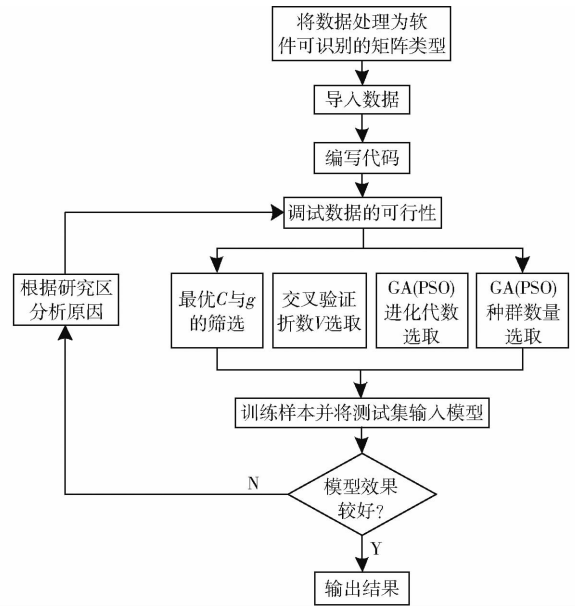


图 5 SVR 预测流程图

Fig. 5 Flow chart of SVR prediction

2.3 模型精度评价

总体来看, 3 种模型的检验精度均有不同程度的异质性, 但都能在一定程度上反映干旱区绿洲植被光谱数据与实测土壤含水率之间的关系 (图 8 ~ 10)。通过实验结果可以看出, SVR 模型能较为有效地运用到干旱区绿洲浅层土壤水分的估算研究中, 且估算精度较高。预测模型结果显示, 结合干旱区绿洲植被光谱数据, 利用 SVR 模型估算土壤含水率比单纯使用 PLS 与 MLSR 的以往研究有较大程度的改进。

由表 3 可知, 基于干旱区绿洲内实测植被光谱数据改进的 SVR 模型的 R^2 较高, 高达 0.8916, RMSE 较低, 仅为 2.004; 而 MLSR 模型 R^2 仅为 0.630, RMSE 为 3.001。PLS 模型 R^2 为 0.6549, RMSE 为 2.749。综合上述精度评价指标来看, SVR 的精度要远高于 MLSR 模型与 PLS 模型。对干旱区绿洲浅层土壤含水率的预测能力较强, 在监测区域浅层土壤含水率方面的潜力最大, 应用前景广阔。

3 讨论

利用植被的实测高光谱反演技术估算土壤含水率为农作物生长、林业水资源等领域的监测提供了一个重要手段, 尤其是在干旱区绿洲内, 土壤含水量是限制绿洲农业区域发展的主要因子, 直接影响到区域农作物经济发展。在植被指数与土壤含水率之间的研究中, 一些学者利用不同模型, 模拟了不同含水率土壤作为下垫面时, 不同植物含水率情况下的

