DOI: 10.5846/stxb201501230186

王莉雯,卫亚星.湿地土壤全氮和全磷含量高光谱模型研究.生态学报,2016,36(16): - . Wang L W, Wei Y X.Estimating the Total Nitrogen and Total Phosphorus Content of Wetland Soils Using Hyperspectral Models.Acta Ecologica Sinica, 2016,36(16): - .

湿地土壤全氮和全磷含量高光谱模型研究

王莉雯^{1,2,3,*},卫亚星^{1,2,3}

1 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心,大连 116029
 2 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室,大连 116029
 3 辽宁师范大学城市与环境学院,大连 116029

摘要:氮磷是湿地生态系统土壤中的重要营养元素,其对湿地植被生长、湿地生态系统生产力、区域富营养化变化、湿地环境生态净化功能等具有重要的影响作用。研究氮磷营养物质在湿地土壤中的分布变化特征,对湿地生态系统评估、恢复和管理具有重要的意义。本文以中国高纬度地区面积最大的滨海芦苇湿地——盘锦湿地为研究区,采用不同建模方法(再抽样多元逐步回归模型 bootstrap SMLR 和再抽样偏最小二乘回归模型 bootstrap PLSR)和光谱变换技术(包络线去除 CR、光谱一阶微分 FD 和 光谱倒数的对数 LR),分别建立了湿地土壤全氮和全磷含量的估算模型。基于湿地土壤实测光谱,模拟高光谱 Hyperion 数据和 多光谱 TM 数据,在此基础上进行湿地土壤营养元素含量估算。对比所建反演模型的估算精度,探讨高光谱遥感技术对湿地土壤营养元素组分的估算能力和适用性。研究结果表明:bootstrap PLSR 相比于 bootstrap SMLR 建模方法,其对研究区湿地土壤全氮和全磷含量的估算获得了较高精度;对盘锦湿地土壤全氮含量的估算,最高估算精度产生于 CR 光谱变换技术结合 bootstrap PLSR 建模;对湿地土壤全磷含量的估算,最高估算精度产生于原光谱数据结合 bootstrap PLSR 建模;模拟高光谱数据 Hyperion 对湿地土壤全氮和全磷含量的估算精度均高于模拟多光谱数据 TM,模拟 Hyperion 的估算精度更接近于实测光谱的估算精度。**关键词**;高光谱遥感;湿地土壤;全氮,全磷, bootstrap PLSR

Estimating the Total Nitrogen and Total Phosphorus Content of Wetland Soils Using Hyperspectral Models

WANG Liwen^{1,2,3,*}, WEI Yaxing^{1,2,3}

Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China
 Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China
 Colling of University Physical Science Linguistics Neural University, Dalian 116029, China

3 College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Nitrogen and phosphorus in wetland soils are important limiting nutrients for plant growth, maximum photosynthetic rate and capacity, and net primary productivity. They have been found to be significantly involved in the estuarine eutrophication and environmental purification of wetland ecosystem. The research may be focused on distributing and changing characteristics of nitrogen and phosphorus in wetland soils. It is important for the evaluation, restoration, and management of wetland ecosystems. Our study area is located in the Panjin wetland $(40^{\circ}45'-41^{\circ}10'N, 121^{\circ}45'-122^{\circ}00' E)$, which is a part of the Shuangtaihekou National Nature Reserve Administration. Panjin wetland is the largest coastal reed wetland situated in the high-latitude areas of China. The laboratory measurements of total nitrogen, total phosphorus, and spectral reflectance for surface soil samples had been conducted. Different modeling methods, such as bootstrap stepwise multiple linear regression (SMLR), bootstrap partial least square regression (PLSR), and spectral transformation

