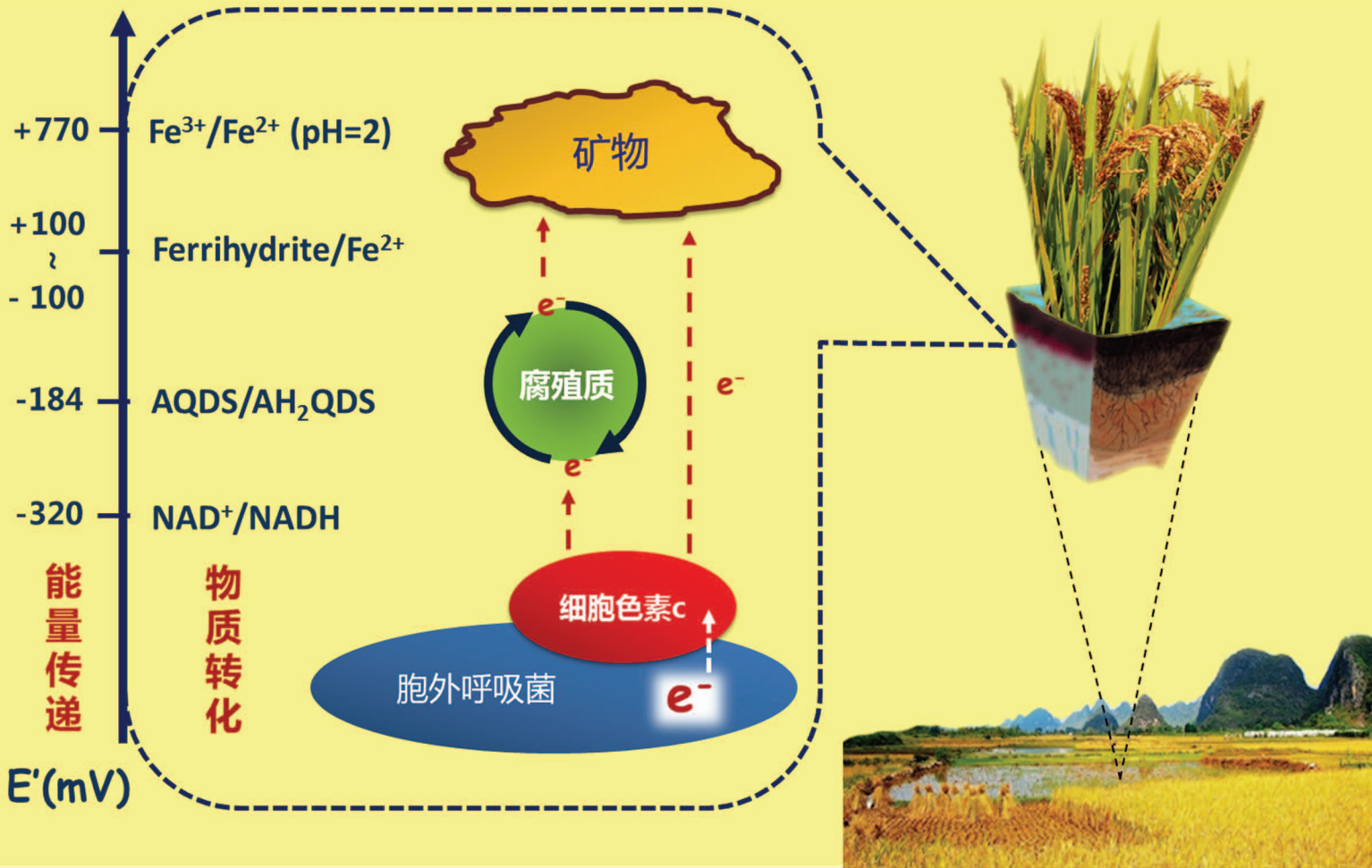


Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

目 次

综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 S_3 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演*

刘 娅¹ 潘贤章^{1†} 石荣杰^{1, 2} 李燕丽^{1, 2} 王昌昆¹ 李志婷^{1, 2}

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 植被对土壤光谱的干扰是目前土壤盐渍化遥感监测的重要限制因素之一, 探索消除稀疏植被覆盖区植被对光谱影响的方法, 对提高土壤含盐量遥感反演精度具有重要意义。本文通过对 189 组不同植被覆盖度且不同盐渍化程度种植微区野外实测地表可见-近红外反射光谱进行分析, 比较并评价了基于原始光谱和盲源分离(blind source separation, BSS)后光谱预测土壤含盐量的结果。结果表明: 地表植被覆盖严重影响基于可见-近红外反射光谱的土壤含盐量反演精度。盲源分离方法, 尤其是基于方程 $z = \tanh(y)$ 的独立分量分析(independent components analysis, ICA)算法, 可有效分解植被和土壤的混合光谱, 并提高植被覆盖下基于可见-近红外反射光谱的土壤含盐量反演精度。该方法为植被覆盖区大尺度土壤盐渍化遥感监测提供了方法指导。

关键词 稀疏植被覆盖; 可见-近红外反射光谱; 土壤含盐量; 盲源分离

中图分类号 TP79; S151.9*5 **文献标识码** A

土壤盐渍化是世界性生态环境问题之一, 也是导致土壤荒漠化和土壤退化的主要诱因之一。盐渍化土壤中的可溶性盐, 严重影响作物生长, 并威胁作物产量, 是农业可持续发展的重要限制因素。近年来, 全球盐渍化以及次生盐渍化土壤的面积不断增加, 因此, 对盐渍化土壤的盐渍化程度、面积以及空间分布的实时、动态监测尤为重要, 这也是制订综合治理措施, 合理利用土地的关键。传统监测土壤盐渍化的方法, 主要依靠野外采样, 不仅耗费大量人力、物力以及财力, 且结果易受采样范围、采样时间及样点空间分布影响。遥感方法以其覆盖面积大、更新速度快、经济等优势迅速成为大尺度土壤盐渍化监测的主要手段^[1]。高光谱分辨率遥感因其丰富的光谱信息和较高的光谱分辨率, 可探测到微弱的光谱变化, 受到越来越多学者的青睐。