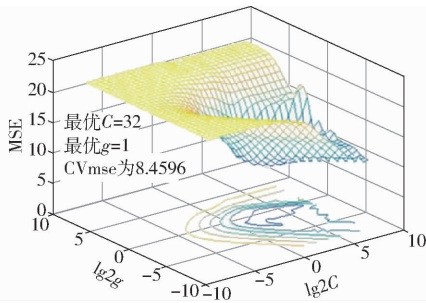


图6 最优参数选取

Fig. 6 Choosing of the best parameter values

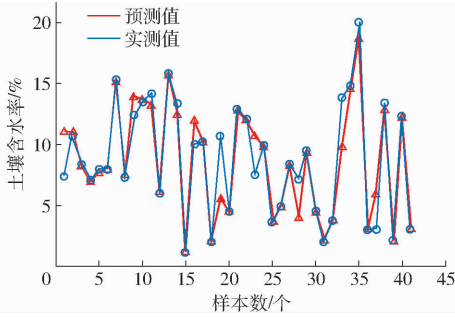


图7 SVR 预测结果

Fig. 7 Prediction result of SVR

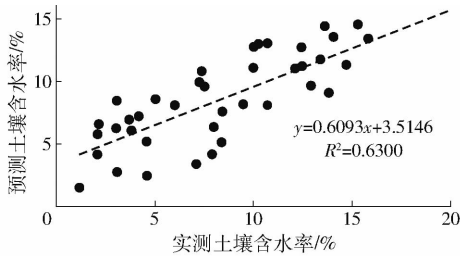


图8 MLSR 模型预测结果

Fig. 8 Prediction result of MLSR model

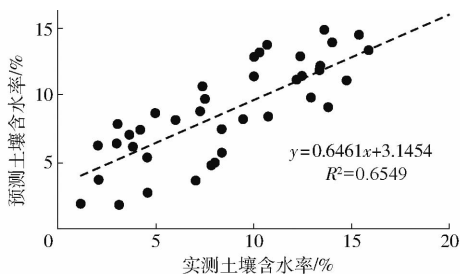


图9 PLS 模型预测结果

Fig. 9 Prediction result of PLS model

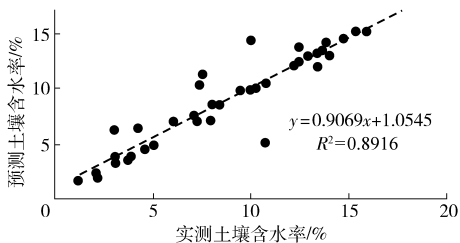


图10 SVR 模型预测结果

Fig. 10 Prediction result of SVR model

表3 3种模型精度评价

Tab. 3 Evaluation of MLSR, PLS and SVR models

模型	R^2	RMSE	调整 R^2
MLSR 模型	0.630 0	3.001	0.564
PLS 模型	0.654 9	2.749	0.646
SVR 模型	0.891 6	2.004	0.889

见,高光谱遥感能够区分两者带来的影响,是高光谱反演土壤含水率的重要依据。除此之外,“光学植被盖度”概念的引入,也实现了植被覆盖区域的土壤含水率监测。对比以上研究方法,干旱区的植被指数与土壤含水率之间的研究表明,与其他地区相比,有其独特之处,如实验中发现有些植被光谱曲线的反射率在波长 750 nm 处接近 0.7,这在大多数植被中是不常见的,这主要是由于研究区干旱的条件与植被中的含水量所导致的^[21]。而 SVR 模型的参数之间微小的变化,可导致预测结果出现极大异质性,这与干旱区绿洲内脆弱的生态环境有着密不可分的关系,使得模型没有在湿润区其他方面的预测结果表现稳定^[22-23];在实验中还发现,在绿洲与荒漠带交错带上的实验点对环境植被指数(HJVI)存在极大不稳定,导致其整体关联度较低,这也是出现在干旱区的特殊现象。对于干旱区绿洲的土壤含水率估算研究,下一步应侧重野外采样点的代表性与扩展性,从而增加模型的稳定与泛化能力,减少不必要的误差,将地面数据与高光谱遥感影像同步匹配,进一步提高干旱区绿洲浅层土壤含水率模型的预测精度。

4 结论

(1)通过实测得到新疆渭库绿洲 41 个植被的高光谱与土壤含水率数据,利用改进的 SVR 模型建立了干旱区绿洲土壤含水率估算模型,并与 MLSR 模型、PLS 模型做精度对比分析。

(2)实验构建 PLS 与 MLSR 回归模型拟合干旱区绿洲浅层土壤含水率, R^2 仅为 0.630 0 与 0.654 9, RMSE 为 3.001、2.749,效果不甚理想,这是由于线性关系描述干旱区土壤含水率与植被光谱还存在一些欠缺,虽然 PLS 模型有提取主成分降维的优势,但仍然难以精准解释干旱区绿洲利用植被实测光谱构建浅层土壤含水率之间的相关性。

(3)实验构建 SVR 模型过程中,经反复训练样本数据,得到最优测试集,并获得了最适宜干旱区绿洲土壤含水率估算的参数定值,最终由最优参数得出的预测值,与实测土壤含水率相关性较高, R^2 高达 0.891 6,进一步表明改进的 SVR 模型有较好的预测精度,可为干旱区绿洲农作物生长、旱情监测提供依据。