收稿日期:2015-01-23; 网络出版日期:2015-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(41271421);教育部人文社会科学研究规划基金项目(14YJA630064)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wlw9585@163.com

techniques, such as continuum removal (CR), first difference derivative (FD), and log transformed spectra (LR), were used to develop the estimation models of total nitrogen and total phosphorous in wetland soils. Based on the simulated hyperspectral Hyperion data and multispectral Thematic Mapper (TM) data of the wetland soils, soil nitrogen and phosphorous contents were estimated, respectively. Subsequently, the estimated accuracies of the developed models were compared, and thus, the ability and suitability of estimating nitrogen and phosphorous components in wetland soils using hyperspectral technologies were explored. The results indicated that bootstrap PLSR achieved higher accuracies of estimating the total nitrogen and total phosphorous content of wetland soils in the study area than did bootstrap SMLR. The spectral transformed technique of CR used in combination with the modeling method of bootstrap PLSR yielded the highest estimation accuracy for the prediction of the total nitrogen content of soils collected from Panjin wetland. The original spectral data combined with bootstrap PLSR produced the highest estimation accuracy to predict the total phosphorous content in wetland soils. Simulated hyperspectral Hyperion data attained higher accuracies of estimating total nitrogen and total phosphorous in wetland soils compared to simulated multispectral TM data. The estimation accuracies of the simulated Hyperion were closer to those of the measured spectra. The estimation accuracy of the total nitrogen content achieved from the measured spectra, simulated hyperspectral Hyperion, and multispectral TM were all higher than those of the total phosphorous content of the same soils.

Key Words: hyperspectral remote sensing; wetland soils; total nitrogen; total phosphorous; bootstrap PLSR

土壤是湿地生态系统的重要环境要素之一,是湿地发生物理化学转换的中介,其对湿地中氮磷等营养物 质具有蓄积作用^[1-2]。氮磷是湿地植物生长不可缺少的重要营养元素,湿地土壤中氮磷含量直接影响着湿地 生态系统的生产力,湿地土壤的氮、磷吸收及汇聚能力可有效地减缓附近水域的富营养化^[34]。因此研究氮 磷营养物质在湿地土壤中的分布特征,是理解湿地生态系统环境生态净化功能的重要基础。

土壤反射光谱特征和土壤理化性质存在密切关系,这为研究土壤属性提供了遥感技术应用途径^[56]。大 量研究进行了基于土壤反射光谱特征来区分土壤类型,以及反演土壤有机质、水分、氮素、重金属含量等^[79]。 高光谱遥感凭借其较高的光谱分辨率,有利于定量获取土壤的生化组分,从而适用于基于土壤的反射光谱估 算土壤中全氮和全磷营养物质的含量^[10-11]。

由于典型的水文、植被条件、独特的成土母质等,湿地土壤呈现出区别于一般的陆地土壤和水体沉积物的 理化性质和生态功能^[12-13]。基于高光谱特性的湿地土壤全氮和全磷含量反演研究还鲜见报道。本文以中国 高纬度地区面积最大的滨海芦苇湿地为研究区,尝试采用不同建模方法(再抽样多元逐步回归模型 bootstrap SMLR 和再抽样偏最小二乘回归模型 bootstrap PLSR)、不同光谱变换技术(包络线去除 CR、光谱一阶微分 FD 和光谱倒数的对数 LR)、基于实测高光谱数据的模拟技术(模拟了 Hyperion 高光谱数据和 TM 多光谱数据), 分别建立湿地土壤全氮和全磷含量的估算模型。对比估算精度,探讨高光谱遥感技术对湿地土壤营养元素组 分的估算能力和适用性。

1 研究区概况

盘锦湿地位于亚洲最大的暖温带滨海湿地辽河三角洲的核心地带,辽河下游入海口处,其在调节气候、环境净化、蓄水防洪、补给地下水、减轻海岸线侵蚀、保护生物多样性等方面发挥着重要的作用。盘锦湿地地貌 类型以冲积平原和潮滩为主,地势低洼平坦、北高南低,坡度在2度以内,平均海拔4m。盘锦湿地区域为暖 温带季风气候区,年平均气温为8.5℃,年平均降水量为650mm。湿地天然植被以芦苇(*Phragmites australis*) 和翅碱蓬(*Suaeda salsa*)为主。近年来随着该地区无机氮、石油类、重金属等陆源污染物排放量的增加,对盘 锦湿地的生态环境造成了负面影响^[14]。

2 数据来源和预处理

2.1 土壤采集与制备

野外实验于 2014 年 8 月进行。根据研究区土壤类型和植被群落分布特征,设定了具有代表性的 40 个采 样区域。在每个采样区域,采用五点采样法进行土壤样本采集。将采集的土壤样品带回实验室后进行风干脱 水,去除较大的植物残体、石砾和其他杂物,磨碎后过筛,编号后装袋以备土壤全氮、全磷和光谱测量。测量完 成后,随机选取了 115 个土壤表层(0—10cm)样本。