国内外诸多学者采用高光谱遥感影像或近地光谱对含盐土壤的敏感波段进行了研究, 研究表明富含 NaCl 的土壤在 1 970 ~ 2 450 nm、1 442 nm、1 851 nm、1 958 nm 和 2 226 nm 附近有诊断性吸收特征^[2-3]。另有学者基于遥感影像或光谱数据对土壤含盐量进行了反演研究, 研究表明偏最小二乘回归模型(partial least squares regression, PLSR)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、多元线性回归分析和各种盐分光谱指数均可用于土壤含盐量的定量反演^[4-9]。但是当前大多数研究以裸土光谱为研究对象, 缺乏植被对光谱反射率影响的考虑, 遥感监测中直接获取的往往是植被和土壤的混合光谱, 因此, 采用混合光谱直接反演土壤含盐量的精度有限。

盐渍化程度较高的土壤一般很少有植被生长,

* 国家自然科学基金项目(41071140)、中国科学院战略先导性项目(XDB15040300)和土壤重点数据库项目(XXH12504-1-02)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41071140), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDB15040300), and the China Soil Scientific Database (No. XXH12504-1-02)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: panxz@issas.ac.cn

作者简介: 刘 娅(1986—), 女, 山东菏泽人, 博士后, 主要从事土壤遥感应用研究。E-mail: liuya@issas.ac.cn

收稿日期: 2015-08-27; 收到修改稿日期: 2015-11-10

但是对于中低盐渍化程度的土壤而言，一些盐生植被或作物仍可生长。对有植被覆盖的地表而言，遥感或者近地光谱探测到的大都是土壤与植被的混合光谱。因此，植被对土壤光谱的干扰是目前土壤盐渍化遥感监测的重要限制因素之一^[1, 10]。针对有植被覆盖的地表土壤属性遥感反演，传统方法是掩膜掉高植被覆盖区^[11]，但这造成了高植被覆盖区土壤数据的缺失。土壤盐分影响植物生长，因而一些学者试图利用植物的生长状况间接反映土壤盐渍化状况，并构建各种植被指数与土壤含盐量建立关系。研究发现，归一化植被指数（normalized difference vegetation index, NDVI）^[12]、光化学植被指数（photochemical reflectance index, PRI）、红边位置（red edge position, REP）、叶绿素归一化指数（chlorophyll normalized difference index, Chl NDI）^[13]、改进的归一化植被指数（modified NDVI）^[9]和土壤调节植被指数（soil adjusted vegetation index, SAVI）^[14]均与土壤含盐量有较高的相关性。由于上述指数不是直接针对土壤含盐量建立的，故并不适用于所有研究。例如，Zhang等^[14]研究指出除SAVI以外，上述指数均与土壤含盐量呈弱相关。Zhang^[15]和Douaoui^[16]等在其研究中也指出NDVI不是一个很好的土壤含盐量预测指数。丁建丽等^[17]用实测综合光谱指数建立的高光谱模型可准确提取土壤盐渍化信息，结果明显优于传统遥感方法中单纯利用植被指数或者土壤盐分指数的模型。上述研究表明，用植被指数反演植被覆盖区土壤含盐量易受研究区及作物品种等外界因素影响，缺乏普适性和可移植性。如何去除或减弱植被对土壤光谱的干扰，近年来成为土壤含盐量遥感反演急需克服的瓶颈^[10]。

针对如何去除植被信息对土壤光谱影响的研究，国内外的研究尚且有限。Bartholomeus等^[18]首次提出残余光谱分解算法（residual spectra unmixing, RSU），将土壤光谱和植被光谱从混合光谱中分解开，并建立土壤有机质与所提取土壤光谱的PLSR模型，验证集均方根误差为 1.65 g kg^{-1} ，与植被去除前相比，预测精度大有提高。但是RSU的应用有一个前提条件，即事先要获取土壤和植被在混合像元中所占的比例，以及土壤和植被端元的光谱信息。然而，在实际应用中上述信息并不一定完全可获取，这就限制了RSU方法的使用范围及工作效率。Ouergemmi等^[19]采用盲源分离（blind

source separation, BSS）方法，在没有源信号和混合信号任何先验知识的前提下将植被和土壤光谱分解，并利用分离出的土壤光谱建立土壤黏粒含量的反演模型。虽然BSS方法广泛应用于通讯^[20-21]、生物医学^[22-23]、地球物理学^[24-25]以及图像处理^[26-27]等领域，但是其在土壤学中的应用还很少。该方法是否适用于土壤含盐量反演，尚需进一步探讨。本文以不同植被覆盖度地表的野外实测可见-近红外反射光谱数据为研究对象，采用BSS方法去除植被对土壤光谱的影响，并建立土壤含盐量的PLSR反演模型，探索植被覆盖区土壤含盐量的遥感反演方法，为盐渍化土壤大尺度遥感监测提供方法指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东台市弶港镇东南部黄海原种场内（ $120^{\circ}54'6.48''\text{E}$ ， $32^{\circ}38'40.16''\text{N}$ ），东临黄海。该区位于北亚热带北缘，海洋性季风气候显著，四季分明，日照充分，多年平均气温 14.7°C ，降水量 $1\ 042 \text{ mm}$ ，主要集中在6—9月，蒸发量 $1\ 417 \text{ mm}$ 。土壤为滨海盐土，母质为江淮冲积-海相沉积物，土壤剖面均匀，以粉砂占优势，是苏北盐渍化土壤的典型代表。

1.2 试验设计与数据采集

试验田块用PVC板等分为50个 $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的微区，以减少微区之间水分和盐分的侧向移动。为获取不同盐渍化程度的土壤，结合氯化物盐土的分级标准及大麦对盐分的耐受能力，将微区盐分含量控制在空白对照、0.3%、0.5%、0.7%和0.8%五个等级。此外，本研究对该区土壤样品八大离子的测定结果^[28]和已有研究结果均表明该区主要土壤盐分组成为NaCl^[29]，因此，本研究通过添加NaCl的方式来控制各微区土壤含盐量，将其均匀地洒在翻耕过的土壤表面，进行旋耕，旋耕深度为 20 cm ，之后进行土地平整，放置3 d使NaCl与耕层土壤充分混合后进行播种。每个盐分梯度均包括10个微区，该10个微区播种不同数目的大麦种子，以获取不同植被覆盖度。试验期施肥、灌溉、除草和除虫等田间管理与本地常规相同。

