基于光谱指数优选的土壤盐分定量光谱估测

郭 鹏[1], 李 华[2], 陈红艳[1], 刘亚秋[3], 盖岳峰[4], 任 涛[5]

(1. 山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018;
2. 山东菏泽水利工程总公司, 山东 菏泽 274000; 3. 山东凯文科技职业学院, 山东 济南 250200;
4. 山东颐通土地房地产评估测绘有限公司, 山东 济南 250000; 5. 山东省泰安市农业局, 山东 泰安 271018)

摘 要: [目的] 探索基于光谱指数的盐渍土盐分估测的最佳技术路线,为研究区土壤盐分定量、快速遥感监测提供理论基础和技术参考。[方法] 以山东省垦利县为研究区,野外采样,获取盐分及其主要离子(Cl^-,Na^+,Ca^{2+})含量及高光谱数据;然后采用 2 种思路:①先选取敏感波段,进而构建常见的 5 种光谱指数;②先任意两波段组合构建光谱指数,进而筛选敏感光谱指数。最后皆采用随机森林方法(random forest, RF)构建土壤盐分及其主要离子的光谱模型。[结果] 基于筛选的敏感亮度指数(1 750,1 620 nm)的 RF 模型精度最高,作为研究区土壤盐分的最佳估测模型,亮度指数作为最佳光谱指数;思路②明确的特征光谱范围涵盖思路①筛选的敏感波段,更有利于光谱特征分析;思路②建模的结果明显优于思路①;确定最佳技术路线为:任意波段两两组合构建光谱指数后,利用相关分析筛选土壤盐分及其主要离子的敏感光谱指数,进而构建其 RF 模型。[结论] 该技术路线适用于黄河三角洲地区土壤盐渍化信息的有效提取。

关键词: 土壤盐渍化; 高光谱遥感; 随机森林; 黄河三角洲

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)03-0193-07 **中图分类号**: S153.2

文献参数: 郭鹏, 李华, 陈红艳, 等. 基于光谱指数优选的土壤盐分定量光谱估测[J]. 水土保持通报, 2018,38(3):193-199. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.031. Guo Peng, Li Hua, Chen Hongyan, et al. Quantitative spectral estimation of soil salinity based on optimum spectral indices[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(3):193-199.

Quantitative Spectral Estimation of Soil Salinity Based on Optimum Spectral Indices

GUO Peng[1], LI Hua[2], CHEN Hongyan[1], LIU Yaqiu[3], GAI Yuefeng[4], REN Tao[5]

(1. *College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong* 271018, *China*; 2. *Shandong Heze Hydraulic Engineering Corporation, Heze, Shandong* 274000, *China*; 3. *Shandong Kaiwen College of Science & Technology, Jinan, Shandong* 250200, *China*; 4. *Shandong Yitong Real Estate Appraisal and Mapping Corporation, Limited Liability, Jinan, Shandong* 250000, *China*; 5. *Taian Bureau of Agriculture, Taian, Shandong* 271018, *China*)

Abstract: [Objective] To explore the best technical route for salt salinity estimation based on spectral indices in order to provide theoretical basis and technical reference for the quantitative calculation and rapid remote sensing monitoring of soil salinity in the study area. [Methods] Taking Kenli County of Shandong Province as the study area, samples were collected in the field, the content of soil salt and its main ions(Cl^-, Na^+, Ca^{2+})were measured, and the hyperspectra were obtained. Two different methods were used to select the sensitive spectral indices. The first one was to select the sensitive bands of salt and its major ions and then to build five spectral indices. The second one was to combine any two bands and to construct the five spectral indices, and the sensitive spectral indices were then filtered. The random forest(RF) method was used to build quantitative hyperspectral models of soil salinity and ions contents. [Results] The RF model of brightness

收稿日期:2017-12-25 **修回日期**:2018-01-14

资助项目:国家科技支撑计划"华北平原小麦-玉米轮作区高效施肥技术研究与示范"(2015BAD23B02); 山东农业大学"双一流"奖补资金资助(SYL2017XTTD02);山东省重点研发计划盐渍土快速改良与地力培肥产品的研发与应用(2017CXGC0306)

第一作者:郭鹏(1993—),男(汉族),山东省肥城市人,硕士研究生,研究方向为土壤定量遥感与信息化。E-mail:392467125@qq.com。

通讯作者:陈红艳(1979—),女(汉族),山东省郓城县人,副教授,博士,主要从事土壤定量遥感与信息化研究。E-mail:chenhy@sdau.edu.cn。

spectral indices(1 750, 1 620 nm)exhibited the best precision, thus it was the best estimation model of soil salinity in the study area, and the brightness spectral index was the best spectral index. The characteristic spectral range based on the second method covered the selected sensitive bands based on the first method, thus was more conducive to the spectral characteristics analysis. Meanwhile, the salt prediction model built based on the second method was better than that on the first one. Therefore, the best technical route was to construct the spectral indices by combination of any two bands firstly, then to select the sensitive spectral index of soil salinity and its main ions by correlation analysis, finally to build the RF model. [Conclusion] The technical route is suitable for the extraction of soil salinization information in the Yellow River delta.

