

张佳佳,郭 熙,赵小敏. 南方丘陵稻田土壤全磷、有效磷高光谱特征与反演模型[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):522-525.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.148

南方丘陵稻田土壤全磷、有效磷高光谱特征与反演模型

张佳佳^{1,2}, 郭 熙^{1,2}, 赵小敏²

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院,江西南昌 330045;

2. 江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,江西南昌 330045)

摘要:以土壤高光谱反射率为研究对象,对江西省赣州市兴国县不同全磷、有效磷含量稻田土壤的光谱曲线特征进行研究。对比分析了同一种光谱反射率变换形式下土壤全磷、有效磷与高光谱反射率的相关性,提取了全磷和有效磷的高光谱敏感波段,建立了基于反射光谱特征的南方丘陵稻田土壤全磷、有效磷高光谱反演模型。结果表明,在 350~1 100 nm 这一波段,土壤全磷、有效磷含量与光谱反射率相关性呈同增同减,在 1 101~1 700 nm 这一波段,土壤有效磷含量与光谱反射率相关性要大于土壤全磷。通过分析兴国县稻田土壤全磷、有效磷含量与光谱反射率 18 种数学变换的相关系数,提取全磷的敏感波段为 534、1 090 nm,有效磷的敏感波段为 365、1 631、2 223 nm。通过 SPSS 软件进行不同线性拟合,发现多项式回归模型能较好地预测全磷、有效磷含量,预测相对分析误差(RPD)分别为 1.43、1.54,能够为稻田土壤全磷、有效磷含量预估提供参考。

关键词:土壤全磷;有效磷;高光谱特征;反演模型

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0522-04

土壤作为农业生产经营活动的重要载体,为人类的生存与发展提供了丰富的物质生产资料。拥有能够生长植物的肥力是土壤区别于其他土地的关键因素之一,土壤肥力与各类养分含量的多寡是自然和人类活动长期形成的。氮磷钾被视为农作物生长所必需的 3 种养分元素,土壤全磷与有效磷是土壤养分中不可或缺的一类,有效磷能够有效促进光合作用,参与作物营养元素的运输和同化产物的形成,施用磷肥能够使作物根系发达、籽粒饱满^[1]。土壤中磷含量的适宜量是影响作物生长和产量的重要指标,也是指导农业精准施肥的重要参考,在农业生产中占有重要位置。农田耕作土壤中的磷元素大部分以难溶性化合物的形式存在,能直接被作物利用的有效磷比例很低,在有些地区磷已成为限制作物高产的重要因素^[2],因此量化了解土壤中磷的含量很有必要。传统的实验室化学分析方法程序复杂、耗资大、持续时间长、费时费力,难以满足现代精准农业对土壤养分实时监测的要求。

高光谱遥感技术拥有快捷、精准、无损化等特征,而土壤本身具有的物理、化学等理化特性能够反映高光谱曲线特征,这就为利用土壤高光谱遥感技术测算土壤养分含量提供了可能^[3]。20 世纪 20 年代以来,国内外相关学者一直致力于土壤高光谱特征研究,经过多年发展,可见光、近红外、中红外高光谱技术在土壤学领域已得到了较为广泛的利用和实践。研究证明,350~2 500 nm 波段范围内的高光谱反射数据能较为准确地反映土壤理化参数,可通过建立相应模型来反演土壤

理化参数^[4-7]。Bogrekci 等利用可见光-近红外光谱对不同类型土壤风干样本和鲜样的磷含量进行了预测,应用偏最小二乘法来预测其均方根偏差分别为 9.4%、12.9%。Bogrekci 等比较了采用紫外区、可见光区、近红外区域对不同类型土壤(basinger fine sand,immokalee fine sand,myakka fine sand)全磷及水溶性磷含量的预测能力,结果表明,采用近红外区域对磷的预测能力最好^[8]。Mouazen 等通过偏最小二乘法建立了土壤有效磷含量的预测模型,发现利用可见光-近红外波段预测速效磷是可能的^[9]。磷作为土壤中的一种主要营养元素,由于在可见光-近红外区域没有明显的吸收,对光谱影响微弱,以往虽对磷已有较多研究,但取得的结果并不理想^[10];因此,磷含量与土壤高光谱之间的关联性尚待深入研究。本研究以江西省赣州市兴国县稻田土壤高光谱反射率为对象,利用 SVC HR-768 地物波谱仪测定 43 个采样点的高光谱反射率,运用 SPSS、Origin 等统计学软件分析样点全磷、有效磷养分含量与高光谱反射率敏感波段相关性,采用多项式回归模型来预测全磷和有效磷含量,以期为高光谱遥感技术在精准农业土壤养分参数快速获取方面提供新的案例支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域与土样采集

