

DOI: 10.5846/stxb201406241303

章文龙, 曾从盛, 高灯州, 陈晓艳, 林伟. 闽江河口湿地土壤全磷高光谱遥感估算. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Zhang W L, Zeng C S, Gao D Z, Chen X Y, Lin W. Estimating the soil total phosphorus content based on hyper-spectral remote sensing data in the Min River estuarine wetland. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

闽江河口湿地土壤全磷高光谱遥感估算

章文龙^{1,2}, 曾从盛^{1,2,3,*}, 高灯州^{1,2}, 陈晓艳¹, 林伟¹

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007

3 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

摘要: 磷是湿地生态系统必需和限制性元素, 利用高光谱遥感数据对其进行估算对实现湿地土壤磷素快速和准确定量具有重要意义。选取闽江河口湿地作为研究区, 于 2013 年 5 月, 采集 16 个土壤剖面 80 个样本作为估算与验证模型样本; 基于光谱指数建立土壤全磷(TP)含量估算模型, 其中光谱指数包括原始光谱反射率(R)、比值土壤指数(RSI)、归一化土壤指数($NDSI$)和有机质诊断指数(OII)。此外, 进一步分析反射光谱与不同形态磷、TP 与有机质之间关系, 以期初步揭示河口湿地土壤 TP 估算的机理。研究结果表明, 闽江河口湿地土壤 TP 含量与 R 相关系数较高的区域分布在 360—560 nm, 并在 406 nm 处达到最大值 -0.816; 光谱指数 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $RSI(R_{460}, R_{810})$ 、 $RSI(R_{560}, R_{580})$ 、 $NDSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $NDSI(R_{460}, R_{830})$ 、 $NDSI(R_{560}, R_{580})$ 和 $OII(R_{446})$ 与土壤 TP 含量均有较高的相关系数, 能较好的用于 TP 含量的估算; 各估算模型决定系数(r^2)和均方根误差($RMSE$)分别在 0.657—0.805 和 0.052—0.067 之间; 验证模型 r^2 和 $RMSE$ 分别在 0.606—0.893 和 0.037—0.044 之间。分潮滩建立 TP 含量估算模型是可行的, 并且能提高部分光谱指数的估算精度。土壤 TP 含量的估算精度与磷素的组成有关, 其中与铁吸附态磷关系较为密切, 钙吸附态和铝吸附态磷关系较弱。土壤 TP 与有机质和氧化还原环境的存在密切关系可能是湿地土壤 TP 含量估算的重要机理。

关键词: 全磷; 高光谱; 湿地土壤; 闽江河口

Estimating the soil total phosphorus content based on hyper-spectral remote sensing data in the Min River estuarine wetland

ZHANG Wenlong^{1,2}, ZENG Congsheng^{1,2,3,*}, GAO Dengzhou^{1,2}, CHEN Xiaoyan¹, LIN Wei¹

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Research Center of Wetlands in Subtropical Region, Fuzhou 350007, China

3 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

Abstract: Phosphorus (P) is an essential and limiting nutrient in wetland ecosystems and it plays a vital role in eutrophication. Remote sensing (RS) offers an up-to-date and relatively accurate means to measure the soil P content. Recently, some studies have shown that it was feasible to estimate the total P (TP) content of terrestrial ecosystem soil based on hyper-spectral RS data. However, little information is available on TP content estimation by RS technology on wetland soil. The aim of this study was to estimate the TP content of wetland soil using hyper-spectral RS data. Min river estuarine wetland, located in the subtropical zone, is one of the most typical and important estuarine wetlands in southeast China. Soil samples, from Shanyutan tidal marsh in the Min River Estuary, were collected in sixteen profiles at five depths (0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm, and 40—50 cm) along an elevation gradient, in May of 2013.

基金项目: 国家基础科学人才培养基金(J1210067)

收稿日期: 2014-06-24; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cszeng@fjnu.edu.cn

Estimation and validation models were constructed by spectrum parameters, including original spectral reflectance (R), simple ratio soil index (RSI), normalized difference soil index ($NDSI$), and organic matter diagnosis index (OII) calculated by optimal bands. The results indicated that the spectral reflectance of the soil increased with depth at 350—580 nm, while an opposite trend was observed at 580—2500 nm. Soil TP content showed a negative correlation with R at 350—600 nm, whereas a positive correlation was observed at 600—2500 nm. The highest correlation coefficient value was -0.816 and occurred at 406 nm. The correlation coefficient between soil TP content and OII exhibited a bimodal distribution, with peaks at 446 nm ($r = -0.843$) and 634 nm ($r = 0.798$). $NDSI$ and RSI were each calculated by bands in three zones, (420—440 nm and 440—590 nm, 460—470 nm and 590—1000 nm, and 550—590 nm and 550—590 nm, respectively), which had higher correlation coefficients with TP content than those in other zones. The determination coefficient (r^2) and root means square error ($RMSE$) of estimation models ranged from 0.657—0.805 and 0.052—0.067, respectively, and those of the validation models ranged from 0.606—0.893 and 0.037—0.044, respectively. These results indicate that TP content of the Min River estuarine soil could be estimated by most of the selected parameters. The evaluation parameters of the estimation models supported that estimating the TP content of high and middle tidal flats soil individually could improve the estimation accuracy of some parameters such as $RSI(R_{430}, R_{830})$, $RSI(R_{460}, R_{810})$, and $NDSI(R_{430}, R_{830})$. Additionally, the estimation accuracy of soil TP content also depended on the P fractions. Iron bound phosphorus (Fe-P), occluded phosphorus (O-P), and organic phosphorus (Org P) had higher correlation coefficients with R than did aluminum bound phosphorus (Al-P) and calcium bound phosphorus (Ca-P). The corresponding changes in the contents of TP within organic matter and a redox environment in wetland soil could be used as important mechanisms for estimating soil TP content. In conclusion, it was feasible to estimate TP content of subtropical estuarine wetland soils based on hyper-spectral RS data.

