

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

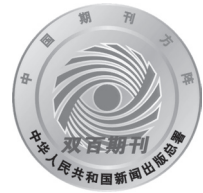
第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑…………… 赵彦锋 程道全 陈 杰等 (1197)
 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展…………… 卢明珠 吕宪国 管 强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素… 杨 帆 黄来明 李德成等 (1226)
 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性…………… 任圆圆 张学雷 (1237)
 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征…………… 于 洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演…………… 李 萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
 干湿交替对黄土崩解速度的影响…………… 王 健 马 璠 张鹏辉等 (1273)
 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟…………… 吴奇凡 樊 军 杨晓莉等 (1280)
 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征…………… 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响 …………… 李忠意 徐仁扣 (1301)
 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析 …………… 于 飞 施卫明 (1311)
 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化 …………… 刘建玲 贾 可 廖文华等 (1325)
 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性…………… 杨 文 周脚根 王美慧等 (1336)
 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征…………… 李红林 贡 璐 朱美玲等 (1345)
 东北平原土壤硒分布特征及影响因素…………… 戴慧敏 宫传东 董 北等 (1356)
 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究…………… 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应…………… 马静静 钱新春 张 伟等 (1374)
 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究…………… 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应…………… 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应…………… 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究…………… 李杰彪 苏 锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究 …………… 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估…………… 单 燕 李水利 李 茹等 (1430)
 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用…………… 赵 纯 袁国富 刘 晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强” …………… (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201408270429

黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演*

李 萍 赵庚星[†] 高明秀 常春艳 王卓然 张同瑞 安德玉 贾吉超

(山东农业大学资源与环境学院 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018)

摘 要 为探讨利用近地高光谱和遥感影像数据结合预测土壤含水量的可行方法, 以黄河三角洲垦利县为研究区, 采用中心波长反射率和波段平均反射率两种拟合方法, 利用室外实测高光谱窄波段反射率数据模拟LandSat8卫星宽波段反射率, 进而通过组合, 选取敏感光谱参量, 应用多元逐步线性回归方法分别建立土壤含水量高光谱单一形式波段组合与多形式波段组合估测模型, 并选取最优估测模型。采用线性混合像元分解处理遥感影像, 同时采用比值均值订正方法对遥感影像反射率进行订正, 在此基础上, 将模型应用到经过订正的LandSat8卫星影像, 实现了对研究区土壤含水量的遥感反演。结果表明, 最佳模型是基于波段平均反射率拟合方法建立的多形式波段组合估测模型。从反演结果看较为符合研究区土壤含水量的实际状况。

关键词 黄河三角洲; 土壤含水量; 高光谱; 遥感

中图分类号 S127 **文献标识码** A

土壤含水量是陆地和大气能量交换过程中的重要因子, 对陆地表面蒸散、水的运移、碳循环具有很强的控制作用, 是气候、生态、水文、农业等领域衡量土壤干旱水平的重要指标^[1-2]。土壤水分也是研究植物水分胁迫、监测作物旱情的最基本因子。为了提高土壤水分利用率, 减少无效蒸发, 节约农业用水, 因此需要对土壤水分进行监测。黄河三角洲是我国高效生态经济区, 对该区域进行准确、实时地遥感土壤水分监测, 对于区域农业生产及社会经济建设具有重要意义^[3]。

传统的土壤水分测定方法, 如取土烘干法、中子水分仪法、张力计法等均是点测量为基础, 虽然精度高, 但范围有限, 工作量大, 已经难以满足区域性土壤含水量监测的实际需要。土壤水分模型方法通过建立水分平衡方程求解土壤水分, 可提供适时的土壤水分信息, 但实验需要大量相关参数, 估测误差较大^[4]。用遥感反演手段获取土壤含水量, 具有范围大、时间分辨率高的特点, 弥补了传统方法上的不足。高光谱遥感技术凭借其极高的光

谱分辨率, 快速获取地面土壤的反射光谱信息, 为土壤水分监测提供了一种新的技术手段。因此, 地面实测高光谱与多光谱遥感影像相结合, 为土壤水分状况的定量反演和遥感监测提供了新的思路。

目前国内外学者在高光谱与土壤含水量的关系, 光谱数据处理方面已经开展了大量的研究。20世纪60年代, Bowers等^[5]研究发现土壤光谱反射率在整个波长范围内随土壤水分的增加而降低, 土壤水分的吸收波段与吸收强度之间具有较好的线性相关; Stoner^[6]进一步证实, 随着土壤水分的增加, 土壤反射系数降低。光谱处理较多使用的方法有倒数、对数、一阶微分、包络线、反包络线、波段组合、小波分析、主成分分析等, 建立的估测模型有线性回归模型、BP神经网络估测模型、模糊识别模型等^[7-12]。但总体而言, 多数研究是单纯基于近地面高光谱研究土壤含水量估测模型, 难以实现土壤含水量的区域反演, 而利用高光谱窄波段结合宽波段多光谱卫星影像, 对区域尺度土壤含水量监测的研究尚不多见。

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD05B06)、国家自然科学基金项目(41271235)和山东省自主创新专项(2012CX90202)资助

[†] 通讯作者, E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

作者简介: 李 萍(1990—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事土地资源与遥感研究。E-mail: lpsd0502@163.com