图 1 盘锦湿地采样区域分布图 Fig.1 Location of the Panjin wetland and experiment sites

2.2 土壤光谱测量

研究使用了 ASD FieldSpec Pro FR 野外光谱辐射仪在实验室内进行土壤光谱测量,波段范围为 350—2500 nm,其中 350—1000 nm 光谱分辨率为 3 nm,光谱采样间隔为 1.4 nm,1000—2500 nm 光谱分辨率为 10 nm,光谱采样间隔为 2 nm。土壤光谱测量在能控制光照条件的实验室进行,光源为卤素灯,光源入射角为 60°。土壤样本置于直径 10 cm、深 1.5 cm 的器皿内,表面自然推平。传感器探头置于垂直距土壤样本表面 10 cm 处,视场角为 25°。每个土壤样本光谱测量 10 次,取其平均值作为该样本的光谱反射率数据。测量获取的 土壤样本在 350—400 nm 和 2451—2500 nm 波段噪声较大,将其剔除。对 400—2450 nm 波段土壤光谱,采用 小波法进行滤波去噪。

2.3 土壤全氮和全磷测量

土壤全氮测量采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法,即凯氏定氮法;全磷测量采用酸溶-钼锑抗比色法。

3 研究方法

3.1 高光谱数据 Hyperion 和多光谱数据 TM 模拟

EO-1与Landsat-7的卫星轨道基本相同,过赤道的时间只相差1分钟。本文基于实验室光谱数据,模拟 了 Hyperion 高光谱数据和 TM 多光谱数据,进而对比了这两种数据估算湿地土壤全氮和全磷含量的能力。

基于 ENVI 5.1 软件自带的 TM 光谱响应函数,利用 ENVI 5.1 软件的光谱采样功能将 ASD 测量获取的高 光谱反射率重采样,获得模拟的 TM 多光谱反射率。

搭载在 EO-1 平台上的 Hyperion 高光谱传感器,提供了 242 个波段数据,波长覆盖范围为 356—2577 nm, 光谱分辨率为 10 nm。由于无法获取 Hyperion 的光谱响应函数,本文基于 Hyperion 的中心波长与半值波宽, 采用高斯函数模拟了 Hyperion 的光谱响应函数。随后,使用 ENVI 5.1 软件的光谱采样功能,将实验获取的高 光谱反射率重采样,获得模拟的 Hyperion 高光谱反射率。

3.2 基于 bootstrap 的 SMLR 和 PLSR 模型

本文采用 bootstrap 技术结合回归建模方法(包括多元逐步回归模型 SMLR 和偏最小二乘回归模型 PLSR),分别构建了盘锦湿地土壤全氮和全磷含量估算模型。

bootstrap 技术是一种基于再抽样和数据模拟的统计推断方法。当样本具有非线性性质和总体分布特征 难以确定时,采用 bootstrap 技术可以有效提高模型的估算精度^[15]。本研究建模均在 MATLAB 平台上编程计 算完成,具体建模步骤包括:基于原始样本数据采用回归建模方法构建估算模型;在原数据集中随机抽取样本 点,记录其值后再放回原数据集,如此重复 n 次,从而得到 bootstrap 样本;基于 bootstrap 样本,采用回归建模方 法,建立估算模型;重复上述步骤,得到估算模型回归参数数据组,构建基于 bootstrap 样本的回归参数数据集; 计算基于 bootstrap 样本的回归参数与初始回归参数差值的绝对值,取绝对值的 90%分位点作为拒绝域的临 界值;比较初始回归参数的绝对值与临界值,判断其是否通过显著性检验;将经过显著性检验的自变量在原数 据集上重新构建估算模型,重复上述步骤,直到所有变量均通过显著性检验。

3.3 光谱变换技术

本文使用了包括包络线去除(CR)、光谱一阶微分(FD)、光谱倒数的对数(LR)的3种光谱变换技术,分别基于CR、FD、LR和原光谱(R)数据并结合回归建模方法,建立湿地土壤全氮和全磷含量估算模型。