Key Words: Total phosphorus; Hyper-spectral; Wetland soil; Min River Estuary

磷作为重要生源要素,对生物的生长起到重要的影响,同时其也是重要的污染物质之一。河口湿地土壤是磷的重要源、汇及转化器^[1],在调节磷素循环方面发挥中重要的作用。以往土壤磷素的测定方法主要为化学方法,高光谱遥感技术的出现为土壤养分的快速和无损测定提供了新的方法。利用高光谱遥感手段实现湿地土壤全磷(TP)含量快速检测对实现生态系统的科学管理具有重要意义。

目前,已有较多学者对土壤有机质^[2, 3]和全氮^[4]含量高光谱遥感估算进行了大量的研究。磷作为土壤另外一个重要组分,也有部分学者尝试利用高光谱数据,基于光谱指数,采用回归分析、偏最小二乘法和神经网络模型等手段对陆地生态系统土壤 TP 和速效磷进行估算。研究结果表明利用高光谱手段估算陆地生态系统土壤 TP 和速效磷是可行的,但不同类型土壤的敏感波段以及模型的估算精度不尽一致^[5-11],还有待进一步开展大量相关研究。湿地是介于陆地和水生生态系统之间的一种独特的生态系统;河口则是一种特殊的湿地,其在潮汐作用下,氧化还原交替,使得土壤也表现出独特的性质。遗憾的是,目前关于河口湿地土壤 TP 含量的高光谱估算还未见报道。基于此,以亚热带闽江河口为研究区,采集不同潮滩土壤样本,室内测定其反射光谱,尝试利用高光谱遥感数据建立湿地土壤 TP 含量的估算模型,通过这一研究以期拓展对湿地土壤 TP 含量高光谱遥感估算可行性和精度的认识。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

闽江河口湿地国家自然保护区是中国东南沿海典型的亚热带河口湿地之一(图 1)。其气候属亚热带季风气候,暖热湿润,年均气温为 19.3 °C,年平均降水量 1350 mm 左右,年均降水日数为 153 d^[12]。土壤为滨海盐土和沙土,其粒径以粉砂为主(60%以上)。土壤 pH 值呈偏酸性到中性。区内潮汐属正规半日潮。土著植

被主要有芦苇(*Phragmites australis*)、短叶茳芏(*Cyperus malaccensis*)和藙草(*Scirpus triqueter*),其中芦苇主要分布于中高潮滩,短叶茳芏主要分布于中低潮滩^[13]。本世纪初,外来物种互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵本区中低潮滩,2010 年面积达到 306.94 hm²^[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

潮汐是河口湿地最显著的特征之一,其对土壤磷的源和汇起到重要作用。为使得所采集的土壤样本具有代表性。于 2013 年 5 月在闽江口鱗鱼滩湿地选取典型潮滩,沿水文梯度设置样线(横跨高潮滩和中潮滩,图 1),采集 16 个样点(每 2 个样点间距 20 m)。每个样点利用钢制土钻(长:80 cm,直径:10 cm)采集土壤样品,并进一步分割出不同深度(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 和 40—50 cm)土样。将所采集的土壤样品在室温条件下自然风干,过 2 mm 尼龙筛,并去除明显可见的根系。然后取一部分过 2 mm 筛土样,全部过 0.149 mm 筛,保存,待测。土壤有机质用浓 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法测定。土壤 TP 含量采用浓 H₂SO₄-HClO₄消煮法测定^[15];用 1 M 的 H₂SO₄振荡 16 h 浸提,然后将灼烧(550 °C, 1 h)与未灼烧的土样相减,作为有机磷(Org P)^[16];无机磷(IP)的连续分级方法参考 Chang and Jackson^[17],将 IP 进一步分为铝吸附态磷(Al-P)、铁吸附态磷(Fe-P)、钙吸附态磷(Ca-P)和闭蓄态磷(O-P),每组实验同时做空白对照实验。不同形态磷在浸提后用连续流动分析仪(San++, 荷兰)测定,每个样品做 2 个平行,误差小于 5%。