收稿日期: 2014-08-27; 收到修改稿日期: 2015-03-19

本研究以黄河三角洲为研究区, 从室外高光谱以及土壤含水量实测数据入手, 采用波谱组合和多元逐步线性回归分析方法, 建立基于高光谱的土壤含水量估测模型, 并将其应用到LandSat8遥感影像, 反演区域土壤含水量状况, 为土壤含水量的遥感定量反演提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄河三角洲北临渤海湾, 东靠莱州湾, 具有独特的地理位置和气候特征^[13]。气候变化、黄河水沙变化、陆海相互作用以及人类活动构成区域自然环境演变的主要驱动因素, 区域环境生态表现出极强的动态性、脆弱性和典型性, 是国内外多学科、交叉学科研究的一个热点区域^[14]。

本研究选择黄河三角洲典型区垦利县, 该县地处黄河最末端, 是现代黄河三角洲的重要组成部分, 黄河自该县西南向东北贯穿入海^[15]。地处温带季风气候区, 冬季干冷, 夏季湿热, 四季分明。

降水量分布极不均匀, 具有春旱、秋涝、晚稻收割又旱的特点^[16]。黄河为该县主要淡水来源, 也是地下水的主要补给源。但地下水埋深浅, 矿化度高, 难以利用。垦利县位于黄河三角洲的扇形区边缘, 具有典型的三角洲地貌特征, 整个地势西南高, 东北低, 形成了岗、坡、洼相间的地貌类型及砂、壤、黏相间的多种土体构型。土壤为潮土和盐土两大类型, 质地轻, 养分贫乏, 盐化程度较高。自然植被多为耐盐碱的草本植物和灌木, 农田作物以小麦、玉米、水稻和棉花为主。

1.2 实地调查与采样

本研究于2014年4月28日至4月30日, 在垦利县进行实地调查与采样。在全县均匀布设61个样点(不含滩涂区域), 见图1。选取约900 m²的平整地块, 其土壤类型、地表覆盖状况接近, 每个地块采集3个表层(0~20 cm)土样。土样装入密封袋进行编号, 同时记录采样点的土地利用类型、植被类型、植被覆盖度、土壤类型等情况, 并记录采样点坐标。

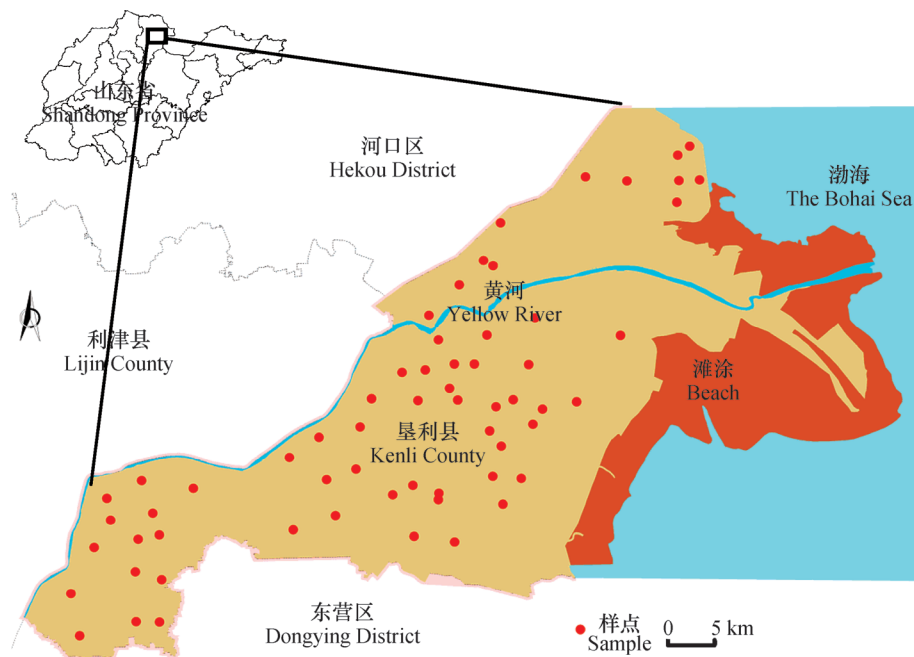


图1 野外实测样点分布图

Fig.1 Distribution map of field sampling sites

1.3 高光谱数据采集与处理

土壤高光谱测定采用美国 ASD Fieldspec4 光谱仪, 光谱范围为350~2 500 nm, 扫描时间100 ms, 光谱平均高达31 800次, 波长精度0.5

nm, 波长重复性0.1 nm, 光谱分辨率3nm@700 nm、8nm@1400/2100 nm。

将野外采回的土样保持原状, 在室外自然光照条件下对纯土壤进行光谱测定, 测量期间选择晴朗

无风的天气, 尽量避免环境变化过大, 测量时段范围为 10:00 ~ 14:00。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, 每次采集目标光谱前后均进行参考板校正, 在视场范围内重复测量 10 次, 取平均土壤光谱反射率。为消除高频噪声的影响, 本研究采用 9 点加权移动平均法对高光谱反射率数据进行平滑去噪处理^[17]。