1.1.1 区域概况 研究区域为兴国县,包括永丰乡、隆平乡、鼎龙乡、长岗乡、社富乡、高兴镇等 6 个乡镇。兴国县地处江西省赣南丘陵区的北端,县境东经 115°01'~115°51'、北纬 26°03'~26°41',属中亚热带季风湿润气候。全年气候温和,光照充足,雨量丰沛,无霜期长,四季分明,气候特点可概括为:春早夏长秋短冬迟。地貌主要以低山丘陵居多,部分地区有低山、中山。县境母岩主要有第四纪红色黏土、砂页岩、粉砂岩、大理岩、千枚岩等。县域范围内的土壤类型以红壤、黄壤、水稻土、紫色土为主。兴国县为典型的南方丘陵稻田土

收稿日期:2015-05-19

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAD04B11);江西省博士后择优资助项目(编号:JX2013018)。

作者简介:张佳佳(1989—),男,甘肃成县人,硕士研究生,研究方向为土地评价、土地利用规划。E-mail:517153335@qq.com。

通信作者:赵小敏,教授,博士生导师,主要从事土地利用与规划、遥感与地理信息系统等研究。E-mail:zhaoxm889@126.com。

区,常年水稻种植面积在 $4.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以上,总产在 $26.5 \times 10^4 \text{ t}$ 左右,年人均占有量为 340 kg 左右。

1.1.2 土壤样本的野外采集 根据土地利用现状图和土壤类型图叠加后的综合信息,确定采集水稻土层土壤样本 43 个,采样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 。样本采集过程中时刻注意尽量使每个样本的采集深度、采集质量趋同;样本的上层土壤与下层土壤比例相近。将采集好的土壤样本装袋编号,带回实验室风干、磨碎及过 2 mm 筛处理后分成 2 份,其中一份用于土壤全磷、有效磷含量的测定,另一份用于高光谱反射率的测定。

1.2 方法

1.2.1 光谱数据具体处理方法 为了方便寻找土壤全磷的高光谱敏感波段,对土壤样本的原始反射光谱曲线进行消除包络线、重采样方法、连续统去除方法、光谱微分技术及光谱数据变换方法等预处理方法,可以提高其相关性^[11-12]。

1.2.1.1 重采样处理方法 利用 SVCN-768 地物波谱仪自带的光谱数据处理软件 SVC-HR768 对原始光谱数据进行重采样处理,重采样的间隔为 1 nm ,导出重采样数据。由于 SVCN-768 地物波谱仪测定土壤样点的反射光谱数据在 $1\,000 \sim 1\,900 \text{ nm}$ 附近的连接处以及前后边缘波段 $350 \sim 399 \text{ nm}$ 、 $2\,451 \sim 2\,500 \text{ nm}$ 处噪声比较大,导致经过重采样处理所得的原始光谱曲线在相邻波段间存在信息冗余。因而,本研究将光谱数据以每 10 nm 为一个单位对其进行算术平均运算,经过运算处理后,其光谱曲线在保证了更加平滑的基础上依旧保存着原光谱曲线的主要特征,对导出的每个土样的光谱曲线去除前后噪声较大的边缘波段 $350 \sim 380 \text{ nm}$ 和 $2\,451 \sim 2\,500 \text{ nm}$ 波段。