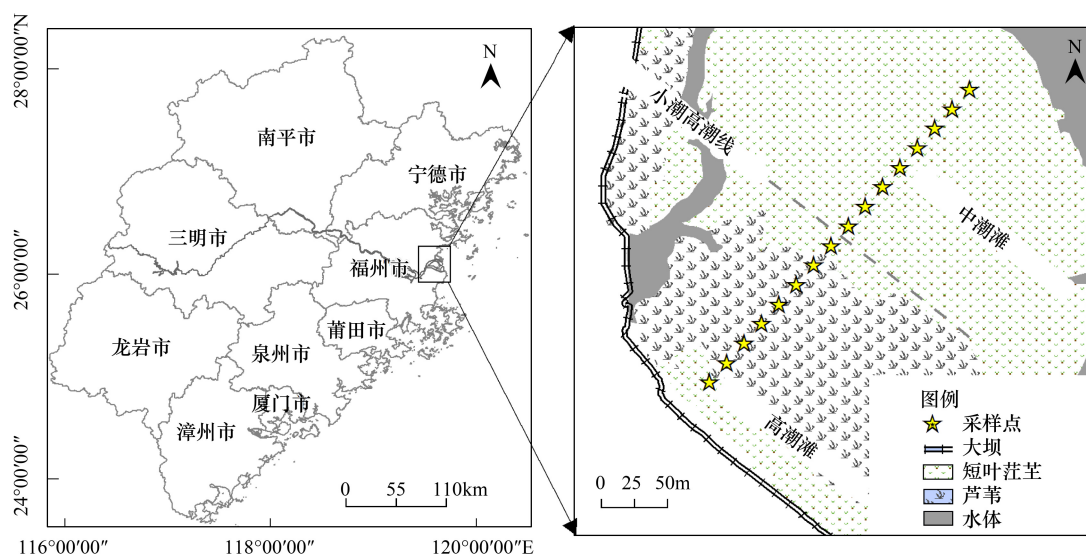


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Map of sampling sites

1.2.2 土壤反射光谱测定

土壤反射光谱利用美国 ASD (Analytical Spectra Devices, Inc) 公司生产的 FieldSpec2500 进行测定。测量波段范围为 350—2500 nm,其中在 350—1000 nm 光谱分辨率为 3 nm,光谱间隔为 1.4 nm;在 1000—2500 nm 光谱分辨率为 10 nm,光谱间隔为 2 nm。利用 BRDF 系统建立相应的测试环境:探头垂直向下,视场角 25°,距离土壤样品(0.149 mm)表面约为 12 cm,光源使用光谱仪配套功率为 50 W 的卤素灯,入射天顶角设置为 45°,入射方位角 0°,观测天顶角 0°。测定时,将土壤样品平铺(厚度约为 0.5 cm,直径约为 10 cm)放置于对采集波段接近全吸收的工作台上,测定其反射光谱,同时为确保测量精度,每次测定保存 8 条光谱,30 min 进行一次白板校正。

1.2.3 统计分析

使用 ViewSpec 软件中的 Splice Correction 修正功能对土壤反射光谱数据进行修正;使用均值平滑对光谱进行平滑处理;利用 SPSS 17.0 计算土壤 TP 含量和反射光谱,TP 含量和光谱指数之间的相关关系,并基于回

归分析法建立估算和验证模型;利用 Surfer 8.0 和 Origin 8.0 作图。在 80 个样本中随机挑选出 12 个样本作为验证模型样本,剩余 68 个样本作为估算模型样本。用 SPSS 17.0 中 Descriptive statistics 模块对估算和验证模型样本的 TP 含量分布进行检验,检验结果如表 1 所示。表 1 表明估算和验证模型样本均通过随机分布检验。

表 1 TP 含量分布特征(g/kg)

Table 1 The distribution of total phosphorus content

模型 Model	样本数 <i>n</i>	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	显著度 <i>P</i> _{Shapiro-Wilk}
估算 Estimation	68	0.38	0.91	0.66	0.116	0.484
验证 Validation	12	0.57	0.81	0.67	0.067	0.565

1.2.4 光谱指数定义

光谱指数被认为是估算土壤养分信息的重要手段之一,其不仅简单便于应用,而且与原始反射光谱(R)相比,可一定程度降低噪声,提高估算的稳定性。本研究中,土壤 TP 含量与 R 在 350—600 nm 呈负相关,在 600—2500 nm 呈正相关(图 3),这与植物生物量和归一化植被指数($NDVI$)和简单比植被指数(SR)的关系相似。因此,考虑构建简单比值土壤指数(RSI)和归一化差值土壤指数($NDSI$)作为土壤 TP 含量的估算参数。此外,土壤 TP 含量估算的机理可能同有机质的存在相似之处。因此,进一步选取土壤有机质诊断指数(OII)作为其估算参数。各估算参数的定义如表 2。

表 2 TP 含量分布特征(g/kg)

Table 2 Parameters definition

参数 Parameters	定义 Definition	文献 References
R_{λ}	在波段 λ 处的土壤反射光谱	——
$RSI(R_i, R_j)$	$RSI = R_j / R_i$	本文
$NDSI(R_i, R_j)$	$NDSI = (R_j - R_i) / (R_i + R_j)$	本文
$OII(R_{\lambda})$	$OII(R_{\lambda}) = R_{\lambda} / \overline{R_{450-750}}$	[3]

R : 土壤原始光谱反射率(original spectral reflectance); RSI : 简单比值土壤指数(simple ratio soil index); $NDSI$: 归一化差值土壤指数(normalized difference soil index); OII : 有机质诊断指数(organic matter diagnosis index)

1.2.5 检验方法

为衡量各参数的估算精度,分别选取均方根误差($RMSE$)和决定系数(r^2)作为评价指标。在样本数相同的条件下,一般认为 r^2 越大, $RMSE$ 越小,估算精度越高。 $RMSE$ 计算公式如公式(1)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad (1)$$

式中, y_i 为实测值, $\hat{y}$ 为估算值, i 为样点号, n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 土壤反射光谱特征

闽江河口湿地土壤反射率在 350—800 nm 上升较快,在 800 nm 以后反射率趋于平稳,并在 1380 nm、1880 nm 和 2200 nm 附近出现吸收谷(图 2)。此外,为对比不同深度土壤光谱特征,分别计算不同深度土壤反射率的平均值(图 2)。图 2 表明,在 350—580 nm 处,越深的土壤,其反射率越大;在 580—2500 nm 则与之相反。