1.4 土壤含水量测定

土壤含水量采用质量含水量表示, 待光谱测定完毕之后以烘干法进行测定。过程如下: 取铝盒在 105℃烘箱中放置 2 h 后, 称重 W , 按需取约 10 g 表层土样放入铝盒中, 加盖后称重 (铝盒加土壤重量), 记为 W_1 , 去盖放入烘箱中, 在 105℃条件下烘 8 h, 至恒重, 取出加盖后称重 (铝盒加干土的重量), 记为 W_2 。计算公式为:

$$\text{土壤质量含水量}(\%) = (W_1 - W_2) / (W_2 - W) \times 100\%$$

取三次重复, 求其平均值即为该土壤质量含水量。

1.5 遥感数据获取及预处理

研究使用 LandSat8 遥感影像, 轨道号为

121/034, 获取时间为 2014 年 5 月 1 日, 与采样时间十分相近。选取 OIL 传感器的前 7 个波段影像, 采用 ENVI 下的 FLAASH 模块对 LandSat8 影像进行大气辐射校正^[18]。以经过几何精校正的 2011 年的垦利县遥感影像为参考, 利用二次多项式纠正模型和最邻近像元重采样方法进行影像几何精校正, 误差控制在一个像元以内。由于采样时未涉及到沿海滩涂, 为了保证最后遥感反演结果的准确性, 以垦利县 2012 年不包括滩涂的行政区划作为边界, 对遥感影像进行裁剪, 得到研究区去除滩涂后的遥感影像。

1.6 光谱数据拟合与波段组合

ASD 光谱仪测得的光谱数据波段为 350 ~ 2 500 nm, 有 2000 多个波段, 而 LandSat8 只有 7 个波段, 为便于反演模型的应用, 本研究采用两种方法将实测的高光谱窄波段反射率拟合为 LandSat8 宽波段反射率。

一是选用 LandSat8 影像波段中心波长反射率, 采用高光谱相对应的波长反射率进行拟合^[19]; 二是选用 LandSat8 各波段范围对应的高光谱的平均反射率进行拟合^[20]。具体见表 1。

波段组合是地物参数遥感反演常用的方法,

表 1 波段拟合方法

Table 1 Band fitting method

波段名称 Band name	波段 Band (nm)	中心波长反射率 Center wavelength reflectance	波段平均反射率 Band average reflectance
Band 1 Coastal	433 ~ 453	R_{440}	$R_{433-453}$
Band 2 Blue	450 ~ 515	R_{480}	$R_{450-515}$
Band 3 Green	525 ~ 600	R_{560}	$R_{525-600}$
Band 4 Red	630 ~ 680	R_{655}	$R_{630-680}$
Band 5 NIR	845 ~ 885	R_{865}	$R_{845-885}$
Band 6 SWIR 1	1 560 ~ 1 660	$R_{1\ 610}$	$R_{1\ 560-1\ 660}$
Band 7 SWIR 2	2 100 ~ 2 300	$R_{2\ 200}$	$R_{2\ 100-2\ 300}$

通过波段组合形成包含多波段信息的新的光谱参量。有研究表明, 特定的波段组合可以消除背景噪声的影响, 提高模型反演地物参数的精度。比值、差值、上加下减和上减下加波段组合方式因运算简单而使用广泛, 本研究就是采用这 4 种波段组合方式, 分别对两两波段反射率进行 4 种运算, 生成光谱参量反演地表土壤含水量。

1.7 估测模型的构建

本研究共采集 108 个土壤含水量数据, 其中有效数据 99 个, 随机选取建模样本集 69 个, 验证样本集 30 个。

分别对中心波长反射率和波段平均反射率按上述 4 种方式进行波段组合, 将组合生成的光谱参量与土壤含水量进行相关性分析, 筛选相关性较大

的光谱参量作为敏感光谱参量，数量控制在8个以内，相关性均在0.4以上，参与模型构建。

分别将4种波段组合筛选的光谱参量进行多元逐步线性回归分析，建立单一形式波段组合估测模型；然后选取4种组合的所有敏感光谱参量，建立多形式波段组合估测模型。

所建模型首先对自变量进行 F 显著性检验，选入自变量的 sig 值均 < 0.05 ，则认为选取的自变量对因变量有显著影响；同时为避免自变量之间存在多重共线性，采用膨胀系数VIF进行判别，VIF均控制在10以下；最后对模型进行 F 检验， $\text{sig} = 0.000 < 0.05$ ，可以认为所建回归方程有效，利用模型决定系数 R^2 ，优选出最佳估测模型。

以验证样本集，对估测模型进行检验，并绘制估测值与实测值之间拟合图。采用拟合系数 R^2 、均方根误差RMSE、相对误差RE对拟合效果进行综合评定，以检验模型的准确性与适用性。

1.8 遥感反演与分析

利用野外记录的采样点GPS坐标得到采样点在遥感影像上的位置，进而在遥感影像上获取各个采样点的遥感地表真实反射率。对于卫星遥感影像而言，往往植被与土壤同时存在于像元中，土壤含水量的反演不可避免地会受到植被光谱信息的影响，而土壤含水量高光谱估测模型是基于纯土壤建立的估测模型，因此剔除遥感影像上植被光谱信息对土壤水分的干扰，是实现土壤含水量准确反演的有效途径。