1.2.1.2 连续统去除法 连续统处理的方法也叫去除包络线法,是一种典型的光谱分析法,其概念为:逐点直线连接随着波长变化的吸收或反射凸出的“峰”值点,使得折线在“峰”值点上的外角大于 180° 。它能显著地突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将其归一化到一致的光谱背景上,有助于与其

他光谱曲线进行比较,从而提取出敏感波段进行分类识别比较,去除包络线后的光谱曲线变为光谱波段深度曲线。光谱波段深度曲线计算公式为:

$$R'(\lambda) = 1 - R(\lambda) / R_c(\lambda) \tag{1}$$

式中: R' 、 R 、 R_c 分别为光谱波段深度、原始光谱、光谱包络线, λ 为波长。

1.2.1.3 光谱一阶微分方法 对光谱进行低阶微分处理,对不同的背景和噪声有去除作用。微分光谱可剔除基线漂移或平缓背景干扰,同时可提供比原始光谱更高的分辨率和更清晰的光谱轮廓变换,其基本处理方法为:先确定导数窗口宽度 $\Delta\lambda$,然后再根据导数的定义计算波长 y 的导数,再逐步移动依次计算所有波长的导数,由此得出导数光谱。土壤高光谱在波长 i 处的一阶微分光谱采用下式计算:

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_i + 1) - \rho(\lambda_i - 1)] / (2\Delta\lambda); \tag{2}$$

式中: λ 为波长, $\lambda_i = 351, 352, \dots, 2\,499 \text{ nm}$; $\rho(\lambda_i)$ 为波长 i 的光谱反射系数,实际计算中,一般用光谱的差分作为微分的有限近似。通过对原始反射率光谱进行低阶微分变换可以发现,光谱曲线随波长的变化更加明显。

1.2.2 模型建立与验证 采用模型方程的决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、相对分析误差 RPD 来衡量土壤全磷、有效磷反演模型的预测精度。决定系数 R^2 数值越大,均方根误差 RMSE 越小,则表明所建模型的精度越高。当 $RPD > 2$ 时,表明模型具有很好的预测能力;当 $1.4 < RPD < 2$ 时,表明模型可对样品作粗略估测;当 $RPD < 1.4$,则表明模型无法对样品进行预测^[13]。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷、有效磷含量的测定

在实验室分别测定样点土壤的全磷与有效磷含量,表 1 为样点土壤全磷与有效磷含量的描述性统计。

表 1 土壤全磷、有效磷含量描述性统计分析

全磷/有效磷含量	样本数(个)	极小值	极大值	均值	标准差	方差	偏度	峰度
全磷(g/kg)	43	0.07	0.79	0.51	0.17	0.03	-0.312	-0.474
有效磷(mg/kg)	43	4.80	70.10	29.04	20.49	419.79	0.660	-0.790

偏度一般用于衡量样本分布的对称程度,用 α 来表示。当偏度 $\alpha = 0$ 时为正态分布;当偏度 $\alpha > 0$ 时为正偏斜;当偏度 $\alpha < 0$ 时为负偏斜。由表 1 可知,所选样点土壤的全磷偏度 $\alpha = -0.312$,表示数据与正态分布负偏斜;有效磷的偏度 $\alpha = 0.66$,表示数据与正态分布正偏斜。峰度一般用于衡量样本分布的集中程度,用 β 来表示。当 $\beta > 0$ 时,代表分布比正态分布更集中在平均数周围,分布呈现尖峰状态;当 $\beta = 0$ 时,分布为正态分布;当 $\beta < 0$ 时,表示分布比正态分布更分散,分布呈现低峰态。所选样点土壤全磷的峰度 $\beta = -0.474$,有效磷的峰度 $\beta = -0.79$,表示数据相对于正态分布更平坦。

2.2 土壤全磷、有效磷光谱特征分析

为了解样点土壤全磷与有效磷含量在同一高光谱波段的相关性,本研究选取样点土壤全磷含量、有效磷含量与样点土壤光谱反射率重采样去包络线处理后进行相关性分析,对比研究土样全磷、有效磷含量与土样光谱反射率的相关系数随