CR、FD、LR 是高光谱遥感较常采用的光谱变换技术。CR 光谱变换技术可以突出光谱曲线的吸收和反射特征^[16]。FD 通过分解重叠混合光谱进行分解以便识别,扩大了光谱特征的差异^[17]。LR 技术不仅增强了可见光范围的光谱差异,而且还降低了由光照条件变化引起的多重变化因素的影响。

3.4 数据分析

将 115 个土壤样本数据随机分成 2 组, 第一组 70 个样本用来建立模型, 第二组 45 个样本用于验证模型。 本文选取决定系数(determination coefficient, R²)和均方根误差(root mean square error, RMSE)作为评价指标。 当 R²值趋近于 1, 并且 RMSE 值趋近于 0 时, 反映了模型预测精度较高, 估算值与实测值吻合程度较好。

4 结果与分析

4.1 研究区湿地土壤氮磷含量特征

盘锦湿地位于辽河下游入海口处,由入海辽河河流携带的泥沙,在潮流和海流作用下,不断于潮间带絮凝、沉积,出露海面后,再在芦苇等湿地植被和微生物作用下形成了湿地土壤^[14]。盘锦湿地土壤中氮素含量 受到植被覆盖、植物残体输入量、微生物活性等的影响,土壤中大部分是有机态氮,约占全氮的 82%—96%,芦 苇群落土壤中有机态氮的矿化速率较高,从而转变为能被植被所吸收利用的非有机态氮。盘锦湿地土壤中磷 素的自然输入主要为地表径流、动植物归还于土壤的残体和大气沉降。随着海水不断冲刷芦苇群落土壤,海 水中的磷酸盐等盐分被截留在土壤中并不断累积,造成芦苇群落土壤中全磷含量的变化。表 1 为研究区湿地 表层土壤样本全氮和全磷含量的基本统计结果。

	Table 1 Statistics results of t	total nitrogen and total phos	phorous content for wetland	soils
分析指标 Analysis parameters	最小值/(mg/g) Minimum	最大值/(mg/g) Maximum	均值/(mg/g) Mean value	标准差/(mg/g) Standard error
全氮 Total nitrogen	0.59	1.99	1.31	0.42
全磷 Total phosphorous	0.51	1.23	0.85	0.19

表1 湿地土壤全氮全磷含量统计特征

4.2 湿地土壤光谱特征

图 2(a)为经实验测量获取的湿地土壤平均反射光谱曲线。图 2 显示,在 400—2450 nm 波段范围内,湿地土壤光谱曲线变化总体较为平缓,总体呈上升趋势。在可见光波段反射率值较低,549—558 nm 之间存在

反射率轻微下降的凹谷。从曲线斜率变化趋势来看,457—562 nm 之间曲线形状微向下凹,562—790nm 波段 范围内反射率迅速上升。在近红外波段,790—800nm 波段之间出现反射率变化的微上凸,800—1356nm 波段 范围内反射率平缓上升。在 1408 nm 存在明显的水分吸收谷,1408—1840 nm 反射率逐渐平缓增加。以 1920 nm 为中心波段出现反射光谱曲线中最为明显的水分吸收谷特征。1920—2040 nm 土壤的光谱曲线随波长增 加迅速上升。2040—2207 nm 呈反射率递减趋势。2207 nm 处存在弱的水分吸收谷。2230—2450 nm 波段湿 地土壤光谱反射率逐渐减小,在 2311 和 2349 nm 为中心波段出现弱的反射率变化的凹谷。

图 2(b)、(c)和(d)分别为采用 CR、FD 和 LR 光谱变换技术后的光谱反射率曲线。对比显示,各光谱曲 线反射率变化明显,光谱特征差异性变化,特别在拐点位置处。经 CR 和 FD 变换后的光谱曲线,随着波长的 增加反射率不再呈近似单一变化,而是其值上下显著波动,出现若干特征吸收带。



图 2 湿地土壤平均反射率(a)、CR 变换(b)、FD 变换(c)和 LR 变换(d)光谱曲线

Fig.2 The spectral curves of the average reflectance (a), CR transformation (b), FD transformation (c) and LR transformation (d) for wetland soils