本研究采用线性混合象元分解的方法从原始影像混合光谱中将植被光谱剔除，进而获取土壤反射率光谱信息，采用的像元二分模型为^[21]：

$$R_b = f_s R_{sb} + f_v R_{vb} \quad (1)$$

式中， R_b 表示像元光谱信息； R_{sb} 、 R_{vb} 分别为土壤和植被在波段 b 贡献的光谱信息； f_s 、 f_v 分别为土壤和植被在像元中的比例。由此，剔除植被光谱后的土壤光谱信息为：

$$R_{sb} = (R_b - f_v R_{vb}) / f_s \quad (2)$$

$$\text{式中，} \quad f_s = 1 - f_v \quad (3)$$

$$f_v = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (4)$$

式中， $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 为遥感影像上最大和最小的NDVI值。

首先计算研究区遥感影像的NDVI，将NDVI小于0的水体（或云）去除，统计剩余影像的 $NDVI_{\max}$

和 $NDVI_{\min}$ ，利用式（4）计算其 f_v ，研究区 $NDVI_{\max}$ 为0.7983， $NDVI_{\min}$ 为0。挑选NDVI大于0.78的多个象元，统计光谱特征，取各个波段平均值作为研究区植被光谱特征信息，进而利用土壤光谱信息模型（2）得到每个像元的土壤光谱信息，得到只包含土壤信息的遥感影像。

通过对遥感影像进行线性混合像元分解处理，厘清植被信息，得到遥感影像土壤信息；进而将其与高光谱反射率比较，利用比值均值法对遥感影像反射率进行订正，将土壤含水量高光谱估测模型应用到经过订正的遥感反射率数据，建立土壤含水量的遥感反演模型；之后借助ENVI将遥感反演模型应用到LandSat8影像，得到研究区土壤含水量分布图，与实测点位水分数据插值得到实测样点含水量插值图比较，分析遥感反演模型精度。

2 结 果

2.1 不同含水量土壤的光谱特征

图2为不同含水量土壤的光谱特征曲线，其中波段1 350 nm ~ 1 450 nm和1 800 nm ~ 1 950 nm因受大气水汽吸收强烈而剔除^[21]。可以看出，

（1）随着含水量的增加，土壤反射率总体呈下降趋势，这一结论与以往文献中提到的一般变化规律相同。（2）不同土壤含水量光谱曲线总体变化比较平缓，形态上相似，基本平行。（3）不同含水量的土壤光谱反射率表现为强度上的差异，在波长较短的部分，反射率随土壤水分增加变化迅速，而在波长较长的部分，反射率变化相对平缓。（4）结合LandSat8OIL的7个波段分析：433 ~ 453 nm曲线斜率较陡，且随含水量的升高，曲线斜率在变小，且在450附近有微小的凸起；450 ~ 515 nm间，曲线斜率先减小，后增大；525 ~ 600 nm间斜率一直上升，在600 nm附近，曲线斜率开始下降；630 ~ 680 nm间曲线呈缓慢上升趋势；845 ~ 885 nm曲线斜率接近于0，到达1 700 nm左右反射率缓慢下降，且不同含水量反射率差异较明显；1 560 ~ 1 660 nm曲线缓慢上升，不同含水量的反射率差距也较大；2 100 ~ 2 200 nm之间光谱反射率先上升后下降，在2 150 nm附近有明显的反射峰，并且具有2 200 nm处的特征吸收带。可见，土壤含水量与LandSat8OIL的7个波段之间均有一定的相关性。

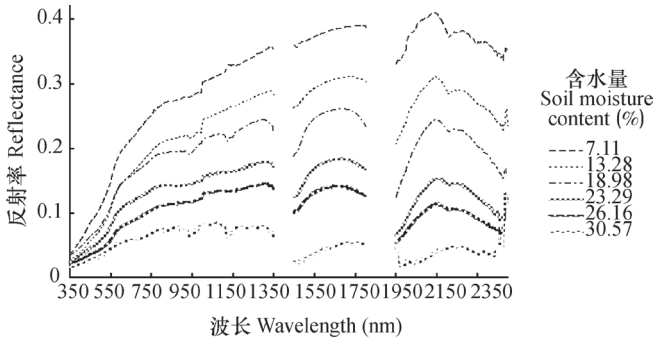


图2 不同含水量的土壤光谱曲线

Fig. 2 Soil spectral curves relative to soil moisture content

2.2 基于中心波长反射率的土壤含水量高光谱估测模型

通过比值、差值、上加下减和上减下加波段组合各形成42、21、21、21个光谱参量，共计105个。通过相关性分析，选取相关性较大的光谱参量共计31个，作为敏感光谱参量参与模型的构建。

分别以4种波谱组合的敏感光谱参量为自变量，以土壤含水量为因变量，利用多元逐步线性回归，建立基于波段单一组合形式光谱参量的土壤含水量高光谱估测模型。结果表明4种波段组合方式光谱参量建立的模型sig = 0.000 < 0.05，模型均达到了显著水平。其中以差值组合方式的光谱参量建立的估测模型决定系数R²最大，为0.473（表2）。

由分析结果可见，以一种波段组合的敏感光谱参量建立的回归模型效果均不理想。因此本研究尝试综合应用4种波段组合的31个敏感光谱参量，以土壤含水量为因变量，建立基于波段多种组合形式光谱参量的土壤含水量估测模型。最佳模型为Y=38.933-5.310 × R₆₅₅/R₄₄₀+242.787 × (R₁₆₁₀-R₂₂₀₀)+293.990 × (R₅₆₀-R₆₅₅)，模型决定系数R²=0.635，明显优于基于波段单一组合形式光谱参量建立的模型（表2）。