着波长变化的关系,结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,原始光谱曲线经重采样去包络线处理后在 $345 \sim 546 \text{ nm}$ 、 $812 \sim 1\,348 \text{ nm}$ 、 $1\,369 \sim 1\,717 \text{ nm}$ 、 $1\,732 \sim 1\,799 \text{ nm}$ 、 $1\,811 \sim 1\,903 \text{ nm}$ 、 $1\,909 \sim 1\,917 \text{ nm}$ 、 $1\,925 \sim$

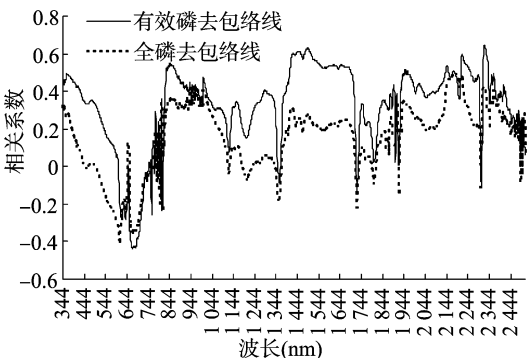


图 1 光谱反射率去包络线与全磷、有效磷含量相关系数曲线

2 348 nm 处全磷含量的光谱反射率相关系数低于有效磷含量的光谱反射率相关系数;从 546 ~ 623 nm、1 349 ~ 1 368 nm、1 718 ~ 1 731 nm、1 718 ~ 1 731 nm、1 800 ~ 1 810 nm、1 918 ~ 1 924 nm 处全磷含量的光谱反射率相关系数高于有效磷的相关系数;624 ~ 812 nm、2 349 ~ 2 513 nm 处两者含量光谱反射率曲线走向基本一致。

2.3 土壤全磷、有效磷含量高光谱反射率敏感波段的选择

为更好地研究土壤全磷、有效磷含量与其高光谱反射率曲线的相关性,对土壤采样点的光谱反射率进行了 18 种数学变换,从中寻找对全磷、有效磷含量较为敏感的光谱波段。反射率经过变换运算后对其进行统计分析,一方面可以减弱噪声对目标光谱的干扰;另一方面可以变非线性关系为线性关系^[14-15]。由于原始数据反射率(自变量)与全磷、有效磷含量(因变量)两者之间并非线性关系,经过变换运算后再和全磷、有效磷含量进行线性回归,其实质为非线性关系线性化处理。土壤全磷、有效磷与波长反射率通过多种变换计算其相关系数,以此来筛选出相关系数在一定波段内比较平稳且相关系数高的波段,利用此波段来做繁衍模型。表 2、表 3 为变换方法及其得出的相关系数最值 and 对应波段。

表 2 各变换方法与全磷含量相关系数的最值及对应波段

数学变换	绝对值最大	
	波段(nm)	相关系数
原始数据	2 314	-0.601
重采样	1 343	-0.478
重采样去包络线	609	-0.412
重采样一阶微分	534	-0.702
重采样倒数	1 343	0.463
重采样对数	1 343	-0.473
重采样反射率平方根	1 343	-0.476
重采样反射率立方根	1 343	-0.475
倒数的一阶微分	1 090	0.632
对数的一阶微分	1 090	-0.659
平方根的一阶微分	1 090	-0.663
立方根的一阶微分	1 090	-0.663
平方根的倒数	1 343	0.469
倒数的对数	1 343	0.473
对数的倒数	1 343	0.468
对数的倒数一阶微分	1 090	0.648
倒数的对数一阶微分	1 090	0.660
平方根的倒数一阶微分	1 090	0.650

表 3 各变换方法与有效磷含量相关系数的最值及对应波段

数学变换	绝对值最大	
	波段(nm)	相关系数
原始数据	2 309	-0.419
重采样	2 309	-0.419
重采样去包络线	2 323	0.647
重采样一阶微分	365	0.677
重采样倒数	2 309	0.388
重采样对数	2 309	-0.404
重采样反射率平方根	2 309	-0.412
重采样反射率立方根	2 309	-0.409
倒数的一阶微分	1 631	0.584
对数的一阶微分	350	0.640
平方根的一阶微分	350	0.661
立方根的一阶微分	350	0.656
平方根的倒数	2 309	0.396
倒数的对数	2 309	0.404
对数的倒数	2 309	0.396
对数的倒数一阶微分	2 314	-0.596
倒数的对数一阶微分	350	-0.640
平方根的倒数一阶微分	350	-0.603