4.3 基于 PLSR 和 SMLR 的湿地土壤全氮和全磷含量估算精度对比

对比表 2 和表 3,基于 bootstrap 的 SMLR 和 PLSR 各项估算结果总体来看,PLSR 建模方法对湿地土壤全 氮和全磷含量的估算精度较高。对于湿地土壤全氮含量的估算,最高估算精度产生于 CR 光谱变换技术结合 bootstrap PLSR 建模,最低估算精度产生于 LR 结合 bootstrap SMLR 建模。对于湿地土壤全磷含量的估算,最高估算精度产生于 R 结合 bootstrap PLSR 建模,最低估算精度产生于 LR 结合 bootstrap SMLR 建模。

已有研究显示,SMLR 建模方法经常在传递预测模型到其它数据集中存在困难^[18]。PLSR 建模方法通过 将光谱数据分解为非共线潜在变量,从而减小了多重共线性问题的影响。而且,PLSR 建模方法选取最优数 量的潜在变量,排除了过多冗余的解释变量,因此减小了过度拟合的问题^[19]。在本研究中,除了使用 FD 估算 土壤全氮含量以及 CR 估算全磷含量(检验样本)以外,bootstrap PLSR 建模方法的估算精度均高于 bootstrap SMLR。因此,bootstrap PLSR 建模方法适用于研究区湿地土壤全氮和全磷含量的高光谱遥感估算。

4.4 不同光谱变换技术估算湿地土壤全氮和全磷含量精度对比

对比不同光谱变换技术估算湿地土壤全氮含量的精度。表2 是采用基于 bootstrap 的 SMLR 建模方法的 估算精度,CR 光谱变换技术的估算精度最高。其后,估算精度(检验样本)从高到低依次为 FD、R 和 LR。表 3 是采用基于 bootstrap 的 PLSR 建模方法的估算精度,CR 技术的估算精度最高。其后,估算精度(检验样本) 从高到低依次为LR、R和FD。因此,CR光谱变换技术结合 bootstrap PLSR 建模方法,适用于研究区湿地土壤 全氮含量的高光谱遥感估算。

表 2 基于 bootstrap SMLR 的各光谱变换技术估算湿地土壤全氮和全磷含量结果

Table 2The results of estimated total nitrogen and total phosphorous content for wetland soils using various spectral transformation techniquesbased on bootstrap SMLR

营养元素 Nutrition	光谱数据	入选波段	建模样本 Modeling samples		检验样本 Validation samples	
elements	Spectral data	Chosen bands/nm –	R^2	RMSE	R^2	RMSE
全氮	R	553 735 844 2008 2110 2284	0.639	0.259	0.542	0.319
Total nitrogen	CR	749 920 1336 2012 2118 2304	0.783	0.194	0.717	0.221
	FD	1492 2016 2294 2370 2378	0.724	0.220	0.695	0.239
	LR	2113 2180 2230 2235 2278 2310	0.600	0.286	0.483	0.339
全磷	R	543 679 832 1224 1744 2123	0.463	0.192	0.402	0.207
Total	CR	742 778 2004 2323	0.475	0.188	0.469	0.194
phosphorous	FD	1672 1796 2101 2193 2203 2275	0.527	0.177	0.433	0.197
	LR	694 896 1508 2221 2255 2316	0.374	0.214	0.405	0.205

光谱数据(Spectral data)一列中,R(original reflectance)代表原光谱数据,CR(continuum removal)代表包络线去除光谱数据,FD(first difference derivative)代表一阶微分光谱数据,LR(log-transformed, log(1/R))代表光谱倒数的对数光谱数据

表 3 基于 bootstrap PLSR 的各光谱变换技术估算湿地土壤全氮和全磷含	量结果
--	-----

 Table 3
 The results of estimated total nitrogen and total phosphorous content for wetland soils using various spectral transformation techniques

 based on bootstrap PLSR

营养元素	光谱数据 Spectral data	成分个数	建模样本 Modeling samples		检验样本 Validation samples	
Nutrition elements		Component numbers	nbers R^2	RMSE	R^2	RMSE
全氮 Total nitrogen	R	4	0.698	0.226	0.693	0.232
	CR	3	0.815	0.180	0.784	0.192
	FD	4	0.601	0.281	0.642	0.263
	LR	5	0.762	0.205	0.697	0.228
全磷 Total phosphorous	R	3	0.522	0.181	0.573	0.174
	CR	4	0.476	0.186	0.458	0.196
	FD	5	0.553	0.165	0.434	0.198
	LR	5	0.456	0.198	0.413	0.204