表2 基于中心波长反射率的土壤含水量估测模型

Table 2 Soil moisture estimation model based on center wavelength reflectance

波段组合形式		光谱参量数	模型	决定系数
Band combination form		Spectral parameter number	Model	Determination coefficient R ²
单一波段组合 Single-form band combination	比值 Ratio	7	Y=54.077-12.211 × R ₆₅₅ /R ₄₄₀	0.327
	差值 Difference	8	Y=26.433+308.050 × (R ₆₅₅ -R ₈₆₅) +171.707 × (R ₁₆₁₀ -R ₂₂₀₀)	0.473
	上加下减 Sum	7	Y=-0.962-101.106 × (R ₄₄₀ +R ₆₅₅) / (R ₄₄₀ -R ₆₅₅)	0.211
	上减下加 Reduction dividing sum	9	Y=44.687+153.286 × (R ₄₄₀ -R ₆₅₅) / (R ₄₄₀ +R ₆₅₅) -250.484 × (R ₄₈₀ -R ₅₆₀) / (R ₄₈₀ +R ₅₆₀) +172.760 (R ₄₄₀ -R ₄₈₀) / (R ₄₄₀ +R ₄₈₀)	0.427
多形式波段组合 Multi-form band combination	31	Y=38.933-5.310 × R ₆₅₅ /R ₄₄₀ +242.787 × (R ₁₆₁₀ -R ₂₂₀₀) +293.990 × (R ₅₆₀ -R ₆₅₅)	0.635	

注：Y表示土壤含水量，R₄₄₀、R₄₈₀、R₅₆₀、R₆₅₅、R₈₆₅、R₁₆₁₀和R₂₂₀₀分别为Band 1、Band 2、Band 3、Band 4、Band 5、Band 6和Band 7经过中心波长反射率方法拟合得到的各波段的反射率 Note: Y stands for soil moisture, R₄₄₀, R₄₈₀, R₅₆₀, R₆₅₅, R₈₆₅, R₁₆₁₀ and R₂₂₀₀ for reflectances of Band 1, Band 2, Band 3, Band 4, Band 5, Band 6 and Band 7, respectively acquired with the center wavelength reflectance fitting method

2.3 基于波段平均反射率的土壤含水量高光谱估测模型

波段平均反射率的高光谱数据通过四种波段

组合各形成42、21、21、21个光谱参量，共计105个，选取各波段组合相关性较大的光谱参量共计30个，参与模型构建波段平均反射率各波段组合选取

的敏感光谱参量与中心波长选取的敏感光谱参量大部分相同, 只有个别差异。

分别以4种波段组合的敏感光谱参量为自变量, 建立基于波段单一组合形式光谱参量的土壤含水量估测模型。结果表明, 模型sig = 0.000 < 0.05, 均达到了显著水平。其中以差值组合方式的光谱参量建立的估测模型的决定系数 R^2 最大(表3)。

对于波段平均反射率, 以一种波段组合的

敏感光谱参量建立的回归模型效果也不理想。同样综合选取4种波段组合的30个敏感光谱参量, 建立基于波段多种组合形式光谱参量的土壤含水量估测模型, 最佳模型 $Y=60.833-12.737 \times R_{655}/R_{440}+208.397 \times (R_{1610}-R_{2200})+67.536 \times (R_{865}-R_{2200})+0.815 \times (R_{440}+R_{480}) / (R_{440}-R_{480})$, 决定系数 R^2 达0.701, 远高于基于波段单一组合形式光谱参量建立的模型(表3)。

表3 基于波段平均反射率的土壤含水量估测模型

Table 3 Soil moisture estimation model based on band average reflectance

波段组合形式 Band combination form	光谱参量 数Spectral parameter number	模型 Model	决定系数 Determination coefficient R^2
单一波段 组合Single- form band combination	比值 Ratio 8	$Y=55.181-12.834 \times R_{655}/R_{440}$	0.330
	差值 Difference 7	$Y=20.516+68.119 \times (R_{665}-R_{2200})+198.796 \times (R_{1610}-R_{2200})$	0.545
	上加下减 Sum dividing reduction 8	$Y=-1.471-10.189 \times (R_{440}+R_{480}) / (R_{440}-R_{480})$	0.216
	上减下加 Reduction dividing sum 7	$Y=54.164+73.169 \times (R_{440}-R_{655}) / (R_{440}-R_{655})$	0.303
多形式波段组合 Multi-form band combination	30	$Y=60.833-12.737 \times R_{655}/R_{440}+208.397 \times (R_{1610}-R_{2200})+67.536 \times (R_{865}-R_{2200})+0.815 \times (R_{440}+R_{480}) / (R_{440}-R_{480})$	0.701

注: Y 表示土壤含水量, R_{440} 、 R_{480} 、 R_{560} 、 R_{655} 、 R_{865} 、 R_{1610} 和 R_{2200} 分别为Band 1、Band 2、Band 3、Band 4、Band 5、Band 6、Band 7经过波段平均反射率方法拟合得到的各波段的反射率 Note: Y stands for soil moisture, R_{440} , R_{480} , R_{560} , R_{655} , R_{865} , R_{1610} and R_{2200} for reflectance of Band 1, Band 2, Band 3, Band 4, Band 5, Band 6 and Band 7, respectively, acquired with the band average reflectance fitting method