通过以上 18 种变换可以看出,选取各种变换中相关系数较高且稳定的波段为敏感波段,因此全磷的敏感波段为 534 nm 处基于重采样一阶微分运算和 1 090 nm 处基于重采样倒数、对数、平方根、立方根的一阶微分计算;有效磷的敏感波段为 365 nm 处基于重采样一阶微分运算、1 631 nm 处基于重采样倒数的一阶微分运算和 2 223 nm 处基于重采样去包络线运算。

2.4 反演模型的建立

对经过预处理后得到的光谱反射率与土壤全磷、有效磷含量的相关性进行分析,得到南方典型水稻土土壤全磷的特征波段为 534、1 090 nm;土壤有效磷的特征波段为 365、1 631、2 223 nm。本研究选取光谱反射率重采样一阶微分变换中与土壤全磷含量相关系数最高的波段 534 nm(相关系数为 -0.702)和土壤有效磷含量相关系数最高的波段 365 nm(相关系数为 0.677)进行回归方程拟合,建立其预测模型(表 4、表 5、图 2、图 3)。

4 种模型中多项式回归方程模型对于预测全磷与有效磷含量比较准确。全磷多项式回归方程为 $y = 17.363x^2 - 9.1708x + 1.1834$,其相对分析误差 $RPD = 1.4307$,大于 1.4;

表 4 稻田土壤全磷预测模型参数

建模方法	建模波段(nm)	回归方程	决定系数(r^2)	均方根误差(RMSE)	相对分析误差(RPD)
对数回归	534	$y = -0.5276\ln x - 0.7776$	0.4870	0.1198	1.4188
多项式回归	534	$y = 17.363x^2 - 9.1708x + 1.1834$	0.4960	0.1188	1.4307
指数回归	534	$y = 1.6309e^{-13.846x}$	0.4090	0.4271	0.3981
一元线性回归	534	$y = -5.909x + 1.037$	0.4930	0.1191	1.4274

有效磷多项式回归方程为 $y = 34983x^2 - 2699.2x + 67.578$,其相对分析误差 $RPD = 1.541$,也大于 1.4,说明该模型可以较粗略地预测水稻土全磷、有效磷含量,但是模型还有待进一步改善。

3 结论与讨论

由于土壤全磷与有效磷在化学成分上存在差异,所以在同一种光谱处理方法下土壤全磷、有效磷含量与光谱反射率

表 5 稻田土壤有效磷预测模型参数

建模方法	建模波段 (nm)	回归方程	决定系数 (r^2)	均方根误差 ($RMSE$)	相对分析误差 (RPD)
对数回归	365	$y = -12.84\ln x - 22.733$	0.464	14.822 4	1.381 2
多项式回归	365	$y = 34\ 983x^2 - 2\ 699.2x + 67.578$	0.569	13.290 8	1.541 0
指数回归	365	$y = 53.441e^{-36.81x}$	0.399	14.594 2	1.403 3
一元线性回归	365	$y = -1\ 033x + 53.893$	0.458	14.900 3	1.374 5