在整个大麦生长期，定时采集土壤样品、地表光谱以及植被覆盖度。本文以植被尚未完全覆盖

地表前的2013年12月5日（出苗期）、2013年12月29日（越冬期）、2014年1月21日（越冬期）以及2014年3月22日（拔节期）等4个时间采集的数据为数据源，共计 $50 \times 4 = 200$ 组。由于人为原因，其中11组数据由于测量误差较大，未用于数据分析，本研究共采用189组数据进行数据分析。

光谱数据采用美国ASD公司生产的Fieldspec 3 Hi-Res型地物光谱仪进行采集，其波长范围为350~2 500 nm，光谱分辨率在350~1 000 nm为3 nm，在1 000~2 500 nm为10 nm。为了减少光照、太阳高度角等因素对地表反射率的影响，选择晴朗无云的天气进行光谱测量，测量时间为北京时间上午12点至下午2点。采用25°视场角探头，探头始终位于微区中心上方垂直于地表1.3 m的位置，视场直径约为57 cm。每次光谱采集前均进行白板校正，每个微区采集10条光谱曲线，算术平均后得到该微区的实际光谱反射率数据。由于边缘波段350~379 nm和2 401~2 500 nm信噪比低，1 351~1 450 nm和1 801~1 950 nm受空气中的水汽影响较大，在后续分析过程中去除上述波段数据。

植被覆盖度从拍摄的数码照片中采用分类的方法提取。拍摄照片前将一个100 cm × 75 cm的矩形框放在微区中间位置，然后将相机架于微区上方1 m的位置，调节焦距，当整个矩形框全部进入视野时，拍摄照片。在此基础上，将照片的红绿波段值相减，然后设定一定的阈值将计算后的图像二值化，用滤波工具去除噪声点，最后统计植被占整个照片的比例，就得到了该微区的植被覆盖度。

土壤样品采集采用梅花采样法，每个微区采集0~5 cm深度的样品5个，混合后的样品为该微区的土壤样品。采集的土壤样品风干、研磨、过筛（2 mm）后，用于测定土壤电导率。称取10 g土样置于离心管中，加入50 ml无CO₂去离子水振荡，以4 500 r min⁻¹转速离心10 min后用电导率仪测定其上清液电导率。对部分土壤样品进行离子组成的测定，采用常规分析法（土水比1:5）确定土壤各离子组成含量，计算相应的土壤全盐含量，得出该研究区土壤全盐含量与浸提液电导率的换算关系^[28]，并用该关系将土壤电导率转换为土壤全盐含量。

1.3 盲源分离

盲源分离是在源信号及传输信道参数均未知的情况下，根据源信号的统计特性，仅用观测到的

信号来恢复或分离源信号的过程。在该过程中，“盲”具有两重含义：一是源信号不能被直接观测到；二是源信号在传输过程中是如何被混合的未知。所以，盲源分离仅仅是利用包含在观测信号中的信息来解决问题的一种方法。

在盲信号处理过程中，通常有3种信号混合方式：线性瞬时混合、线性卷积混合以及非线性混合等。本文主要研究线性瞬时混合方式下源信号的分离。盲信号分离可用下列方程来表述：

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \boldsymbol{\alpha}(t) \quad (1)$$

式中， $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$ 为 n 维源信号向量， $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 为 m 维观测信号向量， $m \times n$ 维矩阵 \mathbf{A} 为混合矩阵， $\boldsymbol{\alpha}(t) = [\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_m(t)]^T$ 为 m 维噪声矩阵，一般情况下为简化模型，不考虑噪声的影响。

盲信号的分离算法是：在混合矩阵 \mathbf{A} 和源信号 $\mathbf{s}(t)$ 未知的情况下，不考虑噪声矩阵，只根据观测信号 $\mathbf{x}(t)$ 确定分离矩阵 \mathbf{W} ，使得

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

式中， $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$ 为 n 维分离信号向量，若全局矩阵 $\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{A} = \mathbf{I}$ ， \mathbf{I} 为 $n \times n$ 维单位矩阵，则 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(t)$ ，从而达到恢复源信号的目的。盲源分离原理如图1所示：

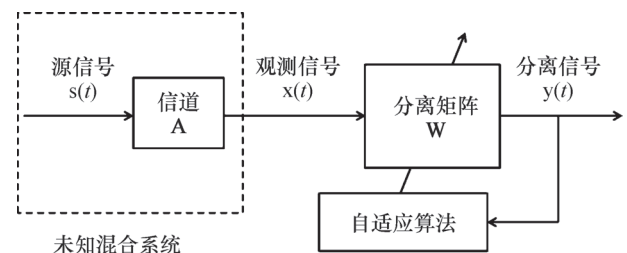


图1 盲源分离原理示意图

Fig. 1 Schematic of the principle of blind source separation

独立分量分析方法（Independent component analysis, ICA）是近年逐步发展起来的一种新的多维信号处理算法，也是当前最成熟的BSS方法之一，其目的是从多通道观测得到的由若干具有统计独立特性的源信号组成的混合信号中将隐藏的独立分量（源信号）分离或提取出来，基于BSS的ICA目的是：根据混合信号 $\mathbf{x}(t)$ 和源信号 $\mathbf{s}(t)$ 的统计独立性通过迭代寻找解混矩阵 \mathbf{W} ，使输出 $\mathbf{y}(t)$ 尽可能在相互独立的前提下逼近源信号 $\mathbf{s}(t)$ ，

从而达到盲源分离的目的。本文采用的为ICA算法，由于对源信号和混合矩阵无先验知识可以利用，因此必须对源信号和混合矩阵做出某些附加假设：①假设源信号之间是相互独立的；②若想使得 $\mathbf{WA}=\mathbf{I}$ ，必须假设 \mathbf{A} 是列满秩矩阵；③观测信号数多于或等于源信号数，即 $m \geq n$ ；④假设观测信号的噪声是可以忽略的。