2.2 土壤 TP 含量估算的最佳波段选取

2.2.1 基于 R 和 OII 土壤 TP 含量估算的最佳波段选取

闽江河口湿地土壤 TP 含量与 R 在 350—600 nm 呈负相关,在 600—2500 nm 呈正相关,相关系数在 406 nm 处达到最大,最大值为-0.816(图 2)。不同波段反射率计算的 OII 与 TP 含量的相关系数在 350—2500 nm 范围内存在两个极值,一个在 446 nm,一个在 634 nm,值分别为-0.843 和 0.798(图 2)。因此,考虑 $OII(R_{446})$ 作为土壤 TP 含量的估算参数。

2.2.2 基于 $NDSI$ 和 RSI 土壤 TP 含量估算的最佳波段选取

图 3A 表明,在 1000 nm 以后,土壤 TP 含量与 R 的相关系数较小,且噪音较大。因此,选取 350—1000 nm

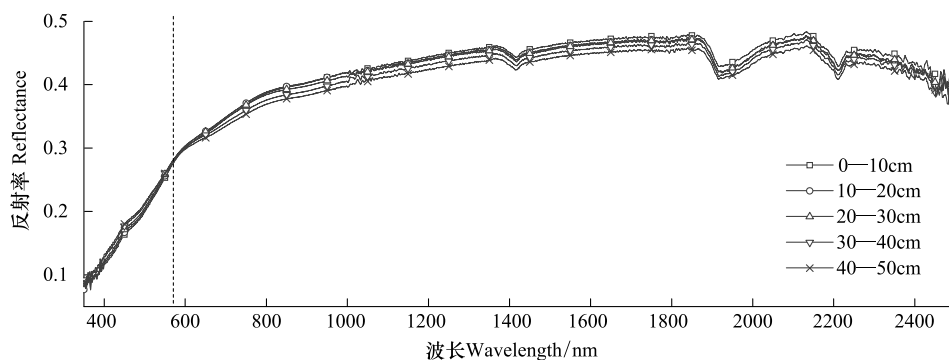
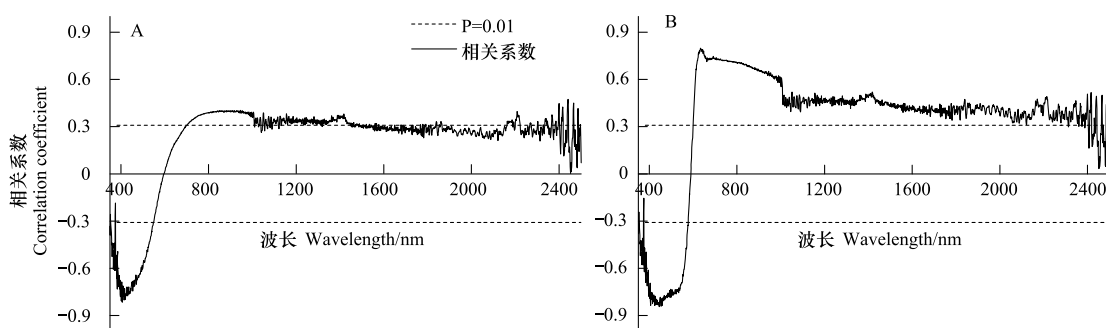


图 2 土壤反射光谱特征

Fig. 2 The characteristic of soil reflectance

图 3 土壤 TP 含量与 R (A) 及 OII (B) 相关系数 ($n=80$)Fig. 3 The correlation between R and TP (A), OII and TP (B) ($n=80$)

内的波段作为 $NDSI$ 和 RSI 的计算波段。任意两个波段组合计算所得的 $NDSI$ 与土壤 TP 含量, RSI 与土壤 TP 含量的相关系数分布如图 4 所示。由图 4 可以看出 $NDSI$ 和 RSI 与土壤 TP 含量的相关系数分布大致相似。相关系数较高的波段组合主要集中在 3 个区域。一是 420—440 nm 与 590—1000 nm 的波段组合, 最佳估算参数分别为 $NDSI(R_{430}, R_{830})$ 和 $RSI(R_{430}, R_{830})$, 最大相关系数均为 0.835。二是 460—470 nm 与 590—1000 nm 的波段组合, 最佳估算参数分别为 $NDSI(R_{460}, R_{830})$ 和 $RSI(R_{460}, R_{810})$, 最大相关系数分别为 -0.813 和 -0.812。另一个是 550—590 nm 内波段组合, 最佳估算参数分别为 $NDSI(R_{560}, R_{580})$ 和 $RSI(R_{560}, R_{580})$, 相关系数均为 0.832。此外, 对比图 4A 和图 4B 进一步表明, 对 $NDSI$ 而言, 各波段组合估算精度是对称的, RSI 则不是完全对称。