冠层反射率,发现植被含水率变化引起的光谱差异不同于土壤含水率变化引起的光谱差异^[18-20]。可

参 考 文 献

- 1 何海兵, 武立权, 杨茹, 等. 干旱区控制灌溉下水稻光合特性与蒸腾效率研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 186 - 193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160927&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.027.
HE Haibing, WU Liqun, YANG Ru, et al. Photosynthesis characteristics and transpiration efficiency of rice plants under controlled irrigation technology in arid region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 186 - 193. (in Chinese)
- 2 赵文智, 刘鹤. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2702 - 2708.
ZHAO Wenzhi, LIU Hao. Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes[J]. Journal of Ecology, 2006, 26(8): 2702 - 2708. (in Chinese)
- 3 王海江, 张花玲, 任少亭, 等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 133 - 138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140721&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.021.
WANG Haijiang, ZHANG Hualing, REN Shaoting, et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 133 - 138. (in Chinese)
- 4 尚松浩, 蒋磊, 杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 81 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151013&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013.
SHANG Songhao, JIANG Lei, YANG Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 81 - 92. (in Chinese)
- 5 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(5): 412 - 417.
WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen. Vegetation-temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412 - 417. (in Chinese)
- 6 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 682 - 689.
MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al. Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of Ningxia and influencing factors: partial least-squares regression (PLS)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 682 - 689. (in Chinese)
- 7 柯郑林. Lasso 及其相关方法在多元线性回归模型中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
KE Zhenglin. The application of Lasso and its related methods in multiple linear regression models[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- 8 VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 52 - 123.
- 9 陈果, 周伽. 小样本数据的支持向量机回归模型参数及预测区间研究[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 92 - 96.
CHEN Guo, ZHOU Jia. Research on parameters and forecasting interval of support vector regression model to small sample[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(1): 92 - 96. (in Chinese)
- 10 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 孔祥德, 等. 干旱区绿洲土地利用景观空间格局动态变化研究—以渭干河-库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 167 - 174.
ZHANG Fei, Tashpolat·TIYIP, KONG Xiangde, et al. Landscape pattern analysis of the dynamic land use changes in the arid regions: a case study in the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers[J]. Resources Science, 2006, 28(6): 167 - 174. (in Chinese)
- 11 张素芳, 马礼. 坝上高原林草地表层土壤含水量对比研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 167 - 170.
ZHANG Sufang, MA Li. Comparative study on surface soil water content of wood land and grassland on Bashang plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 167 - 170. (in Chinese)
- 12 吴海龙, 余新晓, 张振明, 等. 基于多种植被指数的土壤含水量估算方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1615 - 1618.
WU Hailong, YU Xinxiao, ZHANG Zhenming, et al. Soilmoisture estimation model based on multiple vegetation index [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1615 - 1618. (in Chinese)
- 13 李相, 丁建丽. 基于实测高光谱指数与 HSI 影像指数的土壤含水量监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 68 - 75.
LI Xiang, DING Jianli. Soil moisture monitoring based on measured hyperspectral index and HSI image index[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 68 - 75. (in Chinese)
- 14 张波, 牛婷, 房世峰, 等. 荒漠-绿洲交错地带典型植被光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(4): 1104 - 1108.
ZHANG Bo, NIU Ting, FANG Shifeng, et al. Research on the spectral characteristic of typical vegetation in desert-oasis crisscross zone[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 1104 - 1108. (in Chinese)
- 15 王惠文, 刘强. 偏最小二乘回归模型内涵分析方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(4): 473 - 476.
WANG Huiwen, LIU Qiang. Research on the method of partial least squares regression model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(4): 473 - 476. (in Chinese)