其具体实施过程分为以下四个步骤：

(1) 中心化。大部分盲源分离算法中要求信号的各个分量是均值为零的随机变量，因此，在进行盲源分离前，必须去掉信号的均值。一个随机变量，用 $\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{x} - \mathbf{E}(\mathbf{x})$ 代替 \mathbf{x} 就可以实现零均值。

(2) 白化。对任意多维信号施加一个线性变换使其变为白色信号的处理过程称为白化(Whiting)，对应的变换矩阵称为白化矩阵。白化是使得待分离的信号不相关，并且使协方差矩阵为单位矩阵的过程，其本质是去相关及压缩。一般情况下，经白化处理后收敛速度快，并能够获得更高的稳定性。

(3) 迭代求解。给 \mathbf{W} 一个初始值，然后按照式(3)迭代求解，直到达到最大迭代次数为止。

$$\mathbf{W}[k+1] = \mathbf{W}[k] + \eta[k] (\mathbf{I} + f(y) \cdot \mathbf{y}^T) \mathbf{W} \quad (3)$$

式中， k 为迭代次数， η 为学习步长， $f(y) = 1 - 2z$ ， z 为非线性函数，一般为 $z = (1 + e^{-y})^{-1}$ ，或 $z = \tanh(y)$ 。

(4) 判断土壤光谱。由于分离所得矩阵 \mathbf{y} 中包含多条光谱，必须对分离后的光谱加以判别，以确定土壤光谱，本文采用的判别方法是光谱角匹配法，即分别计算研究区内裸土的平均光谱与分离后光谱的光谱角(spectral angle, SA)，根据SA越小两条光谱越相似的原则，比较光谱角的大小以判定土壤光谱，光谱角较小的为提取出的裸土光谱。光谱角的计算如式4所示：

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{t \cdot r}{\|t\| \cdot \|r\|} \right) \quad (4)$$

式中， t 和 r 分别表示空间内的两个向量。

盲源分离的执行以及光谱角的计算均在MATLAB软件中编程完成。

1.4 建模方法及精度评价

模型建立采用偏最小二乘回归(PLSR)方法，PLSR方法是目前土壤属性光谱预测普遍采用的一种多元回归分析方法，该方法将多元线性

回归、变量的主成分分析以及变量间的典型相关分析有机结合，可同时实现回归建模、数据简化以及相关分析，为多元数据分析提供了极大的便利，尤其对样本量小，自变量多，且变量间存在严重相关性的数据具有独特的优势。本研究将所有数据按照含盐量从低到高排序，每隔两个取出一个作为验证集，其余为建模集(126个建模集+63个验证集)，首先采用完全交叉验证(Full cross validation)方法对所建模型进行验证，然后用独立验证集对模型进行验证。为了减少异常样本对建模和预测结果的影响，本研究剔除残差大于3倍样本集标准差，以及杠杆值大于3倍建模集杠杆值均值的异常样本^[28]。PLSR模型的建立采用The Unscrambler X10.1软件实现。

精度评价主要采用以下参数：建模集交叉验证决定系数(coefficient of determination in cross validation, R^2_{cv})、建模集交叉验证均方根误差(Root mean square error of cross validation, $RMSE_{cv}$)、建模集交叉验证测定值标准偏差与标准预测误差的比值(ratio of standard deviation to standard error of cross validation, RPD_{cv})、验证集决定系数(coefficient of determination in prediction, R^2_p)、验证集均方根误差(Root mean square error of prediction, $RMSE_p$)和测定值标准偏差以及标准预测误差的比值(Ratio of standard deviation to standard error of prediction, RPD_p)。 R^2_{cv} 、 R^2_p 以及 RPD_{cv} 、 RPD_p 越大， $RMSE_{cv}$ 和 $RMSE_p$ 越小，表明建模精度越高。

2 结 果

2.1 基于原始光谱的土壤含盐量预测

将所测不同植被覆盖度下的地表原始光谱与土壤含盐量建立PLSR模型，并用独立的验证集对所建模型的精度进行验证，结果如图2所示。地表原始光谱并不能很好地反演土壤含盐量，建模集 R^2_{cv} 仅为0.53， $RMSE_{cv}=3.54 \text{ g kg}^{-1}$ ， $RPD_{cv}=1.47$ ，线性拟合直线远远偏离1:1线(图2a)。验证集的结果同样较差， $R^2_p=0.50$ ， $RMSE_p=3.33 \text{ g kg}^{-1}$ ， $RPD_p=1.41$ ，线性拟合方程的系数仅为0.55(图2b)。由此可见，直接用所测原始光谱与土壤含盐量建立模型，所得预测结果的精度远不能满足实际需要，因此，若想进一步改善植被覆盖下土壤含盐

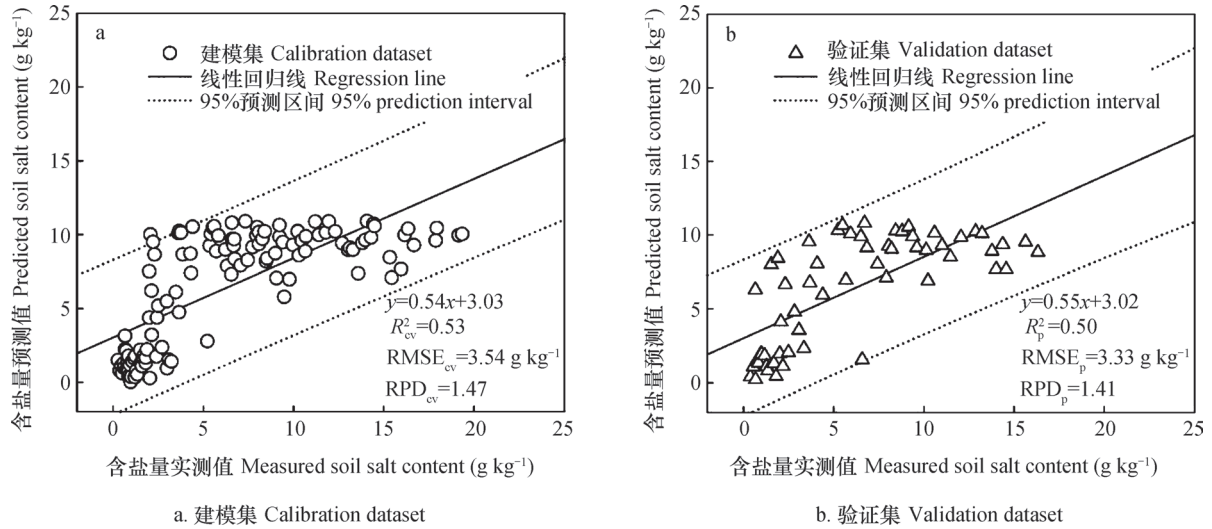


图2 基于原始光谱的土壤含盐量实测值和预测值散点图

Fig. 2 Scatter plots of measured vs. predicted soil salt contents (SSCs) based on original spectra