2.3 土壤 TP 含量估算模型构建与验证

基于选取的光谱指数分别建立高、中和整个潮滩样本土壤 TP 含量估算与验证模型, 结果如表 3 所示。表 3 表明所选取的光谱指数均能较好的用于不同潮滩及整个潮滩样本 TP 含量的估算(估算与验证模型均通过了置信水平为 0.05 的检验)。进一步比较同一指数对不同潮滩样本 TP 含量的估算精度发现, 将高潮滩和中潮滩样本分开, 分别建立估算模型, 能够提高部分光谱指数(如 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $RSI(R_{460}, R_{810})$ 和 $NDSI(R_{430}, R_{830})$) 的估算精度, 而对其他指数的估算精度影响不大。因此, 除部分指数外, 可以考虑用整个潮滩样本建立 TP 含量估算与验证模型。本研究中, 整个潮滩样本 TP 含量估算模型 r^2 和 $RMSE$ 分别在 0.657—0.805 和 0.052—0.067 之间; 验证模型 r^2 和 $RMSE$ 分别在 0.606—0.893 和 0.037—0.044 之间。综合 r^2 和 $RMSE$ 表明, $RSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $NDSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $RSI(R_{560}, R_{580})$ 、 $NDSI(R_{560}, R_{580})$ 和 $OII(R_{446})$ 的估算精度略高于其他参数。

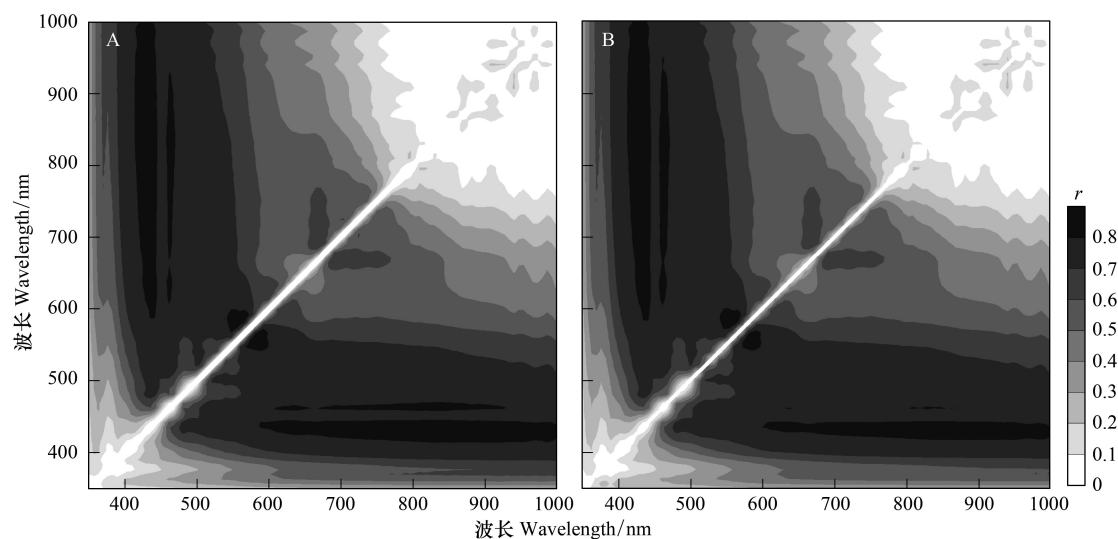


图 4 土壤 TP 含量与 *NDSI* (A) 和 *RSI* (B) 相关系数分布图 ($n=80$)

Fig. 4 Correlation between *NDSI* and total phosphorus content (A), *RSI* and total phosphorus content (B) ($n=80$)

表 3 土壤 TP 含量估算与验证模型

样本 Sample	估算模型 Estimation model				验证模型 Validation Model	
	变量 Variable	方程 Equation	r^2	均方根误差 RMSE	r^2	均方根误差 RMSE
高潮滩	R_{406}	$y = -10.054x + 1.946$	0.751 **	0.070	0.946 **	0.043
High tidal flat ($T=39, V=6$)	$RSI(R_{430}, R_{830})$	$y = -3.281x + 1.918$	0.745 **	0.071	0.709 *	0.058
	$RSI(R_{460}, R_{810})$	$y = -3.117x + 2.09$	0.739 **	0.071	0.793 **	0.049
	$RSI(R_{560}, R_{580})$	$y = -13.933x + 13.659$	0.72 **	0.074	0.885 **	0.048
	$NDSI(R_{430}, R_{830})$	$y = 3.121x - 0.734$	0.74 **	0.071	0.715 *	0.058
	$NDSI(R_{460}, R_{830})$	$y = 3.33x - 0.593$	0.741 **	0.071	0.808 **	0.049
	$NDSI(R_{560}, R_{580})$	$y = 25.983x - 0.242$	0.719 **	0.074	0.885 **	0.048
	$OII(R_{446})$	$y = -3.132x + 2.508$	0.726 **	0.073	0.662 *	0.056
中潮滩	R_{406}	$y = -5.947x + 1.414$	0.318 **	0.056	0.631 *	0.043
Middle tidal flat ($T=29, V=6$)	$RSI(R_{430}, R_{830})$	$y = -2.552x + 1.675$	0.739 **	0.035	0.684 *	0.058
	$RSI(R_{460}, R_{810})$	$y = -2.462x + 1.841$	0.690 **	0.038	0.826 **	0.049
	$RSI(R_{560}, R_{580})$	$y = -12.746x + 12.571$	0.604 **	0.043	0.912 **	0.048
	$NDSI(R_{430}, R_{830})$	$y = 2.484x - 0.411$	0.740 **	0.035	0.689 *	0.058
	$NDSI(R_{460}, R_{830})$	$y = 2.677x - 0.293$	0.682 **	0.038	0.826 **	0.049
	$NDSI(R_{560}, R_{580})$	$y = 23.805x - 0.146$	0.603 **	0.043	0.912 **	0.048
	$OII(R_{446})$	$y = -2.535x + 2.176$	0.720 *	0.036	0.65	0.056
全部	R_{406}	$y = -9.302x + 1.846$	0.665 **	0.066	0.833 **	0.044
Total ($T=68, V=12$)	$RSI(R_{430}, R_{830})$	$y = -2.967x + 1.816$	0.702 **	0.063	0.701 **	0.042
	$RSI(R_{460}, R_{810})$	$y = -2.706x + 1.925$	0.66 **	0.067	0.768 **	0.038
	$RSI(R_{560}, R_{580})$	$y = -13.583x + 13.342$	0.694 **	0.063	0.893 **	0.037
	$NDSI(R_{430}, R_{830})$	$y = 2.829x - 0.585$	0.698 **	0.063	0.705 **	0.042
	$NDSI(R_{460}, R_{830})$	$y = 2.885x - 0.401$	0.657 **	0.067	0.776 **	0.038
	$NDSI(R_{560}, R_{580})$	$y = 25.326x - 0.210$	0.692 **	0.064	0.893 **	0.037
	$OII(R_{446})$	$y = -2.965x + 2.420$	0.712 **	0.062	0.639 **	0.041