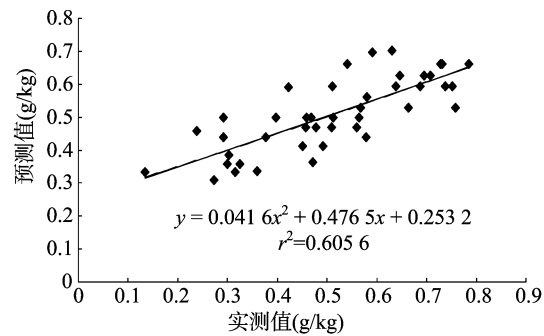


图2 稻田土壤全磷含量反演模型预测值与实测值的散点

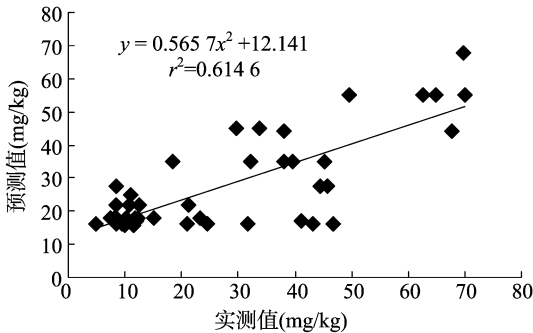


图3 稻田土壤有效磷含量反演模型预测值与实测值的散点

的相关性曲线走势也存在一定差异,总体来看,土壤有效磷含量与光谱反射率的相关性要高于土壤全磷。土壤全磷光谱反射率相关系数在波长 534 nm 处达到最大值,为 -0.702,在多个微分处理方法中在 1 090 nm 左右波段相关系数比较稳定,且都达到 0.65 以上;土壤有效磷光谱反射率相关系数在波长 365 nm 处达到最大值,为 0.677。研究发现,全磷和有效磷光谱反射率敏感波段为 534、365 nm,并基于多项回归建立了预测模型,模型的相对分析误差(RPD)分别为 1.430 7、1.541,能够粗略地预测南方丘陵水稻土全磷、有效磷含量,但是本研究的土壤样本取自南方丘陵区的江西省兴国县,土壤类型为水稻土,所建立的土壤全磷、有效磷估算模型对其他地区、其他类型土壤是否适用,有待进一步研究。此次研究土壤样本数量较少,土壤光谱反射特征受众多因素影响,比如铁、全氮、全钾、有机质等,本研究仅考虑了全磷与有效磷来建立模型进行预测有一定的局限性。因此,在以后的研究中,如何将多种

因素有机结合起来,建立更加精准的南方稻田土壤养分含量预测模型,是后续工作需要着重探究的。

参考文献:

[1]陈婷婷,王 娇. 土壤磷素对作物产量的影响[J]. 农技服务, 2012,29(11):1247.

[2]孙宏飞. 厌氧培养的水稻土中磷酸铁及磷的化学行为[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.

[3]陈红艳. 土壤主要养分含量的高光谱估测研究[D]. 泰安:山东农业大学,2012.

[4]邓 晶,杜昌文,周健民,等. 红外光谱在土壤学中的应用[J]. 土壤,2008,40(6):872-877.

[5]彭 杰,张杨珠,周 清,等. 土壤理化特性与土壤光谱特征关系的研究进展[J]. 土壤通报,2009,40(5):1204-1208.

[6]刘焕军,张 柏,杨 立,等. 土壤光学遥感研究进展[J]. 土壤通报,2007,38(6):1196-1202.

[7]Sullivan D G, Shaw J N, Rickman D, et al. Using remote sensing data to evaluate surface soil properties in Alabama ultisols [J]. Soil Science, 2005, 170(12): 954-968.

[8]Bogrekcı I, Lee W S. Comparison of ultraviolet, visible, and near infrared sensing for soil phosphorus[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96: 293-299.

[9]Mouazen A M, Maleki M R, Baerdemaeker J D, et al. On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93: 13-27.

[10]陈鹏飞,刘良云,王纪华,等. 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[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(2): 295-298.

[11]苏红军,杜培军,盛业华. 高光谱遥感数据光谱特征提取算法与分类研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(2): 390-394.

[12]郭 熙,叶英聪,谢碧裕,等. 南方丘陵稻田土碱解氮高光谱特征及反演模型研究[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 94-99.

[13]Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. Soil Science, 2002, 167(2): 110-116.

[14]郑光辉. 江苏部分地区土壤属性高光谱定量估算研究[D]. 南京:南京大学,2010.

[15]高 会,陈红艳,刘慧涛,等. 基于高光谱的鲁西北平原土壤有效磷含量快速检测研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 752-757.