- 16 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与 PLS 过程)[J]. 数理统计与管理, 2002, 21(2): 58 - 64.
GAO Huixuan. Statistical analysis of two multiple correlated variables (3) (partial least squares regression and PLS process) [J]. Application of Statistics and Management, 2002, 21(2): 58 - 64. (in Chinese)
- 17 王礼沅, 郭基联, 张恒喜. 递阶偏最小二乘回归在飞机研制费用预测中的应用[J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1380 - 1384.
WANG Liyuan, GUO Jilian, ZHANG Hengxi. Application of hierarchical partial least squares regression to development cost prediction of aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(8): 1380 - 1384. (in Chinese)
- 18 刘云, 宇振荣, 孙丹峰, 等. 冬小麦遥感冠层温度监测土壤含水量的试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 352 - 356.
LIU Yun, YU Zhenrong, SUN Danfeng, et al. Canopy temperature monitoring soil water content based on field experiment of winter wheat[J]. Advance in Water Science, 2004, 15(3): 352 - 356. (in Chinese)
- 19 杨涛, 官辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6264 - 6277.
YANG Tao, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6264 - 6277. (in Chinese)
- 20 刘培君, 张琳. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 135 - 138, 81.
LIU Peijun, ZHANG Lin. A method for estimating soil moisture by satellite remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(2): 135 - 138, 81. (in Chinese)
- 21 高志海, 李增元, 魏怀东, 等. 干旱地区植被指数(VI)的适宜性研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 243 - 248.
GAO Zhihai, LI Zengyuan, WEI Huaidong, et al. Study on the suitability of vegetation indices (VI) in arid area[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 243 - 248. (in Chinese)
- 22 范闻捷, 盖颖颖, 徐希孺, 等. 遥感反演离散植被有效叶面积指数的空间尺度效应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(2): 280 - 286.
FAN Wenjie, GAI Yingying, XU Xiru, et al. Spatial scale effect of remote sensing inversion of vegetation effective leaf index [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(2): 280 - 286. (in Chinese)
- 23 王喜鹏, 张养贞. 应用神经网络模型分解 AVHRR 混合像元[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 51 - 56.
WANG Xipeng, ZHANG Yangzhen. Decomposition of AVHRR mixed pixels using neural network model[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(1): 51 - 56. (in Chinese)

(上接第 283 页)

- 15 ZEGELIN S J, WHITE I, JENKINS D R, et al. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research, 1989, 25(25): 2367 - 2376.
- 16 孙宇瑞, 汪懋华, 赵燕东. 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 37 - 41.
SUN Yurui, WANG Maohua, ZHAO Yandong. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2): 37 - 41. (in Chinese)
- 17 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报, 2002, 43(4): 109 - 111.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 43(4): 109 - 111. (in Chinese)
- 18 赵燕东, 王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量灵敏度分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 5 - 8.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 5 - 8. (in Chinese)
- 19 FERREIRA J, SEOANE F, ANSEDE A, et al. AD5933-based spectrometer for electrical bioimpedance applications[J]. Journal of Physics: Conferences Series, 2010, 224(1): 11 - 12.
- 20 温新华, 颜小飞, 安冬. 基于 AD5933 的便携式阻抗抗仪研制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 1090 - 1095.
WEN Xinhua, YAN Xiaofei, AN Dong. Development of portable impedance meter based on AD5933[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(4): 1090 - 1095. (in Chinese)
- 21 黎步银, 黄兆祥, 幸会, 等. 基于 AD5933 的阻抗频谱设计系统设计与实现[J]. 微计算机信息, 2008, 24(10 - 2): 288 - 290.
LI Buyin, HUANG Zhaoxiang, XING Hui, et al. Designing and implementation of measurement system of impedance spectroscopy analyzer based on AD5933[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(10 - 2): 288 - 290. (in Chinese)
- 22 李静, 陈世利, 靳世久. 基于 AD5933 的阻抗分析仪的设计和实现[J]. 现代科学仪器, 2009, 124(2): 28 - 30.
LI Jing, CHEN Shili, JIN Shijiu. Design of impedance analyzer based on AD5933[J]. Modern Scientific Instruments, 2009, 124(2): 28 - 30. (in Chinese)
- 23 傅元, 吴然, 韩吉声. AD5933 测量水电导率电路设计中的若干问题[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 342(7): 63 - 65.
FU Yuan, WU Ran, HAN Jisheng. Measurement of water conductivity based on AD5933[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011, 342(7): 63 - 65. (in Chinese)
- 24 SCHAAP M G, DE LANGE L, HEIMOVAARA T J. TDR calibration of organic forest floor media[J]. Soil Technology, 1997, 11(2): 205 - 217.