* : $P<0.05$, * * : $P<0.01$, T :建模样本数, V :验证样本数。

为进一步验证各光谱指数对土壤 TP 含量的估算效果,以 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $RSI(R_{560}, R_{580})$ 和 $OII(R_{446})$ 为例,绘制其估算模型和验证模型散点图(整个潮滩),结果如图 5 所示。图 5 表明,所选取的参数均能较好的估算土壤 TP 含量。与其他估算参数相比, $RSI(R_{430}, R_{830})$ 的散点分布较为特殊,存在一些较为离散的样本(TP 含量估算值比实测值偏高),并且这些样本主要来自高潮滩 20 cm 以下样本。

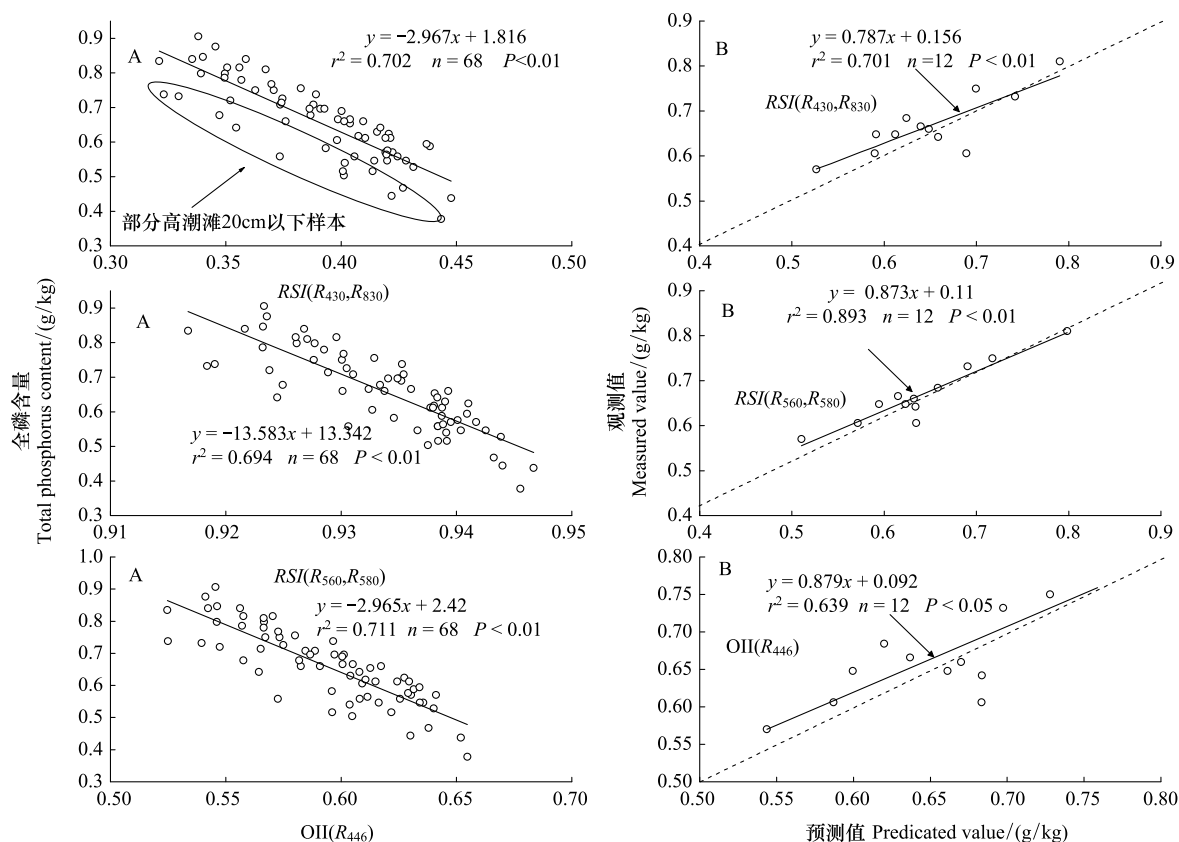


图 5 土壤 TP 含量估算(A)与验证(B)模型

Fig. 5 The estimation (A) and validation (B) models for soil total phosphorus content estimation