量的预测精度，应对植被和土壤的混合光谱进行分解，以去除植被对土壤光谱以及土壤含盐量预测的干扰。

2.2 基于盲源分离后土壤光谱的土壤含盐量预测

为验证盲源分离法所提取土壤光谱的有效性，本文将ICA算法所提取的土壤光谱与土壤含盐量建立PLSR模型，并用独立的验证集来检验模型的精度。

基于盲源分离后的土壤光谱所建立的PLSR模

型，建模集较原始光谱所建模型的预测精度有大幅度改善，建模集 R^2_{cv} 提高至0.66， $RMSE_{cv}$ 降低至 3.10 g kg^{-1} ， RPD_{cv} 提高至1.70，所有数据点都基本均匀分布在1:1线附近。模型验证集的精度也有较大改善， $R^2_p=0.62$ ， $RMSE_p=2.89\text{ g kg}^{-1}$ ， $RPD_p=1.57$ ，回归方程系数达0.78（图3）。该结果表明，盲源分离后的土壤光谱可有效反演土壤含盐量，盲源分离法可提高植被覆盖下土壤含盐量预测精度。

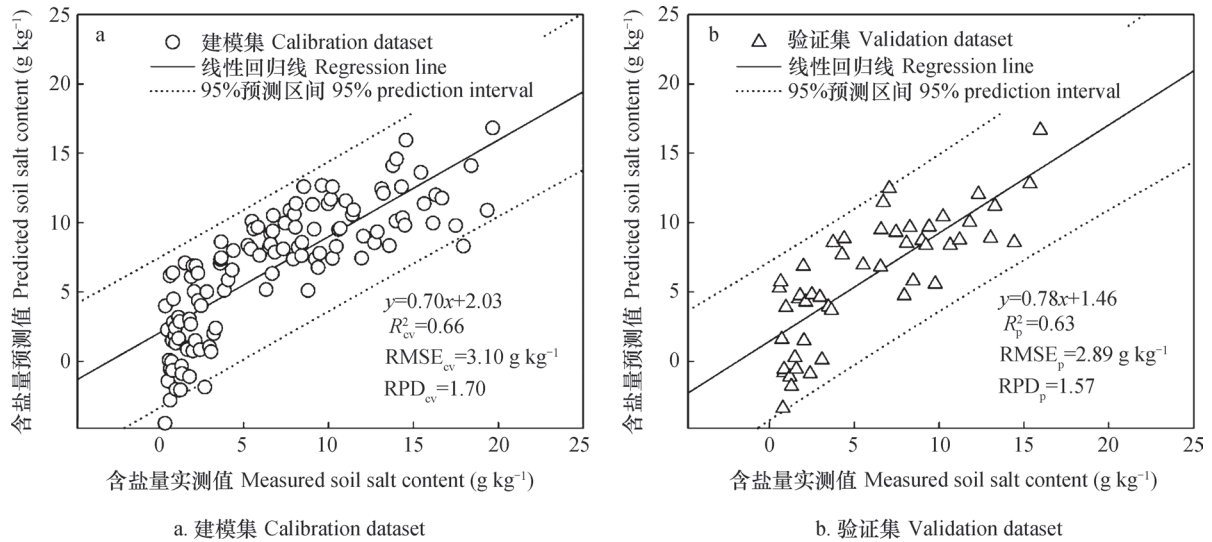


图3 基于ICA算法分离光谱的土壤含盐量实测值与预测值散点图

Fig. 3 Scatter plots of measured vs. predicted soil salt contents (SSCs) based on ICA separated spectra

3 讨 论

基于土壤和植被的混合光谱进行土壤含盐量估测, 结果表明其估测精度有限 ($R^2_{cv}=0.53$, $RMSE_{cv}=3.54 \text{ g kg}^{-1}$, $RPD_{cv}=1.47$, $R^2_p=0.50$, $RMSE_p=3.33 \text{ g kg}^{-1}$, $RPD_p=1.41$), 难以满足实际需求, 仍有进一步改善的空间。植被影响土壤的光谱形态特征, 植被覆盖度越高, 700 nm附近植被的红边特征越明显。当植被覆盖度达20.0%以上时, 地表光谱接近植被光谱, 土壤的光谱特征已不明显^[30]。因此, 植被对土壤含盐量的光谱估测有一定的干扰。

盲源分离方法根据源信号的统计特征, 利用其自身的统计特性将其识别并从混合信号中分解出来, 且无需源信号和混合信号的任何先验知识。本文根据盲源分离方法的这一特性, 将土壤光谱从混合光谱中分解出来, 并利用提取出的土壤净光谱进行土壤含盐量的预测。结果表明: 和原始光谱相比, 基于去除植被后光谱的土壤含盐量预测精度更高, 与Bartholomeus^[18]和Ouerghemmi^[19]等的结论一致。