对比不同光谱变换技术估算湿地土壤全磷含量的精度。表2显示,FD光谱变换技术的建模精度最高, CR技术的检验精度最高。其后,估算精度(检验样本)从高到低依次为LR和R。表3显示,FD技术的建模 精度最高,R的检验精度最高。其后,估算精度(检验样本)从高到低依次为CR和LR。因此,R结合 bootstrap PLSR 建模方法,适用于研究区湿地土壤全磷含量的高光谱遥感估算。

一些研究表明,CR、FD和LR光谱变换技术,可以用来增强光谱数据与土壤养分含量之间的相关关系,而 且其估算精度常常超过了使用原反射率光谱的预测精度^[20-22]。在本研究中,对湿地土壤全氮含量的估算,采 用 bootstrap SMLR 建模方法时,CR和FD技术的估算精度较R光谱有了较为明显的提高,而采用 bootstrap PLSR 建模方法时,CR和LR技术较R光谱的估算精度也出现了一定幅度的改进。在对湿地土壤全磷含量的 估算中,采用 bootstrap SMLR 建模方法时,CR和FD技术的估算精度比R光谱有了提高,但采用 bootstrap PLSR 建模方法时,基于R光谱数据的检验样本估算精度达到了最高。因此,CR、FD和LR光谱变换技术的 应用对于土壤养分含量估算精度的提高,还需要研究其适用性的条件参量。当R光谱数据的估算精度不能 满足应用需要时,可以考虑采用CR、FD和LR等光谱变换技术。

表 2 显示, 采用 bootstrap SMLR 建模方法时, 不同光谱变换技术应用于湿地土壤全氮和全磷含量估算过

程中,入选波段大部分位于短波红外(SWIR)波谱范围。一些研究表明,SWIR 相比于可见光和近红外波段, 其主要优势包括:大气窗口 SWIR 波谱范围的总透过率超过 90%、地物反射信号较强、较易诊断的地物特征 等^[11]。因此,SWIR 波段的入选有利于提高湿地土壤全氮和全磷含量的估算精度。

4.5 模拟高光谱数据 Hyperion 和多光谱数据 TM 的估算精度对比

表 4 和表 5 分别显示了基于 bootstrap SMLR 和 PLSR 的模拟光谱数据估算湿地土壤全氮和全磷含量的精度对比。图 3 为基于检验样本数据,采用 bootstrap PLSR 建模方法,湿地土壤全氮和全磷含量的估算结果与实测值的比较。采用 bootstrap SMLR 和 bootstrap PLSR 的建模方法中,模拟高光谱数据 Hyperion 的土壤全氮和 全磷含量估算精度均高于多光谱数据 TM,模拟 Hyperion 的估算精度更接近于实测光谱的估算精度。而且, PLSR 建模方法的估算精度高于对应 SMLR 的估算精度,进一步证实了 bootstrap PLSR 建模方法对研究区湿地 土壤全氮和全磷含量估算的适用性。类似于实测光谱数据的估算结果,在建模样本和检验样本中,模拟 Hyperion 和 TM 对湿地土壤全氮含量的估算精度普遍高于对应土壤全磷含量的估算精度。

表 4 基于 bootstrap SMLR 的模拟光谱数据估算湿地土壤全氮和全磷含量结果

Table 4 The results of estimated total nitrogen and total phosphorous content for wetland soils using simulated spectral data based on bootstrap SMLR

营养元素	光谱数据	入选波段/nm	建模样本 Modeling samples		检验样本 Validation samples	
Nutrition elements	Spectral data	Chosen bands/ nm -	R^2	RMSE	R^2	RMSE
全氮 Total nitrogen	模拟 TM	B2 B4 B7	0.549	0.309	0.496	0.341
	模拟 Hyperion	B24 B45 B57 B182 B194 B212	0.598	0.285	0.517	0.326
全磷 Total phosphorous	模拟 TM	B2 B3 B4 B5 B7	0.401	0.206	0.388	0.209
	模拟 Hyperion	B23 B38 B56 B99 B155 B195	0.434	0.197	0.411	0.204