3 讨论

3.1 湿地土壤 TP 含量高光谱遥感估算机理

为探讨河口湿地土壤 TP 含量的高光谱遥感估算机理,将土壤 TP 含量与有机质含量做相关分析(图 6 A)。从整个潮滩样本来看,TP 含量与有机质含量存在极显著相关($r^2 = 0.254, n = 80, P < 0.01$),但高潮滩和中潮滩样本两者之间关系存在一定差异。高潮滩样本 TP 和有机质含量变幅较大,且两者相关性较高($r^2 = 0.505, n = 45, P < 0.01$);中潮滩 TP 和有机质含量变幅减小,两者相关性也相应减弱($r^2 = 0.027, n = 35, P > 0.05$)。而表 3 表明,基于光谱指数分别建立高潮滩和中潮滩土壤 TP 含量估算模型是可行的。由此可知,湿地土壤 TP 含量的高光谱遥感估算的机理与有机质的存在有一定的相似之处,但并不完全与之一致。湿地氧化还原环境的空间变化可能是影响土壤 TP 含量高光谱遥感估算精度的另外一个重要因素。徐金鸿等^[18]指出,氧化铁能强烈吸收太阳能,当氧化铁含量较高时,其光谱反射率则越低。Luo 等^[19]对闽江河口沿潮滩铁分级特征进行研究指出,从高潮滩到中潮滩铁的分布存在明显的分带,随深度增加或者从高潮滩到中潮滩,土壤氧化铁含量具有显著降低的变化趋势。在此条件下,表层土壤与底层土壤相比,其光谱反射率较低;而土壤 TP 含量则随深度增加而降低,从而使得土壤 TP 含量与反射光谱之前呈负相关关系。本研究虽然没有直接测定土壤氧化还原条件,但 Fe-P 的含量可以一定程度表征土壤的氧化还原环境。图 6 B 表明,Fe-P 含量较其它形态磷在可见光波段具有较高的相关系数,这也间接证明了氧化还原环境变化是估算河口湿地土壤 TP 含量的

重要机制。此外,土壤 TP 含量的高光谱遥感估算还与磷素的组成密切相关(图 6 B)。当 Fe-P、Org-P 和 O-P 比重较高时,湿地土壤 TP 含量的估算具有较高的精度;当 Ca-P 和 Al-P 比重较大时,则估算精度将会有所降低。

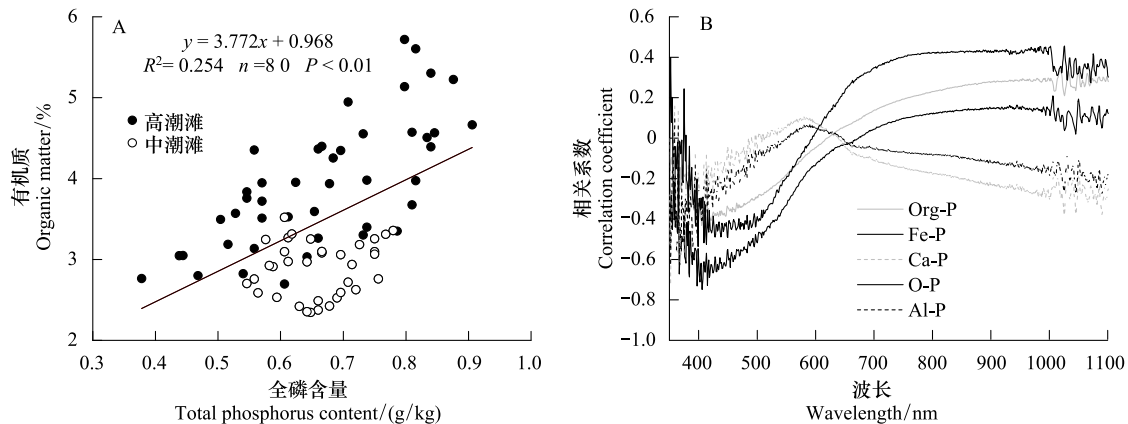


图 6 土壤 TP 含量与有机质相关关系 (A) 及不同形态磷与土壤反射光谱相关关系 (B) ($n=80$)

Fig. 6 Correlation between soil TP content and organic matter content (A), phosphorus fractions content and soil spectral reflectance (B) ($n=80$)

3.2 湿地土壤 TP 含量高光谱遥感估算敏感波段及估算精度

闽江河口湿地土壤 TP 含量与 R 在 350—600 nm 呈负相关,在 600—2500 nm 呈正相关,相关系数在 360—560 nm 较高(图 3A)。这一研究结果与张娟娟^[6]对中国中、东部地区 5 种不同类型土壤 TP 含量与反射光谱的相关关系(在 350—400 nm 正相关,其它波段负相关)不一致;同时这也与徐丽华等^[5]对紫色土进行研究的結果也不一致。产生这种差异可能是因为不同土壤类型 TP 含量估算的机理及影响因素不同。与陆地生态系统土壤相比,湿地土壤尤为特殊,其土壤随深度的变化,氧化还原环境随之发生明显变化,有机质含量也发生相应变化,这为 TP 的估算提供重要的机制。另一方面,闽江口位于亚热带区域,水热条件比较好,岩石受强烈风化,铁铝矿物相对富集,Fe-P 是土壤 TP 的重要组分;Fe-P 对氧化环境的变化较为敏感,从而为湿地土壤 TP 估算提供重要估算机理。与本研究相比,中国中、东部地区以及紫色土土壤,磷可能主要来源于土壤矿物的风化;同时这些土壤的氧化与还原环境变化不如湿地的明显。在此背景下,其土壤 TP 含量估算的敏感波段与精度与湿地土壤的有所不同。进一步将本研究中土壤 TP 含量的估算精度与其他生态系统土壤的比较,表明闽江口湿地土壤 TP 含量高光谱反演精度要优于已有报道中一些陆地生态系统土壤 TP 含量的估算精度^[6, 20]。这也预示着,基于高光谱手段对河口湿地土壤 TP 含量进行反演具有一定的可行性。