Keywords: soil salinization; hyperspectral remote sensing; random forest; Yellow River delta

黄河三角洲地区是中国滨海盐碱地分布的重要地带,多数土壤盐渍化,严重制约着黄河三角洲地区高效生态农业的发展,快速、准确获取盐渍土信息是盐渍土治理和利用的必要前提[1-3]。基于高光谱数据开展盐渍土信息的定量分析已成为研究热点,并取得了积极的成绩[4-6]。王丽娜等[7]在分析盐渍土光谱曲线变化规律的基础上,确定(1 490～1 608,1 900～1 950 nm)作为黄河三角洲盐分敏感范围,利用主成分回归方法估测黄河三角洲地区土壤盐分含量。朱赟等[8]在土壤修复过程中针对 8 种光谱数据集,基于相关系数的极值和不同相关系数范围两种方法筛选土壤最佳敏感波段,利用偏最小二乘法以全波段与最佳响应波段两种方法建立土壤含盐量的光谱反演模型。

现有研究中有许多是基于光谱指数构建的盐分定量估测模型,而且光谱指数的构建与筛选有两种思路:一是先进行相关分析选取敏感波段,利用敏感波段构建光谱指数然后进行模型的建立及其验证,如张同瑞等[9]基于野外敏感光谱波段构建光谱指数,进而构建了 18 种模型并进行验证优选,最终确定以土壤调整植被指数(soil adjust vegetation radiation, SAVI)的线性模型为最佳的黄河三角洲地区盐分状况反演及分析模型;蔡东全[10]探究了不同盐渍化程度下土壤的光谱特征规律采用相关分析获得了敏感特征波段、通过多元线性回归分析构建了土壤全盐含量高光谱估测模型,并建立了土壤波谱库、采用波谱角分类法获得了土壤盐渍化信息。二是对全部波段两两组合直接构建光谱指数,然后利用相关分析筛选敏感的光谱指数和波段,进而进行模型的建立及其验证。如黄帅等[11]通过光谱分析技术计算高光谱指数,与土壤样本含盐量进行相关性分析,筛选出土壤含盐量的光谱特征指数和波段,基于逐步多元线性回归(multiple line regression, MLR)和偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)建立土壤盐分动态监测模型。如蒲智等[12]运用统计方法分析了 5 种高光谱指数与土壤含盐量的定量关系,确定了能提高盐渍土含盐量估算精度的最佳光谱指数及定量预测模型。可见,现有研究多是单独基于其中一种思路开展研究,对于两者的对比和优选未见报道。因此,本文拟分别采取两种思路进行建模:一种是基于筛选的敏感波段构建光谱指数进行建模;另一种是先波段两两组合构建光谱指数,然后基于筛选的敏感光谱指数进行建模,进而对两种结果进行对比。优选基于光谱指数的盐渍土盐分最佳定量模型,从而提出盐渍土盐分快速准确估测的技术路线,为研究区土壤盐分定量、快速遥感监测提供理论基础和技术参考,从而为盐渍土的治理、利用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以山东省垦利县为研究区,该区位于黄河最下游入海口处,东濒渤海,地处 37°24′—38°10′N,118°15′—119°19′E,县域呈西南、东北走向,南北纵距 55.5 km,东西横距 96.2 km。属温带季风气候区,受海水影响所致,土壤为滨海潮盐土,盐分组成以钠型盐氯化物为主,主要盐分离子是 Cl^-,Na^+ 和 Ca^{2+}。该地区基本涵盖了黄河三角洲的不同的盐渍化程度、微地貌类型、土壤地质,具有代表性。

1.2 土壤样本采集及土样室内分析

2014 年 10 月 5—9 日野外采集土样,根据研究区耕地面积和土壤盐渍化状况,均匀布局采样点。采样深度为 0—20 cm,记录 GPS 位置和相应环境信息,取土 1 kg 左右,装入密封袋内,共采集土样 96 个。将采集的土样自然风干、敲碎,剔除其他侵入体,过筛(2 mm),并混合均匀,分成 2 份。土壤盐分及其组分的测定使用电导率,Cl^- 采用硝酸银容量法测定,Na^+ 采用火焰光度法测定,Ca^{2+} 采用原子吸收分光光度法测定[13-15]。

1.3 光谱测定

采用美国 ASD Fieldspec 4 光谱仪[16-17]于室内采集土壤高光谱数据,该光谱仪光谱范围为 350～2 500,350 ～ 1 000 nm 范围内光谱采样间隔为

1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm,在 1 000～2 500 nm 范围内光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。光谱重采样间隔为 1 nm,共输出 2 151 个波段。

光谱测定在等同于暗室的实验室内进行,将盛样皿内土壤稍稍刮平,使其表面尽量平整,将装满土样的盛样皿放在反射率近似为 0 的黑色橡胶垫上,采用功率为 50 W 卤素灯作为光源,探头视场角为 25°,光源入射角度为 45°,光源距离为 30 cm,探头距离为 15 cm。每次采集目标光谱前后都进行参考板校正,在视场范围内重复测量 10 次,为降低土样光谱各向异性的影响,测量时转动盛样皿 3 次,每次转动角度约 90,获取土样 4 个方向的光谱曲线,取算术平均后得到该土样的反射光谱数据[18-20]。