由于构成混合光谱的源光谱的个数以及所占比例未知, 盲源分离过程中如何确定合适的源的个数

至关重要。本研究对如何选择最佳的源个数进行了探讨, 尝试用2、3和4个源分别对数据进行分解。现以植被覆盖度为8.23%的数据为例进行图示说明。当植被覆盖度为8.23%时, 地表反射光谱呈现出明显的植物的光谱特征, 尤其是在700 nm附近出现明显的红边特征, 如图4a所示。当设定源的个数为2时, 混合光谱被分解为两条独立的光谱, 和地物光谱库中的植物以及裸土光谱比较相似, 其形态特征以及特殊吸收波段均比较类似(图4b); 增加源的个数至3时, 分离后的光谱曲线上出现很多类似噪音的点, 光谱曲线不再平滑, 且分离出的光谱曲线之间差异不显著, 与植物的光谱特征较吻合, 但是与土壤的光谱特征相差较大(图4c); 当源的个数增加至4时, 分离出的光谱曲线更不连贯, 虽然从形态上大致可以看出其中一条类似植物光谱, 但由于其取值不连贯, 整条曲线不平滑, 噪声点较多, 实际应用价值不大(图4d)。上述结果表明, 源的最佳取值为2, 表明组成混合光谱的主要地物为植物和土壤, 其他地物如残留秸秆、裸露石块等异物尽管在野外光谱测量中不可避免, 但是其作用与植物和土壤相比较弱, 对土壤光谱的干扰作用并不显著, 在盲源分离过程中可不予考虑, 故本文所有分析过程源的个数均设为2。

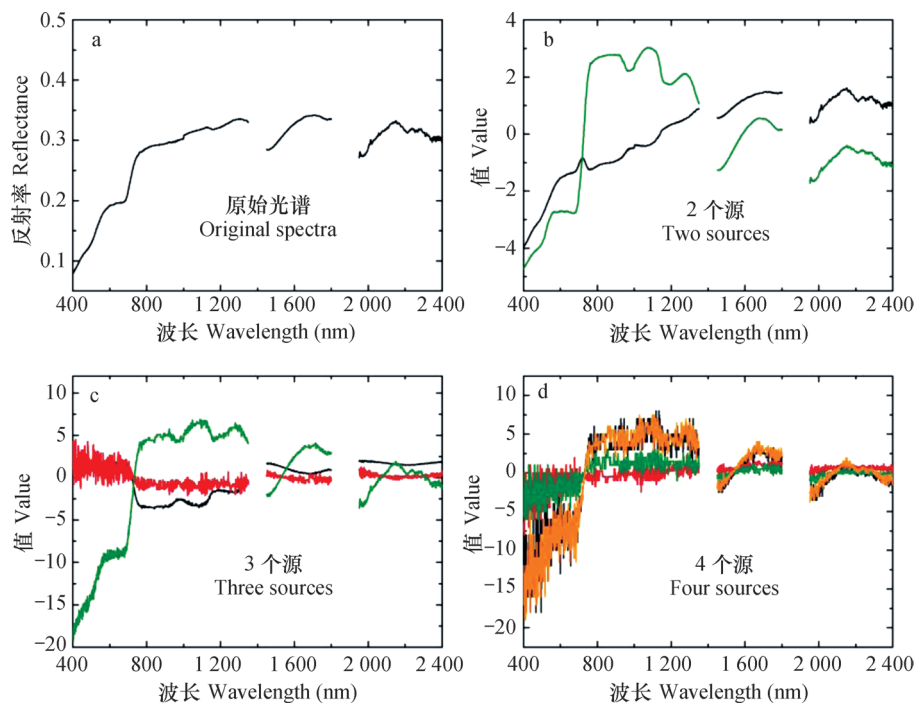


图4 原始光谱 (a) 以及设定不同源的个数后的分离结果 (b-d)

Fig. 4 Original spectra (a) and separation with a set number of sources (b-d)

盲源分离方法可将植被和土壤光谱有效分解的前提是：探测器探测到足够的土壤信息。因此，当植被覆盖度过高时，混合光谱中没有包含足够的土壤信息，盲源分离方法将无法有效地分离植被和土壤光谱。所有189个植被覆盖下分离后光谱与裸土平均光谱的光谱角的计算结果表明（图5）：当植被覆盖度低于30%时，土壤光谱角基本未超过40°（黑色虚线），而当植被覆盖高于30%时，土壤光谱角迅速增加并超过40°。该结果说明随着植被覆盖度的增加，BSS方法分离出的土壤光谱与裸土光谱差异逐渐增大。由此可知，当植被覆盖度低于30%时，BSS方法更有效，且随着植被覆盖度的增加，BSS方法的有效性迅速降低。尽管当植被覆盖度过高时，BSS的有效性有所降低，但和基于混合光谱的土壤含盐量预测结果相比，BSS提取出的土壤光谱仍可改善土壤含盐量的估测精度（图2和图3）。

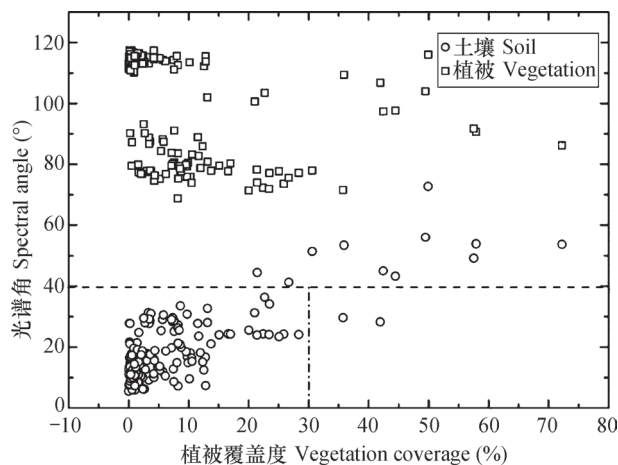


图5 不同植被覆盖下分离后光谱与裸土平均光谱的光谱角
Fig. 5 Spectral angles between extracted spectra and the mean spectrum of bare soil spectrum under various vegetation coverages

尽管经盲源分离后提取出的土壤光谱改善了基于原始光谱的土壤含盐量预测精度，但是其预测精度还有待进一步提高，因为在现有研究中尚未考虑土壤水分、土壤粗糙度等其他外部因素对土壤含盐量预测精度的影响，而上述因素在已有研究中已被证明是影响土壤属性光谱预测精度的重要因素^[31-33]。本文旨在探讨植被干扰的去除，因为植被是盐渍化土壤遥感监测中对土壤含盐量预测精度影响最大的因素，有关分离后土壤光谱中土壤水分、粗糙度干扰的去除或削弱研究已经在进行，将在今后的文章中详细探讨。