此外,本研究还发现基于 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 估算土壤 TP 含量时存在一些较为离散的样本,这些样本主要为高潮滩 20 cm 以下样本。这可能同这些样本有机质含量较同一深度其它土壤低有关。一般而言,土壤有机质含量较低,可见光反射率则较高,近红外波段反射率则较低^[6],从而造成近红外与可见光比值偏低,而 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 又与土壤 TP 含量呈负相关关系,最终导致估算值比实测值偏高。

4 结论

通过选取常用估算参数,确定其最佳估算波段,构建闽江口湿地土壤 TP 含量估算模型,并同已有相关研究进行比较,得到以下几点结论:

(1) 闽江河口湿地土壤 TP 含量与 R 存在较好的相关性,相关系数较高的区域在 360—560 nm;但这些敏感波段与已有报道中陆地生态系统土壤的敏感波段不尽一致。

(2) 光谱指数 R_{406} 、 $RSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $RSI(R_{460}, R_{810})$ 、 $RSI(R_{560}, R_{580})$ 、 $NDSI(R_{430}, R_{830})$ 、 $NDSI(R_{460}, R_{830})$ 、 $NDSI(R_{560}, R_{580})$ 和 $OII(R_{446})$ 均能较好的估算闽江口湿地土壤 TP 含量,且分潮滩建立模型可以提高部分光

谱指数的估算精度。

(3) 湿地土壤 TP 含量和有机质含量, TP 含量和氧化还原环境存在密切关系可能是估算湿地土壤 TP 含量的重要机理。

(4) 湿地土壤 TP 含量的高光谱遥感估算的精度与其自身磷素的组成密切相关。

参考文献 (References):

- [1] 全川, 贾瑞霞, 王维奇, 曾从盛. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化. 地理研究, 2010, 29(7): 1203-1213.
- [2] 徐明星, 周生路, 丁卫, 吴绍华, 吴巍. 苏北沿海滩涂地区土壤有机质含量的高光谱预测. 农业工程学报, 2011, 27(2): 219-223.
- [3] 贺军亮, 蒋建军, 周生路, 徐军, 蔡海良, 张春耀. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演. 中国农业科学, 2007, 40(3): 638-643.
- [4] 彭杰, 向红英, 周清, 王家强, 柳维扬, 迟春明, 庞新安. 不同类型土壤全氮含量的高光谱预测研究. 中国农学通报, 2013, 29(9): 105-111.
- [5] 徐丽华, 谢德体, 魏朝富, 李兵. 紫色土土壤全氮和全磷含量的高光谱遥感预测. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 723-727.
- [6] 张娟娟. 土壤养分信息的光谱估测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [7] 袁石林, 马天云, 宋韬, 何勇, 鲍一丹. 土壤中总氮与总磷含量的近红外光谱实时检测方法. 农业机械学报, 2009, 40(Z1): 150-153.
- [8] Bogrekeci I, Lee W S. Comparison of ultraviolet, visible, and near infrared sensing for soil phosphorus. Biosystems Engineering, 2007, 96(2): 293-299.
- [9] Bogrekeci I, Lee W S, Herrera J. Assessment of P-concentrations in the Lake Okeechobee drainage basins with spectroscopic reflectance of VIS and NIR. 2003 ASAE Annual Meeting, 2003.
- [10] 高会, 陈红艳, 刘慧涛, 谭莉梅, 刘金铜. 基于高光谱的鲁西北平原土壤有效磷含量快速检测研究. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 752-757.
- [11] 王昶, 黄驰超, 余光辉, 冉炜, 沈其荣. 近红外光谱结合偏最小二乘法快速评估土壤质量. 土壤学报, 2013, 50(5): 881-890.
- [12] Tong C, Wang W Q, Zeng C S, Marrs R. Methane (CH_4) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast Chin. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2010, 45(4): 506-516.
- [13] 刘剑秋. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] Zhang W L, Zeng C S, Tong C, Zhang Z C, Huang J F. Analysis of the expanding process of the spartina alterniflora salt marsh in Shanyutan wetland, Minjiang River Estuary by remote sensing. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 2472-2477.
- [15] Parkinson J A, Allen S E. A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1975, 6(1): 1-11.
- [16] Walker T W, Adams A F R. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur, and organic phosphorus in grassland soils. Soil Science, 1958, 85(6): 307-318.
- [17] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science, 1957, 84(2): 133-144.
- [18] 徐金鸿, 徐瑞松, 夏斌, 朱照宇. 土壤遥感监测研究进展. 水土保持研究, 2006, 13(2): 17-20.
- [19] Luo M, Zeng C S, Tong C, Huang J F, Yu Q, Guo Y B, Wang S H. Abundance and speciation of iron across a subtropical tidal marsh of the Min River Estuary in the East China Sea. Applied Geochemistry, 2014, 45: 1-13.
- [20] 陈鹏飞, 刘良云, 王纪华, 沈涛, 陆安祥, 赵春江. 近红外光谱技术实时测定土壤中总氮及磷含量的初步研究. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(2): 295-298.