2.4 土壤含水量的最优高光谱估测模型

综合以上分析, 中心波长反射率和波段平均反射率的最佳估测模型均为基于4种波段组合光谱参量建立的模型, 决定系数 R^2 分别为0.635和0.701, 总均方根误差 $RMSE$ 分别为2.61和2.54, 相对误差 RE 分别为10.37%和9.63%。图3为两个模型预测值与实际值的拟合图, 结果表明波段平均反射率模型的预测结果与实测含水量的拟合度 R^2 达到0.56, 高于中心波长反射率模型的0.46。综合分析波段平均反射率的最佳高光谱估测模型预测精度更高, 因此将其作为土壤含水量高光谱估测最佳模型。

2.5 土壤含水量的遥感反演

将所有采样点各波段的波段平均反射率进行平均, 作为室外实测各波段平均反射率; 在LandSat8经过线性混合像元分解的土壤遥感影像上, 根据野外采样记录的GPS坐标, 找到各个采样点在遥感影像上的对应点, 同样求取所有样点各波段反射率的均值, 作为遥感影像反射率(图4)。

由图4中可见, 室外实测波段平均反射率均低于遥感影像反射率, 主要是由于实测为纯土壤样品, 而遥感影像则反映地表信息, 虽剔除植被影响但反射率可能仍包含少量植被信息, 使其平均值

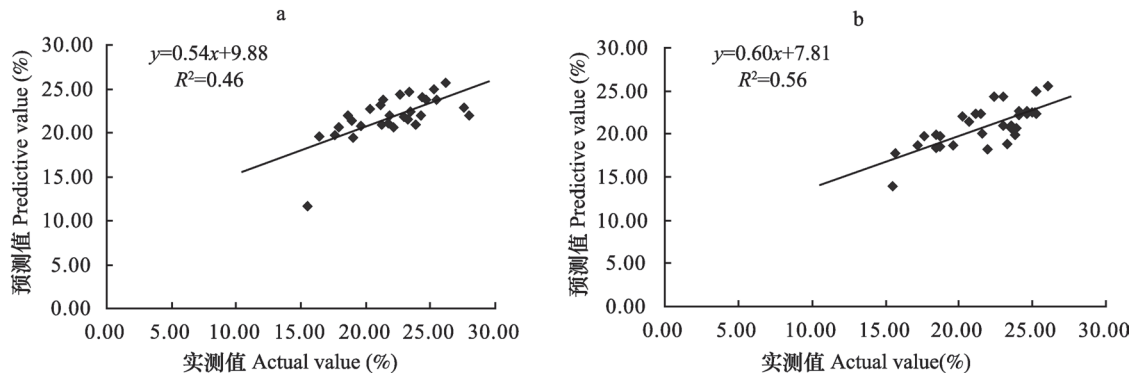


图3 基于中心波长反射率 (a) 和波段平均反射率 (b) 最优模型土壤含水量预测值与实际值的拟合图

Fig. 3 Fitting charts of predicted value of the optimal model with the center wavelength reflectance (a) and band average reflectance (b) fitting methods and the actual value

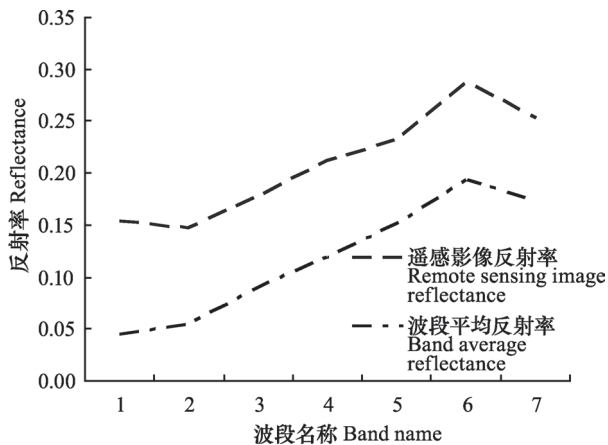


图4 波段平均反射率与遥感影像反射率的对比

Fig. 4 Comparison between band average reflectance and remote sensing image reflectance

较高；此外考虑到时相的差别，由于采样时间和LandSat8影像时间相差1~4d，由于水分蒸发，遥感地表反射率也会较高。但两者变化趋势一致，相关性达到0.989。因此，将室外实测土壤含水量高光谱估测模型应用于遥感影像反演，具有切实可行性^[22]。

在以上分析基础上，根据两者关系，对遥感影像反射率做适当订正，以便提高反演结果。考虑比值处理可以消除部分时相误差，相对精度较高，因此，本文采用比值均值订正方法。首先计算遥感影像与实测相应点位各个波段反射率的比值，然后取所有点位各波段比值的均值，作为订正系数。遥感影像各个波段反射率除以各波段的比值均值，得到订正后的遥感影像。