1.4　光谱预处理

为消除土样高光谱数据的噪声影响,对可见光到近红外(350～1 300 nm)波段,采用移动平均法去噪,对短波红外(1 301～2 500 nm)采用 9 点加权抽样平滑去噪;将去噪后的光谱数据去除受外界噪声影响较大的边缘波段 350～399 nm 和 2 451～2 500 nm 两段数据,将其余波段(400～2 450 nm)数据作为土样的实际光谱反射数据;对光滑后的反射率进行一阶导数变换,并将样点的一阶导数光谱作为输入光谱。

1.5　基于敏感波段的光谱指数构建

首先对研究样本的土壤盐分及其主要离子含量与反射率的一阶导数光谱进行逐波段的相关分析,计算相关系数,按照相关系数高且显著的原则,选取各自的敏感波段;其次根据盐分及其主要离子敏感波段的交叉情况选取具有极值相关系数的波段作为特征敏感波段;最后利用特征敏感波段构建光谱指数:盐度指数(salt indices,SI)、亮度光谱指数(brightness spectral indices,BSI)、差值光谱指数(difference spectral indices,DSI)、比值盐分指数(ratio salt indices,RSI)和归一化光谱指数(normalized difference spectral indices,NDSI)。光谱指数公式见表 1。

表 1　盐分光谱指数及其公式

光谱指数	公式
SI	$\sqrt{b_1 \times b_2}$
BSI	$\sqrt{b_1^2 + b_2^2}$
DSI	$b_1 - b_2$
RSI	$\frac{b_1}{b_2}$
NDSI	$\frac{b_1 - b_2}{b_1 + b_2}$

注:b_1 和 b_2 为敏感波段,分别为相关系数的极大值和极小值。

1.6　敏感光谱指数筛选

采用表 1 中的公式计算 400～2 000 nm 任意 2 波段组合而成的 SI,BSI,DSI,RSI 和 NDSI,分析它们与土壤盐分及主要离子含量的关系,用等势图表示,分别选择相关系数较大的指数为敏感光谱指数。具体算法通过 Matlab R2014a,SPSS 20.0,Excel 2010 软件实现。

1.7　估测模型构建与验证

首先将土样分组,按照盐分含量进行排序,每间隔 1 个选择 2 个样本作为建模集,其余样本为验证集,从而 96 个样本分为 2 组,一组 64 个用于建模,另一组 32 个用于验证。然后分别基于光谱指数和敏感光谱指数,采用随机森林(random forest,RF)方法构建盐渍土盐分及其主要离子(Cl^-,Na^+,Ca^{2+})含量的高光谱估测模型。随机森林是 Breiman(2001)提出的一个组合类器算法,是由许多单棵分类回归树组合而成的,最后由投票法决定分类结果,由于两个随机性的引入,随机森林不容易陷入过拟合,且具有较好的抗噪声能力,对数据集的适应能力强[21]。对构建的模型利用 32 个验证样本数据进行检验,评价参数如下:建模精度采用建模集预测值和实际值的决定系数 R_C^2 和均方根误差(root mean squares error,RMSEc)来评价;预测精度采用验证集预测值和实际值的决定系数 Rv^2,均方根误差 RMSEv 和相对分析误差(relative prediction deviation,RPD)来评价[22-23]。最后根据建模和验证参数来优选最佳光谱指数和模型,并优选基于光谱指数的土壤盐分定量估测技术路线。

2　结果与分析

2.1　土壤样本描述性统计分析

对 96 个土样的盐分及其主要离子含量进行描述性统计分析(表 2)。土样盐分含量为 0.14%～3.08%,平均值为 0.95%,标准差为 0.88%,变异系数为 0.92%,表明研究区土壤盐分含量普遍较高,盐渍化程度不同;盐分离子中 Cl^-,Na^+ 含量较高,且变异性较大,应能较好地反映土壤盐渍化程度。

表 2　盐分及主要离子统计分析　　%

待测指标	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
Salt	3.08	0.14	0.95	0.88	0.92
Cl^-	1.54	0.01	0.21	0.31	1.48
Na^+	1.30	0.00	0.11	0.21	1.83
Ca^{2+}	0.06	0.03	0.03	0.01	0.00

2.2 基于敏感波段的光谱指数

基于研究样本的土壤盐分及其主要离子含量与反射率一阶导数的相关分析结果(如图1所示),可见具有较高相关系数的敏感波段集中于1 070～1 955和2 010～2 366 nm,而且多有交叉。按照相关系数高且显著的原则,选取敏感波段为1 493,1 801,1 911和2 289 nm,根据敏感波段的交叉情况选取具有极值相关系数的波段作为特征敏感波段(1 493,1 911 nm),最后利用特征敏感波段构建光谱指数(SI,BSI,DSI,RSI和NDSI)。