4 结论

植被覆盖严重干扰地表土壤反射光谱，且导致基于地表光谱的土壤含盐量预测精度较低，盲源分离方法可有效分解土壤和植被的混合光谱。然而，盲源分离并不适用于所有植被覆盖度，其仅适用于部分植被覆盖的地表，当地表植被过于茂密时，该方法将不能有效发挥作用。盲源分离法所提取的土壤光谱可有效反演土壤含盐量，并改善基于原始光谱的土壤含盐量反演精度。本研究有助于实现部分植被覆盖下土壤含盐量的遥感预测，将有效解决当前植被覆盖区土壤属性遥感监测精度有限的问题，对“植被干扰”这个困扰土壤遥感多年的问题，提出了一种有效的处理方法，同时也为实现土壤盐渍化快速、准确的遥感监测提供了方法支持。

致谢 向为本文野外实验提供场地的中国科学院南京分院东台滩涂研究院，以及在实验过程中提供无私帮助的杨劲松研究员、张新副院长、姚荣江副研究员、于世鹏博士和米迎宾博士表示由衷感谢！

参考文献

- [1] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85 (1): 1—20
- [2] Wang Q, Li P H, Chen X. Modeling salinity effects on soil reflectance under various moisture conditions and its inverse application: A laboratory experiment. *Geoderma*, 2012, 170: 103—111
- [3] Howari F, Goodell P, Miyamoto S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31 (5): 1453—1461
- [4] Farifteh J, van der Meer F, Atzberger C, et al. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110 (1): 59—78
- [5] 翁永玲, 戚浩平, 方洪宾, 等. 基于PLSR方法的青海茶卡-共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演. *土壤学报*, 2010, 47 (6): 1255—1263
Weng Y L, Qi H P, Fang H B, et al. PLSR based hyperspectral remote sensing retrieval of soil salinity of Chaka-Gonghe basin in Qinghai Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (6): 1255—1263

- [6] 刘娅, 潘贤章, 王昌昆, 等. 基于可见-近红外光谱的滨海盐土土壤盐分预测方法. 土壤学报, 2012, 49 (4) : 824—829
- Liu Y, Pan X Z, Wang C K, et al. Prediction of coastal saline soil salinity based on vis-NIR reflectance spectroscopy (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (4) : 824—829
- [7] Li H Y, Webster R, Shi Z. Mapping soil salinity in the Yangtze delta: REML and universal kriging (E-BLUP) revisited. *Geoderma*, 2015, 237/238: 71—77
- [8] 彭杰, 刘焕军, 史舟, 等. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演. 农业工程学报, 2014, 30 (17) : 167—174
- Peng J, Liu H J, Shi Z, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (17) : 167—174
- [9] Aldabaa A A, Weindorf D C, Chakraborty S, et al. Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma*, 2015, 239/240: 34—46
- [10] 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. 地理学报, 2012, 67 (9) : 1233—1245
- Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (9) : 1233—1245
- [11] Wester K, Lundén B, Bax G. Analytically processed Landsat TM images for visual geological interpretation in the northern Scandinavian Caledonides. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1990, 45 (5) : 442—460
- [12] Wiegand C L, Rhoades J D, Escobar D E, et al. Photographic and video-graphic observations for determining and mapping the response of cotton to soil-salinity. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49: 212—223
- [13] Tilley D R, Ahmed M, Son J H, et al. Hyperspectral reflectance response of freshwater macrophytes to salinity in a brackish subtropical marsh. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36 (3) : 780—789
- [14] Zhang T T, Zeng S L, Gao Y, et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 2011, 11 (6) : 1552—1562
- [15] Zhang M, Ustin S L, Rejmankova E, et al. Monitoring pacific coast salt marshes using remote sensing. *Ecological Applications*, 1997, 7 (3) : 1039—1053
- [16] Douaoui A E K, Nicolas H, Walter C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 2006, 134 (1/2) : 217—230
- [17] 丁建丽, 伍漫春, 刘海霞, 等. 基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍化监测研究. 光谱学与光谱分析, 2012, 32 (7) : 1918—1922
- Ding J L, Wu M C, Liu H X, et al. Study on the soil salinization monitoring based on synthetical hyperspectral index (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (7) : 1918—1922
- [18] Bartholomeus H, Kooistra L, Stevens A, et al. Soil organic carbon mapping of partially vegetated agricultural fields with imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13 (1) : 81—88
- [19] Ouerghemmi W, Gomez C, Naceur S, et al. Applying blind source separation on hyperspectral data for clay content estimation over partially vegetated surfaces. *Geoderma*, 2011, 163 (3/4) : 227—237
- [20] 贺海港. 盲源分离在通信信号分离中的应用. 西安: 西安电子科技大学, 2010
- He H G. Application of blind source separation in separation of communication signals (In Chinese). Xian: Xidian University, 2010
- [21] 林秋华. 基于盲源分离的图像与语音加密新方法研究. 大连: 大连理工大学, 2006
- Lin Q H. Novel methods for encrypting images and speeches based on blind source separation (In Chinese). Dalian: Dalian University of Technology, 2006
- [22] 吴小培, 冯焕清, 周荷琴, 等. 独立分量分析及其在脑电信号预处理中的应用. 北京生物医学工程, 2001, 20 (1) : 35—37, 46
- Wu X P, Feng H Q, Zhou H Q, et al. Independent component analysis and its application for preprocessing EEG (In Chinese). *Beijing Biomedical Engineering*, 2001, 20 (1) : 35—37, 46
- [23] 耿云志. 母胎心电信号的盲源分离研究. 杭州: 浙江大学, 2015
- Geng Y Z. Research about BSS suitable for maternal ECG (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 2015
- [24] 高颖. 盲源分离理论及其在地球物理勘探中的应用. 吉林: 吉林大学, 2008
- Gao Y. Blind source separation theory and its application in geophysical exploration (In Chinese). Jilin: Jilin University, 2008