借助ENVI基于专家知识的决策树分类方法，结合ArcGIS进行分类后处理，得到反演后的垦利

县土壤含水量分布图(图5a)，同时，利用实测点位土壤含水量插值得到实测样点含水量分布图(图5b)。由于采样时未涉及到黄河三角洲自然保护区，为了确保插值和反演结果的可比性，因此将遥感反演土壤含水量分布图与实测样点含水量预测分布图中的黄河三角洲自然保护区部分去除，然后分别统计两图各等级土壤含水量的面积比例(表4)，对反演结果进行分析验证。

从图5看出，研究区中部含水量较低，而黄河、水库、养鱼养虾池附近土壤含水量较高，呈现出以其为中心，向四周扩散含水量递减的趋势；含水量大多集中在15%~25%，含水量在30%以上分布较少，从表4可知两者各含水量区间百分比变化趋势一致，15%~20%区间面积百分比差距大，分析原因可能是由于含水量在此区间的采样点较多导致插值时分布在此区间的面积比例较大；其余区间百分比数值大体一致。对比图5与表4，土壤含水量遥感反演结果与插值结果在空间分布与数值统计上均具有一致性和统一性，因此，土壤含水量的遥感反演结果符合研究区实际，有较好的可信度和真实性。

3 结论

本研究采用中心波长反射率和波段平均反射率两种拟合方法，利用室外实测高光谱窄波段反射率数据模拟LandSat8卫星宽波段反射率，进而通过波段组合，选取敏感光谱参量，应用多元逐步线性回归方法分别建立土壤含水量高光谱单一形式波段组合与多形式波段组合估测模型，最佳估测模型为基

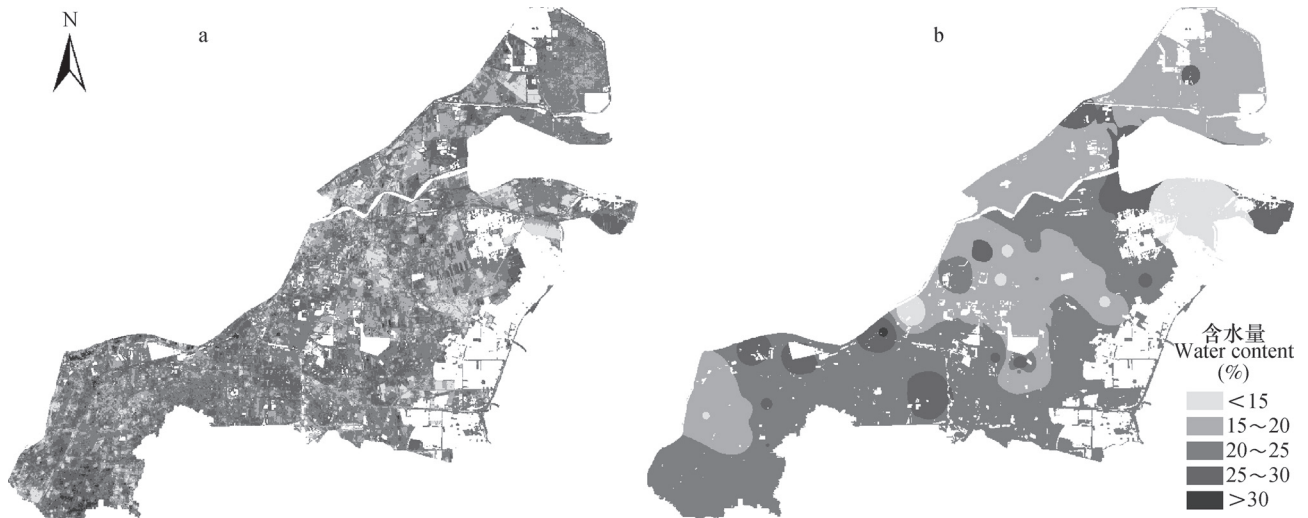


图5 遥感反演土壤含水量分布图 (a) 与实测样点含水量预测分布图 (b)

Fig. 5 Soil moisture content distribution map based on remote sensing inversion (a) and interpolated soil moisture content map based on field measurements (b)

表4 土壤含水量遥感反演分布图与实测样点含水量插值图面积比例比较

Table 4 Comparison between the soil moisture content distribution map based on remote sensing inversion and interpolated soil moisture content map based on field measurements in area percentage

含水量 Water content (%)	Area statistics of soil moisture content distribution map	
	遥感反演含水量分布图面积统计 based on remote sensing inversion (%)	实测样点含水量插值图面积统计 map based on field measurements (%)
< 15	6.84	4.49
15 ~ 20	25.42	40.23
20 ~ 25	48.66	43.23
25 ~ 30	18.56	11.99
> 30	0.72	0.06

于波段平均反射率和多形式波段组合方式敏感光谱参量的回归模型。室外实测反射率和遥感影像反射率的相关性极显著，证明基于室外实测高光谱数据建立的土壤含水量估测模型可以应用于遥感影像的反演，经订正可取得较好的效果。由于验证的地面数据和遥感影像存在1~4 d的时相差，因此定量反演的直接验证尚有一定误差，但作为趋势分析是可行的。此外由于研究区域较小，且土壤质地均为壤质，本次研究采用土壤质量含水量反演土壤水分空间变化，今后研究应尽量采用土壤体积含水量，因为在较大区域应用中，土壤体积含水量对土壤水分的定量反演和空间分布趋势的比较更加重要。本研究初步尝试了利用线性混合象元分解方法剔除遥