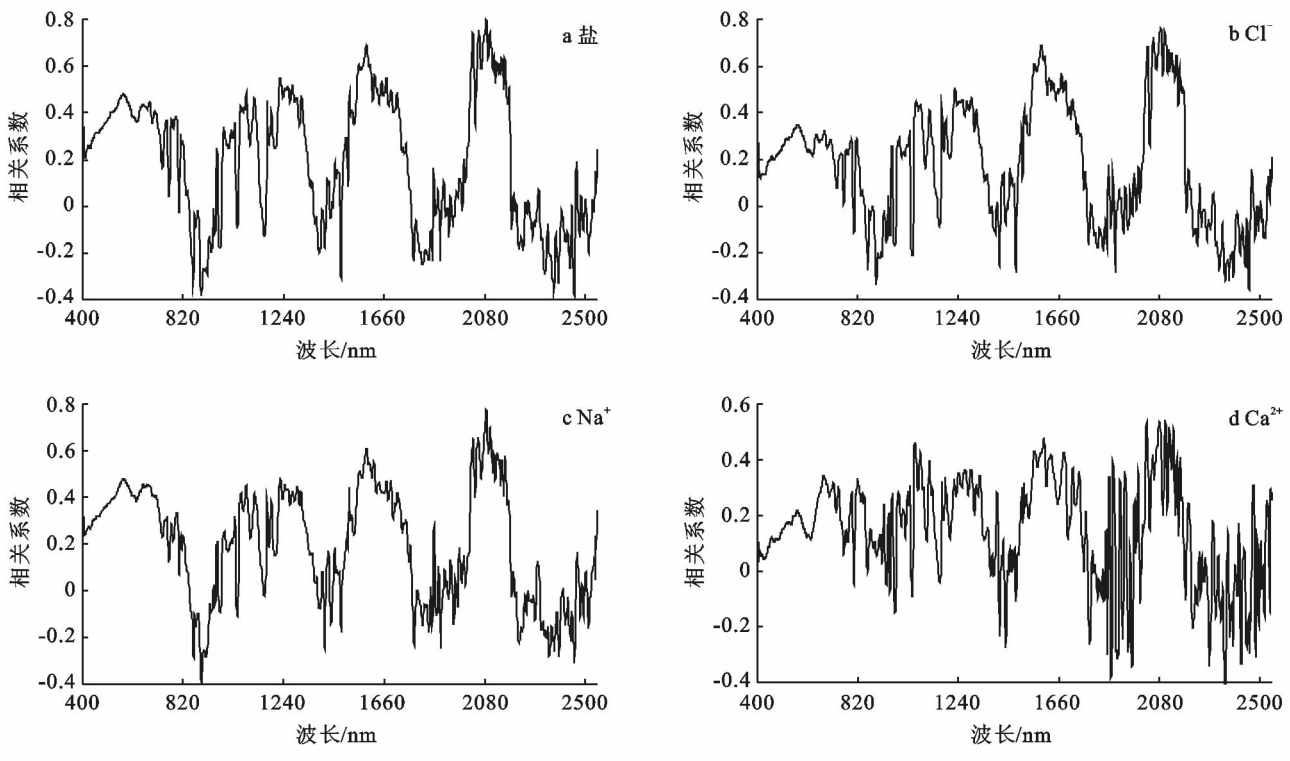


图1 土壤含盐量与一阶导数光谱的相关系数

2.3 基于光谱指数的土壤盐分及其离子估测模型

基于光谱指数,采用随机森林(RF)方法构建土壤盐分及主要离子含量的高光谱估测模型(表3)。对比光谱指数的表现,各个光谱指数与土壤盐分及其主要离子的决定系数、均方根误差、相对误差的平均值分别为:SI为0.56,0.18,1.86;BSI为0.32,0.04,1.02;DSI为0.45,0.98,1.56;RSI为0.41,0.11,1.18;NDSI为0.58,0.35,1.82。可见光谱指数最佳是BSI,其次是RSI,DSI,最后是SI,NDSI。

对比盐分及其主要离子的预测精度,对于盐分、Cl^-和Na^+,随机森林方法构建的模型均可有效地用于其定量分析,比较而言,盐分模型R_V^2大于0.67,RPD大于2.16,其次是Cl^-,模型R_V^2为0.63～0.81,RPD为1.01～2.39;再次是Na^+,模型R_V^2为0.04～0.68,RPD为1.03～1.80;Ca^{2+}预测精度最低,模型R_V^2为0.98～1.18,RPD为0.98～1.48。

2.4 敏感光谱指数的筛选

计算400～2 000 nm任意2波段组合而成的上述5种光谱指数,光谱指数与土壤盐分及其主要离子含量的相关系数用abs等势图来表示,以盐分与5种光谱指数的等势图为例,在SI,BSI,NDSI,RSI,DSI中光谱指数与土壤盐分及其主要离子含量之间的相关系数总体较为一致,总体表现为近红波段与可见光波段光谱指数与盐分的相关性较好,敏感的光谱范围为1 430～1 862,1 934～2 150 nm,涵盖思路一筛选的敏感波段(1 493和1 911 nm),更有助于盐分及其主要离子光谱特征的分析(表3)。

不同光谱指数与盐分相关系数最大值及最佳分布有一定差异,以盐分与5种光谱指数的相关系数、值域分析为例:SI与盐分的相关系数值在波段(1 200,1 650 nm)达到0.6左右,在(1 800,1 613 nm)相关系数达到最大值0.75左右;BSI在波段(1 215,1 615 nm)相关系数值达到0.7左右,在(1 750,1 620 nm)相关系数最大值达到0.8左右;DSI在波段(1 150,1 550 nm)相关系数值达到0.6左右,在(1 700,1 500 nm)相关系数达到最大0.7左右;RSI在(1 200,600 nm)相关系数值达到0.5,在(1 700,600 nm)相关系数最大值达到0.6左右;