基于 bootstrap SMLR 建模方法的模拟光谱数据估算湿地土壤全氮和全磷含量,从入选的波段来看(表4),模拟光谱数据(包括高光谱数据 Hyperion 和多光谱数据 TM)入选波段与原光谱数据入选波段非常接近。 对湿地土壤全氮含量的估算,模拟 Hyperion 和 TM 光谱数据的入选波段,均包括可见光、近红外和 SWIR 波段。相比之下,对湿地土壤全磷含量的估算,模拟 TM 光谱数据的入选波段增加了红光和 SWIR-1 波段。

表 5 基于 bootstrap PLSR 的模拟光谱数据估算湿地土壤全氮和全磷含量结果

Table 5 The results of estimated total nitrogen and total phosphorous content for wetland soils using simulated spectral data based on bootstrap PLSR

营养元素 Nutrition elements	光谱数据 Spectral data	成分个数 Component numbers ——	建模样本 Modeling samples		检验样本 Validation samples	
			R^2	RMSE	R^2	RMSE
全氮 Total nitrogen	模拟 TM	2	0.624	0.268	0.615	0.271
	模拟 Hyperion	5	0.669	0.249	0.664	0.260
全磷 Total phosphorous	模拟 TM	3	0.471	0.187	0.503	0.185
	模拟 Hyperion	5	0.516	0.184	0.558	0.164

高光谱数据可以非常细致地反映地物的波谱特征,为湿地土壤生化组分研究提供了连续的细分光谱数据。高光谱数据 Hyperion 和多光谱数据 TM 相比较,光谱分辨率有了较大的提高。在可见光、近红外和 SWIR 光谱范围,TM 设置了 6 个波段,而 Hyperion 具有 198 个有效波段。光谱分辨率的提高,特别是近红外和 SWIR 波谱范围内光谱分辨率的提高,有利于 Hyperion 应用于反演湿地土壤全氮和全磷含量时精度的提高。 另外,Hyperion 相比于 TM,具有更高的信噪比(SNR)和辐射分辨率,Hyperion 的 SNR 和辐射分辨率值分别为 190 和 16 bit,而 TM 为 50 和 8 bit。因此,Hyperion 较 TM 包含的信息量更大,其对湿地土壤全氮和全磷组分的估算能力也较强。



图 3 基于实测光谱、模拟 TM 和 Hyperion 数据的湿地土壤全氮(a、b、c)和全磷(d、e、f)含量估算值与测量值比较 Fig.3 Estimated versus measured total nitrogen (a, b, c) and total phosphorous (d, e, f) content for wetland soils based on measured spectrums, simulated TM and Hyperion data

图 4 显示了基于实测光谱、模拟 Hyperion 和 TM 光谱反射率数据,PLSR 建模时对应的回归系数。为了较为直观地对比各回归系数曲线,图 4 中采用了利于对比曲线形状的堆叠方式,因此没有标注 Y 轴坐标。回归系数表示了自变量对因变量的影响程度。其值越大,表示自变量对因变量的影响越大。图 4 表明,对湿地土壤全氮或全磷含量的估算中,基于 3 种光谱数据的各回归系数曲线变化趋势较为相似,模拟 Hyperion 光谱与实测光谱的回归系数曲线相似性更高。这是由于模拟 Hyperion 数据具有更高的光谱分辨率。





Fig.4 PLSR coefficients of estimating total nitrogen and total phosphorous content for wetland soils

5 结论

本文的主要研究结论包括:

(1)对研究区湿地土壤全氮和全磷含量的估算,相比于 bootstrap SMLR 建模方法, bootstrap PLSR 建模方法的估算精度较高。对盘锦湿地土壤全氮含量的估算,最高估算精度产生于 CR 光谱变换技术结合 bootstrap PLSR 建模;对湿地土壤全磷含量的估算,最高估算精度产生于原光谱数据(R)结合 bootstrap PLSR 建模。因此, bootstrap PLSR 建模方法适用于本文研究主题的高光谱遥感估算。

(2) 在本研究中, 对湿地土壤全磷含量的估算中, 基于 bootstrap PLSR 的 R 光谱数据的检验样本估算精度 达到了最高。除此之外, 对比于 CR、FD 和 LR 光谱变换技术, R 光谱的对应估算精度并不是最高的。因此, 一 些光谱变换技术可以用来提高对湿地土壤养分含量的估算精度, 但其适用条件还需要进一步研究。