- [25] 穆星. 基于盲信号处理技术的地震弱信号分离方法. 油气地质与采收率, 2012, 19 (5): 47—49, 114
Mu X. Seismic weak signal separation based on blind signal processing (In Chinese). *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19 (5): 47—49, 114
- [26] 李蕴华. 基于盲源分离的大容量图像数字水印方案. 南通大学学报 (自然科学版), 2008, 7 (1): 31—36
Li Y H. A high-capacity image watermarking scheme based on blind source separation (In Chinese). *Journal of Nantong University (Nature Science Edition)*, 2008, 7 (01): 31—36
- [27] 林秋华, 党杰, 殷福亮. 盲源分离图像加密的相关运算解密法. 通信学报, 2008, 29 (1): 109—114
Lin Q H, Dang J, Yin F L. Correlation calculation decrypting for BSS-based image cryptosystem (In Chinese). *Journal on Communications*, 2008, 29 (1): 109—114
- [28] 刘娅. 模拟蒸发过程中盐渍土反射光谱对水盐变化的响应特征. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2012
Liu Y. Spectral response of saline soil to the change of soil moisture and salt content during the simulated evaporation (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2012
- [29] 陈斌, 邹坚勇, 朱文静. PCA结合马氏距离法剔除近红外异常样品. 江苏大学学报 (自然科学版), 2008, 29 (4): 277—279
Chen B, Zou J Y, Zhu W J. Eliminating outlier samples in near-infrared model by method of PCA-mahalanobis distance (In Chinese). *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2008, 29 (4): 277—279
- [30] 刘娅. 基于土壤净光谱的稀疏植被覆盖下土壤盐分估测. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2015
Liu Y. Estimation of soil salt content over partially vegetated surfaces based on net soil spectra (In Chinese). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2015
- [31] Ackerson J P, Demattè J M, Morgan C L S. Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground Vis-NIR library with external parameter orthogonalization. *Geoderma*, 2015, 259/260: 196—204
- [32] Nocita M, Stevens A, Noon C, et al. Prediction of soil organic carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 2013, 199: 37—42
- [33] Rienzi E A, Mijatovic B, Mueller T G, et al. Prediction of soil organic carbon under varying moisture levels using reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (3): 958—967

Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation

LIU Ya¹ PAN Xianzhang^{1†} SHI Rongjie^{1, 2} LI Yanli^{1, 2} WANG Changkun¹ LI Zhiting^{1, 2}

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The technology of image spectroscopy has been widely used in soil attribute mapping in the past few decades. However, vegetation cover seriously affects the acquisition of soil spectral information, leading to misestimating of soil attributes by visible and near-infrared (vis-NIR) spectroscopy. The traditional solution dealt with vegetation cover interfering soil spectra by masking out the areas with high vegetation coverage, thus resulting in absence of soil information for these areas. Some researchers also tried to use vegetation indices to estimate soil attributes, with results showing that the general applicability and transferability of these vegetation indices was limited by study areas and crop varieties. Therefore, how to remove the influence of vegetation on soil spectrum has become a crucial issue in estimating soil components, such as salt content over partially vegetated surfaces. The residual spectral unmixing method was previously used to separate different components of a mixed spectrum, however, the percentage of each component had to be known as a prerequisite. Recently blind source separation (BSS), a method previously often

used in signal separation analysis, has successfully been applied to separating soil spectral information from vegetation spectral information.

In order to verify the effectiveness of BSS, in the Huanghai Raw Seed Growing Farm in Dongtai of Jiangsu, was selected as an experiment site, with its field delineated into plots diversified in soil salt content by amending the soil with salt and vegetated sparsely by seeding in different densities. The experiment eventually had a total of 50 plots, 5 levels in soil salt content and 10 in sowing density. Then spectra, photos and soil samples of each plot were collected regularly until the soil surface was fully covered by vegetation. A total of 189 groups of field spectral reflectance of the plots various in vegetation coverage, soil salinity and growing season, were analyzed for influences of vegetation on estimation of soil salt content, and effectiveness of BSS removing the interference of vegetation. Results show that vegetation cover seriously affected accuracy of the estimation of soil salt content with $R^2_{cv}=0.53$, $RMSE_{cv}=3.54 \text{ g kg}^{-1}$, $RPD_{cv}=1.47$, $R^2_p=0.50$, $RMSE_p=3.33 \text{ g kg}^{-1}$ and $RPD_p=1.41$. However, the BSS algorithm, based on equation $z=\tanh(y)$, effectively eliminated the interference of vegetation on soil spectral reflectance, and improved accuracy of the estimation of soil salt content in the over partially vegetated areas using vis-NIR spectroscopy, with $R^2_{cv}=0.66$, $RMSE_{cv}=3.10 \text{ g kg}^{-1}$, $RPD_{cv}=1.70$, $R^2_p=0.63$, $RMSE_p=2.89 \text{ g kg}^{-1}$ and $RPD_p=1.57$. However, the effectiveness of BSS weakened when vegetation coverage was getting high, because it was unable to capture enough soil information from the mixed spectra. Additionally, choosing a suitable number of source spectra was essential to the results, and two was the best choice in this case. The method proposed here is expected to broaden the use of spectroscopy, which is usually limited to bare soil, and facilitates wider application of remote sensing images to map soil salinity over partially vegetated surfaces.

Key words Partial vegetation cover; Visible and near-infrared (vis-NIR) reflectance; Soil salt content; Blind source separation (BSS)

(责任编辑：卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu (290)
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. (303)

Insights and Perspectives

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science CAI Zucong, HUANG Xinqi (310)

Research Articles

- Element Migration in S₃ Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication CHU Chunjie, ZHAO Jingbo (320)
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. (330)
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared (VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. (340)
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. (353)
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. (363)
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. (373)
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. (386)
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang (399)
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong (409)
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. (419)
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. (426)
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. (436)
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao (448)
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. (455)
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. (466)
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. (475)
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. (488)
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ZHENG Yan, JIA Zhongjun (500)
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. (508)
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. (521)
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. (531)
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. (542)

Research Notes

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. (550)
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. (559)

Cover Picture: Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation (by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 卢 萍 檀满枝 陈荣府

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