NDSI在波段(1 150,550 nm)相关系数值达到 0.5 左右,在(1 650,600 nm)相关系数最大值达到 0.7 左右。说明 5 种光谱指数与土壤盐分及其主要离子有着比较密切的关系,因此,选定 5 种光谱指数相关系数值大的波段为敏感光谱指数 SI(1 800,1 613 nm),BSI(1 750,1 620 nm),DSI(1 700,1 500 nm),RSI(1 700,600 nm)和 NDSI(1 650,600 nm),分别作为输入变量构建盐分及其主要离子含量估测模型。

表 3　基于光谱指数的盐分及其离子模型比较

光谱指数	待测指标	建模集		验证集		相对分析误差 RPD
		决定系数 R_C^2	均方根误差 $RMSE_C$	决定系数 R_V^2	均方根误差 $RMSE_V$	
SI	盐	0.97	0.16	0.67	0.44	2.16
	Cl^-	0.94	0.06	0.69	0.21	1.84
	Na^+	0.92	0.02	0.54	0.05	1.50
	Ca^{2+}	0.79	0.00	0.20	0.01	1.18
BSI	盐	0.97	0.16	0.82	0.44	2.40
	Cl^-	0.94	0.06	0.63	0.23	1.68
	Na^+	0.93	0.02	0.61	0.05	1.60
	Ca^{2+}	0.79	0.00	0.38	0.01	1.18
DSI	盐	0.52	0.67	0.00	1.03	1.02
	Cl^-	0.60	0.16	0.00	0.38	1.01
	Na^+	0.61	0.04	0.04	0.07	1.03
	Ca^{2+}	0.26	0.01	0.00	0.01	0.98
RSI	盐	0.97	0.18	0.87	0.37	2.84
	Cl^-	0.95	0.06	0.81	0.17	2.32
	Na^+	0.91	0.02	0.67	0.04	1.80
	Ca^{2+}	0.74	0.00	0.48	0.00	1.48
NDSI	盐	0.97	0.16	0.81	0.45	2.34
	Cl^-	0.94	0.11	0.82	0.16	2.39
	Na^+	0.91	0.02	0.68	0.04	1.80
	Ca^{2+}	0.78	0.00	0.00	0.01	0.99

2.5　基于敏感光谱指数的土壤盐分及其主要离子估测模型

基于敏感光谱指数,采用随机森林(RF)方法构建土壤盐分及主要离子含量的高光谱估测模型(表 4)。各个光谱指数与土壤盐分及其主要离子的平均值分别为:SI 为 0.86,0.38,1.76;BSI 为 0.32,0.02,1.01;DSI 为 0.55,0.96,2.56;RSI 为 0.42,0.21,1.16;NDSI 为 0.96,0.84,1.92。可见光谱指数最佳是 BSI,其次是 RSI,DSI,最后是 SI,NDSI。可见光谱指数最佳是 BSI,其次是 RSI,DSI,最后是 SI,NDSI。

从对盐分及其离子分析的精度对比,基于敏感光谱指数的随机森林模型均可有效地进行盐和 Cl^-,Na^+ 和 Ca^{2+} 定量分析,比较而言盐分模型 R_V^2 均大于 0.81,RPD 均大于 2.36,预测精度高且稳定;其次是 Cl^-,模型 R_V^2 均大于 0.81,RPD 均大于 2.30;再次是 Na^+,模型 R_V^2 为 0.47～0.78,RPD 为 1.38～2.10;最后是 Ca^{2+} 预测精度,R_V^2 为 1.23～1.57,RPD 为 1.23～1.57。该结果与基于光谱指数的土壤盐分及其主要离子估测模型一致。

对比 2 种思路,思路一中土壤盐分及其主要离子估测模型精度为:盐分模型 R_V^2 为 0.67～0.81,RPD 为 1.02～2.84;Cl^- 模型 R_V^2 为 0.63～0.82,RPD 为 1.01～2.32;Na^+ 模型 R_V^2 为 0.04～0.68,RPD 为 1.03～1.86;Ca^{2+} 模型 R_V^2 为 0.20～0.48,RPD 为 0.98～1.48。思路二中土壤盐分及其主要离子估测模型精度为:盐分模型 R_V^2 为 0.81～0.91,RPD 为 2.16～3.19;Cl^- 模型 R_V^2 为 0.68～0.92,RPD 为 2.30～2.75;Na^+ 模型 R_V^2 为 0.47～0.78,RPD 为 1.37～2.10;Ca^{2+} 模型 R_V^2 为 0.43～0.61,RPD 为 1.23～1.57。可见,无论对于盐分还是主要离子含量,思路二的建模精度均明显优于思路一。

综上,确定黄河三角洲盐渍土最佳光谱指数为 BSI(1 750,1 620 nm),土壤盐分及其主要离子最佳定量模型为基于 BSI(1 750,1 620 nm)的随机森林模型;土壤盐分及其主要离子定量分析的最佳路线为:首先任意波段两两组合构建光谱指数,然后利用相关分析筛选土壤盐分及其主要离子的敏感光谱指数,进而构建其随机森林估测模型。