(3)模拟高光谱数据 Hyperion 对湿地土壤全氮和全磷含量的估算精度均高于模拟多光谱数据 TM,模拟 Hyperion 的估算精度更接近于实测光谱的估算精度,从而证明了高光谱数据对湿地土壤全氮和全磷组分的较强估算能力。

湿地土壤的组分变化和土壤源的可持续性对于湿地生态系统具有重要的影响作用。因此,了解湿地土壤 生化特性(包括土壤全氮、全磷含量以及它们与其它生态特性的关系)的空间分布和变化,对湿地生态系统评 估、恢复和管理具有重要的意义。

参考文献(References):

- Wang W, Sardans J, Zeng C, Zhong C, Li Y, Peñuelas J. Responses of soil nutrient concentrations and stoichiometry to different human land uses in a subtropical tidal wetland. Geoderma, 2014, 232-234: 459-470.
- [2] Susan Newman, Paul V McCormick, Shi Li Miao, James A Laing, W Chad Kennedy, Mary B O'Dell. The effect of phosphorus enrichment on the nutrient status of a northern Everglades slough. Wetlands Ecology and Management, 2004, 12(2): 63-79.
- [3] Alongi D, Trott L, Wattayakorn G, Clough B. Below-ground nitrogen cycling in relation to net canopy production in mangrove forests of southern Thailand. Marine Biology, 2002, 140(4): 855-864.
- [4] 王维奇,徐玲琳,曾从盛, 仝川, 张林海. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [5] Cécile Gomez, Raphael A Viscarra Rossel, Alex B McBratney. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: an Australian case study. Geoderma, 2008, 146(3/4): 403-411.
- [6] 丁建丽,姚远,王飞.干旱区土壤盐渍化特征空间建模.生态学报,2014,34(16):4620-4631.
- [7] 史舟, 王乾龙, 彭杰, 纪文君, 刘焕军, 李曦, Raphael A Viscarra Rossel. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 978-988.
- [8] 王璐, 蔺启忠, 贾东, 石火生, 黄秀华. 多光谱数据定量反演土壤营养元素含量可行性分析. 环境科学, 2007, 28(8): 1822-1828.
- [9] Cozzolino D, Morón A. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1/2); 78-85.
- [10] Ben-Dor E, Patkin K, Banin A, Karnieli A. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data a case study over clayey soils in Israel. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(6): 1043-1062.
- [11] Naveen J P Anne, Amr H Abd-Elrahman, David B Lewis, Nicole A Hewitt. Modeling soil parameters using hyperspectral image reflectance in subtropical coastal wetlands. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33: 47-56.
- [12] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 周才平, 王庆改. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局. 地理研究, 2004, 23(5): 614-622.
- [13] Grunwald S, Reddy K R, Newman S, DeBusk W F. Spatial variability, distribution and uncertainty assessment of soil phosphorus in a south Florida wetland. Environmetrics, 2004, 15(8): 811-825.
- [14] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001: 34-78.
- [15] 王惠文,吴载斌,孟洁.偏最小二乘回归的线性与非线性方法.北京:国防工业出版社,2006:267-274.
- [16] Roger N Clark, Ted L Roush. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B7): 6329-6340.

- [17] 牛铮,陈永华,隋洪智,张庆员,赵春江.叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析.遥感学报,2000,4(2):125-130.
- [18] Grossman Y L, Ustin S L, Jacquemoud S, Sanderson E W, Schmuck G, Verdebout J. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3): 182-193.
- [19] R A Viscarra Rossel. Robust modelling of soil diffuse reflectance spectra by "bagging-partial least squares regression". Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2007, 15(1): 39-47.
- [20] 高灯州,陈桂香,章文龙,颜燕燕,曾从盛.基于改进 OII 的湿地土壤有机质高光谱反演.实验室研究与探索, 2014, 33(6): 19-24.
- [21] 徐永明, 蔺启忠, 黄秀华, 沈艳, 王璐. 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究. 地理与地理信息科学, 2005, 21 (1): 19-22.
- [22] 王莉雯, 卫亚星. 植被氮素浓度高光谱遥感反演研究进展. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2823-2827.