表 4 基于敏感光谱指数的盐分及其离子模型

光谱指数	待测指标	建模集		验证集		相对分析误差 RPD
		决定系数 R_C^2	均方根误差 $RMSE_C$	决定系数 R_V^2	均方根误差 $RMSE_V$	
SI	salt	0.86	0.39	0.81	0.48	2.16
	Cl^-	0.82	0.11	0.81	0.17	2.30
	Na^+	0.86	0.03	0.48	0.05	1.40
	Ca^{2+}	0.80	0.42	0.53	0.52	1.38
BSI	salt	0.94	0.24	0.88	0.36	2.89
	Cl^-	0.91	0.08	0.92	0.14	2.75
	Na^+	0.85	0.03	0.78	0.03	2.10
	Ca^{2+}	0.83	0.33	0.61	0.46	1.57
DSI	salt	0.97	0.18	0.89	0.35	3.01
	Cl^-	0.93	0.07	0.91	0.17	2.32
	Na^+	0.92	0.02	0.61	0.05	1.59
	Ca^{2+}	0.80	0.47	0.56	0.48	1.49
RSI	salt	0.97	0.18	0.91	0.33	3.19
	Cl^-	0.89	0.09	0.84	0.16	2.45
	Na^+	0.91	0.02	0.70	0.04	1.79
	Ca^{2+}	0.78	0.48	0.43	0.58	1.23
NDSI	salt	0.84	0.40	0.84	0.41	2.53
	Cl^-	0.84	0.11	0.68	0.23	2.65
	Na^+	0.76	0.03	0.47	0.05	1.37
	Ca^{2+}	0.75	0.47	0.58	0.52	1.38

图 2 为思路二基于 BSI 盐分及其主要离子的 RF 模型的预测值和实测值的散点图。可见，样本较为均匀地分布在 1∶1 线的两侧，表明预测值和实测值整体呈现较好的线性关系。

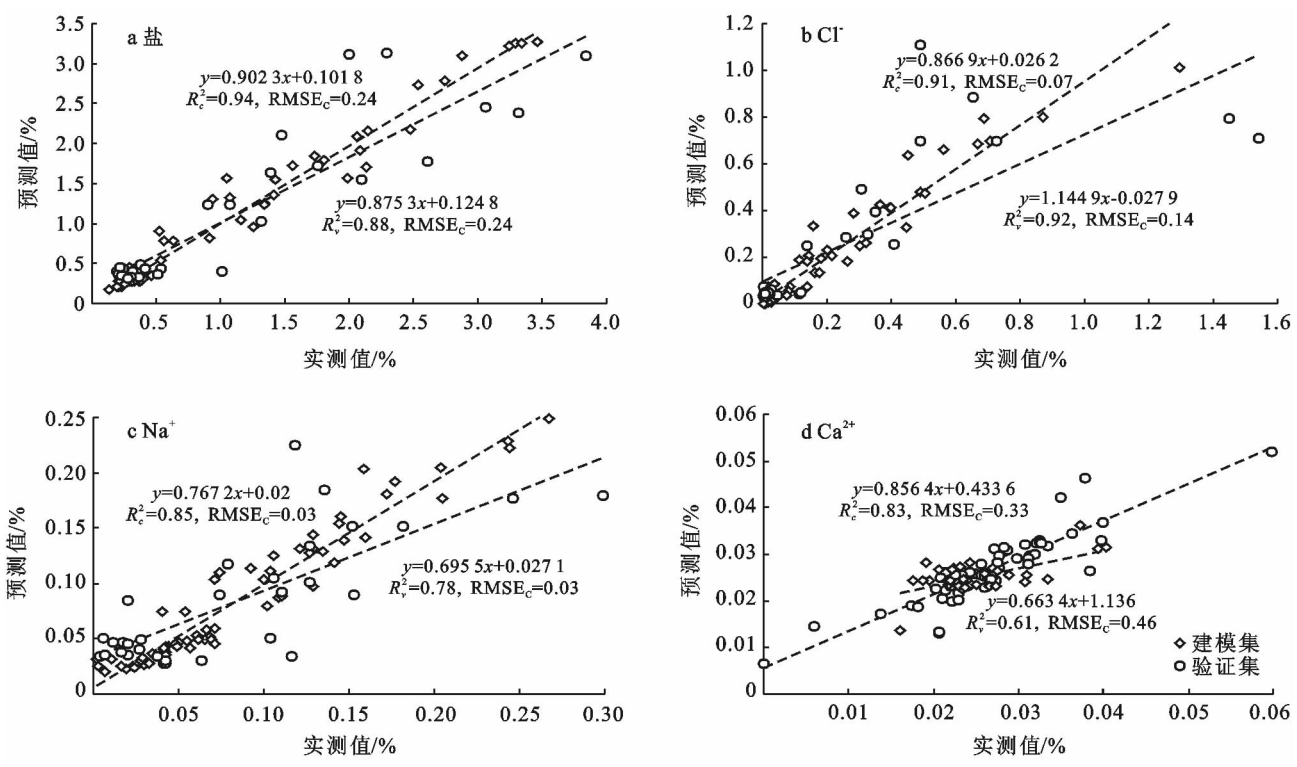


图 2 盐分及其主要离子 RF 模型预测值和实测值关系

3 讨 论

在以往的研究中,张同瑞等[9]以山东省无棣县“渤海粮仓”项目核心示范区为研究区,采用思路一的方法进行土壤含盐量模型的建立及其验证,研究得出以土壤调整植被指数(soil adjust vegetation radiation,SAVI)为因变量构建的模型估测效果最好,相关系数 R^2 为 0.797。黄帅等[11]以新疆渭干河—库车河三角洲绿洲为例,采用思路二的方法进行土壤盐分模型的建立及其验证,研究表明偏最小二乘回归模型的预测值和实测值一致性很好,相关系数 R^2 为 0.873。可见,前人研究也表明采用思路二建模结果的精度优于思路一,本文研究结果亦是如此。这可能是由于思路一先采用相关分析筛选到 2 个波段再组合建模,而思路二先两两组合信息再筛选光谱指数,模型入选变量在综合波段信息的基础上再利用相关分析筛选更有针对性。

本文以黄河三角洲山东省垦利县为研究区,构建了 5 种光谱指数(SI,BSI,DSI,RSI 和 NDSI),并进行了对比,研究表明,对该研究区土壤盐分定量估测,亮度指数 BSI 表现最佳。然而关红等[24]在对龟裂碱土盐碱化信息提取分析中,表明协同盐分指数 SI 和植被指数 MSAVI 构造的土壤盐渍化指数模型模拟效果很好,由此可见不同的光谱指数对不同区域土壤盐分定量估测是不同的。因此本研究筛选的光谱指数对于其他差异较大盐渍土的适用性还有待研究核实。

4 结 论

(1) 确定黄河三角洲盐渍土盐分及其主要离子定量估测的最佳光谱指数和模型。本文构建了 5 种光谱指数(SI,BSI,DSI,RSI 和 NDSI),对比模型表现,基于筛选敏感亮度指数 BSI(1 750,1 620 nm)的随机森林模型精度最高(R^2_V 为 0.88～0.92,$RMSE_V$ 为 0.03～0.13,RPD 为 2.10～3.10)因此,该模型作为黄河三角洲盐渍土盐分及其主要离子定量估测的最佳模型,亮度指数 BSI 作为最佳光谱指数。

(2) 确定土壤盐分及其主要离子定量分析的最佳路线。本文采用两种思路构建并优选光谱指数,一方面,模型精度表明采用思路二建模的结果明显优于思路一;另一方面,思路二明确的光谱范围(1 430～1 862和 1 934～2 150 nm)涵盖思路一筛选的敏感波段(1 493 和 1 911 nm),更有利于盐分及其主要离子的光谱特征分析。因此,本文确定土壤盐分及其主要离子定量分析的最佳路线为:首先任意波段两两组合构建光谱指数,然后利用相关分析筛选土壤盐分及其主要离子的敏感光谱指数,进而构建其随机森林估测模型。

[参 考 文 献]

[1] 安德玉,赵庚星,常春艳,等. 基于野外高光谱的黄河三角洲滨海盐渍土盐分含量估测研究[J]. 土壤通报,2015,6(4):843-850.

[2] 刘亚秋,陈红艳,王瑞燕,等. 基于可见/近红外黄河口区土壤盐分及其主要离子的定量分析[J]. 中国农业科学,2016,49(10):1925-1935.

[3] Weng Yongling, Gong Peng, Zhu Zhiling. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River delta region of China using EO-1 hyperion data[J]. Pedosphere, 2010,20(3):378-388.

[4] 吕真真,刘光明,杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. 土壤学报,2013,50(2):290-295.

[5] Dehni A, Lounis M. Remote sensing techniques for salt affected soils mapping: Application to the Oran Region of Algeria[J]. Procedia Engineering, 2012,33(1):188-198.

[6] 代希君,彭杰,张艳丽,等. 基于光谱分类的土壤盐分含量预测[J]. 土壤学报,2016,53(4):910-917.

[7] 王丽娜,朱西存,刘庆,等. 黄河三角洲盐碱土盐分的高光谱定量估测研究[J]. 土壤通报,2013,44(5):1101-1106.

[8] 朱赟,申光荣,王紫君,等. 土壤修复过程中盐含量及其光谱特征分析研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(5):1507-1513.

[9] 张同瑞,赵庚星,高明秀,等. 基于近地面多光谱的黄河三角洲典型地区土壤含盐量估算研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(1):248-253.

[10] 蔡东全. 潍坊海咸水入侵区土壤盐分高光谱估测研究[D]. 济南:山东师范大学,2016.

[11] 黄帅,丁建丽,李相,等. 土壤盐渍化高光谱特征分析与建模[J]. 土壤通报,2016,47(5):1043-1047.

[12] 蒲智,于瑞德,尹昌应,等. 干旱区典型盐碱土壤含盐量估算的最佳高光谱指数研究[J]. 水土保持通报,2012,32(6):130-133.

[13] 彭杰,王加强,向红英,等. 土壤含盐量与电导率的高光谱反演精度对比研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(2):510-514.

[14] 贾永倩,王振锡,吴智乐,等. 杏树落果前后叶绿素含量的高光谱估算模型[J]. 森林工程,2016,32(6):1-9.

[15] 陈红艳,赵庚星,李希灿,等. 小波分析用于土壤速效钾含量高光谱估测研究[J]. 中国农业科学,2012,45(7):1425-1431.

[16] 王丽爱,马昌,周旭东,等. 基于随机森林回归算法的小麦叶片 SPAD 值遥感估算[J]. 农业机械学报,2015,26(1):259-265.

(下转第 205 页)

化面积减少了 1 872.6 hm^2,非沙化土地面积增加了 809.2 hm^2。沙化土地以固定沙地为主,到 2014 年半固定沙地多转化为固定沙地。

对造成研究区土地沙化的土地利用类型、气候、地貌驱动因子进行分析,结果表明,沙化区主要土地利用类型为耕地和草地,而林地分布区土壤沙化程度低,林地面积增加能降低土地沙化。到 2014 年,林地面积增加 40 565.0 hm^2,草地面积减少 52 349.7 hm^2。研究区气候类型以干旱、半干旱为主,到 2014 年干旱区沙化面积为 50 345.7 hm^2,半干旱区沙化面积为 34 351.4 hm^2,干旱区沙化面积显著高于半干旱区。低山和高原是研究区的主要地貌类型,沙化土地集中分布区的地貌类型以高原为主,且高原区土地沙化面积大于低山区,2009 年高原区土地沙化面积比低山区多 14 393.5 hm^2,2014 年高原区土地沙化面积比低山区多 13 005.6 hm^2。

土壤沙化受多方面因素的共同影响。近 5 a 来土壤沙化出现好转,这与合理利用土地密不可分,多植树造林,有助于减少土壤流失,研究表明在该地区干旱环境条件下的高原区更容易造成土壤沙化,因此,要特别注重该地区的土地利用,要合理开发利用。

[参 考 文 献]

[1] 王静洁,蔡延玲.青海湖及其周围地区沙化土地变化动态研究[J].湖南林业科技,2016,43(6):81-89.

[2] 张浩,余军,王锋,等.陕西省荒漠化、沙化土地监测与动态变化分析[J].西北林学院学报,2015,30(1):184-188.

[3] 李金亚.科尔沁沙地草原沙化时空变化特征遥感监测及驱动力分析[D].北京:中国农业科学院,2014.

[4] 何介南,徐杰,康文星,等.若尔盖县土地沙化程度演变动态特征[J].林业科学,2016,52(1):159-165.

[5] 薛占金,秦作栋,孟宪文.晋北地区环境特征及其土地沙化机制研究[J].水土保持研究,2011,18(2):98-102.

[6] 汪晓菲,何平,康文星.若尔盖县土地沙化现状及沙化发展动态特征[J].中南林业科技大学学报,2014,34(12):124-129.

[7] 白龙,刘利民,小林達明,等.基于 3S 的黄土高原北部土地沙化分析:以陕西省神木县为例[J].草业科学,2010,27(12):32-37.

[8] 邓东周,杨执衡,陈洪,等.青藏高原东南缘高寒区土地沙化现状及驱动因子分析[J].西南林业大学学报,2011,31(5):27-32.

[9] 朱洪如.福建沿海土地沙化自然和人为驱动机制定量研究[J].林业勘察设计,2016,36(4):37-39,44.

[10] 刘全友.河北省坝上地区气候与沙化关系的研究[J].环境科学进展,1994,2(6):47-57.

[11] 张蓉.面向对象的遥感图像分类方法在土地利用土地覆盖中的应用研究[D].昆明:西南林学院,2008.

[12] 韩广,杨文斌.沙漠化土地等级划分问题的初步研究[J].中国沙漠,1997,17(3):237-242.

[13] 郭靖,刘萍,高亚琪,等.基于 RS 和 GIS 的托克逊县沙化土地时空动态分析与评价[J].林业资源管理,2009(1):89-94.

[14] 姜英,谷春莲,孙景梅,等.基于 RS 的塔里木河下游沙化土地/植被盖度动态变化研究:以尉犁县为例[J].西北林学院学报,2008,23(5):193-197.

[15] 王晓青,杨联安,姜英,等.毛乌素沙地南缘湿地/沙化土地动态变化分析[J].西北林学院学报,2007,22(4):73-77.

[16] 罗志成,王密侠.中国干旱地区及其类型划分的研究现状[J].干旱地区农业研究,1987(2):95-116.

[17] 周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地 1∶100 万数字地貌分类体系研究[J].地球信息科学学报,2009,11(6):707-724.

(上接第 199 页)

[17] Mashimbye Z E, Cho M A, Nell J P, et al. Model-based integrated methods for quantitative estimation of soil salinity from hyperspectral remote sensing data: A case study of selected South African soils [J]. 2012, 22(5): 640-649.

[18] Lee S, Chol H, Cha K, et al. Random forest as a potential multivariate method for near-infrared (NIR) spectroscopic analysis of complex mixture samples: gasoline and naphtha [J]. Microchemical Journal, 2013,110:739-748.

[19] 马驰.基于 HJ-1A 高光谱影像的土壤盐碱化遥感研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):180-184.

[20] Bouaziz M, Matschullat J, Gloaguen R. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2011,343(11):795-803.

[21] 史舟.土壤地面高光谱遥感原理与方法[M].北京:科学出版社,2014:46-47.

[22] Minasny B, McBratney A B, Bellon-Maurel V, et al. Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2011,167:118-124

[23] 翁永玲,戚浩平,方洪宾,等.基于 PLSR 方法的青海—共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演[J].土壤学报,2010,47(6):1256-1263.

[24] 关红,贾科利,张至楠.采用高光谱指数的龟裂碱土盐碱化信息提取与分析[J].红外与激光工程,2010,43(12):4154-4158.