感影像中的植被信息，反演效果有所提高，今后的研究应着重于对多因素复合作用下的土壤反射光谱特征进行深入的探索。

参考文献

- [1] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 等. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30 (22): 6264—6277. Yang T, Gong H L, Li X J, et al. Progress of soil moisture monitoring by remote sensing (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (22): 6264—6277
- [2] 余凡, 赵英时. A S A R和T M数据协同反演植被覆盖地表土壤水分的新方法. 中国科学: 地球科学, 2011, 21 (3): 532—540. Yu F, Zhao Y S. A new semi-empirical model for soil moisture content retrieval

- by ASAR and TM data in vegetation-covered areas (In Chinese). *Science China: Earth Sciences*, 2011, 21 (3): 532—540
- [3] 张红梅, 沙晋明. 遥感监测土壤湿度的方法综述. *中国农学通报*, 2005, 21 (2): 307—311. Zhang H M, Sha J M. The studying of the method of remote sensing monitor the soil moisture (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21 (2): 307—311
- [4] 姚艳敏, 魏娜, 唐鹏钦, 等. 黑土土壤水分高光谱特征及反演模型. *农业工程学报*, 2011, 27 (8): 95—100. Yao Y M, Wei N, Tang P Q, et al. Typer-spectral characteristics and modeling of black soil moisture content (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (8): 95—100
- [5] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soil. *Soil Science*, 1965, 100: 130—138
- [6] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 1161—1165
- [7] 刘伟东, Frédéric Baret, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. *土壤学报*, 2004, 41 (5): 700—706. Liu W D, Frédéric B, Zhang B, et al. Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (5): 700—706
- [8] 谢伯承, 薛绪掌, 刘伟东, 等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及分析. *土壤学报*, 2005, 42 (1): 171—175. Xie B C, Xue X Z, Liu W D, et al. Hull-curve-method-based extraction and analysis of soil spectral characteristics (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (1): 171—175
- [9] 王静, 何挺, 李玉环. 基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究. *遥感学报*, 2005, 9 (4): 438—445. Wang J, He T, Li Y H. Studying on extraction methods for land quality information based on hyperspectral data (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9 (4): 438—445
- [10] 魏娜, 姚艳敏, 陈佑启. 高光谱遥感土壤质量信息监测研究进展. *中国农学通报*, 2008, 24 (10): 491—496. Wei N, Yao Y M, Chen Y Q. The advance of soil quality information monitoring by hyper spectral remote sensing (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24 (10): 491—496
- [11] 尹业彪, 李霞, 赵钊, 等. 沙质土壤含水率高光谱预测模型建立及分析. *遥感技术与应用*, 2011, 26 (3): 355—359. Yin Y B, Li X, Zhao Zh, et al. Predict model and analysis of the sandy soil moisture with hyperspectral (In Chinese). *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26 (3): 355—359
- [12] 陈红艳, 赵庚星, 李希灿, 等. 基于小波变换的土壤有机质含量高光谱估测. *应用生态学报*, 2011, 22 (11): 2935—2942. Chen H Y, Zhao G X, Li X C, et al. Hyper-spectral estimation of soil organic matter content based on wavelet transformation (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (11): 2935—2942
- [13] 宗秀影, 刘高焕, 乔玉良, 等. 黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析. *地球信息科学学报*, 2009, 11 (1): 91—97. Zong X Y, Liu G H, Qiao Y L, et al. Study on dynamic changes of wetland landscape pattern in Yellow River Delta (In Chinese). *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11 (1): 91—97
- [14] 李明杰, 侯西勇, 应兰兰, 等. 近十年黄河三角洲 NDVI时空动态及其对气温和降水的响应特征. *资源科学*, 2011, 33 (2): 322—327. Li M J, Hou X Y, Ying L L, et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to temperature and precipitation in the Yellow River Delta during the period 1998—2008 (In Chinese). *Resources Science*, 2011, 33 (2): 322—327
- [15] 赵庚星, 李玉环, 徐春达. 遥感和GIS支持的土地利用动态监测研究——以黄河三角洲垦利县为例. *应用生态学报*, 2000, 11 (4): 573—576. Zhao G X, Li Y H, Xu C D. Land use dynamic monitoring supported by remote sensing and GIS—A case study in Kenli County of Yellow River Delta (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (4): 573—576
- [16] 李新举. 黄河三角洲土壤质量时空演变及可持续利用评价研究. 泰安: 山东农业大学, 2005. Li X J. Spectral and temporal changes of soil quality and sustainable utilization evaluation in the Yellow River Delta (In Chinese). Taian: Shandong Agricultural University, 2005
- [17] 何挺, 王静, 程焯, 等. 土壤水分光谱特征研究. *土壤学报*, 2006, 43 (6): 1027—1032. He T, Wang J, Cheng Y, et al. Spectral features of soil moisture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (6): 1027—1032
- [18] 杨佳佳, 姜琦刚, 赵静, 等. 基于环境减灾卫星高光谱数据的盐碱地等级划分. *农业工程学报*, 2011, 27 (10): 118—124. Yang J J, Jiang Q G, Zhao J, et al. Quantitative retrieval and classification of saline soil using HJ-1A hyperspectral data (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (10): 118—124

- [19] 顾燕, 张鹰, 李欢. 基于实测光谱的潮滩土壤含水量遥感反演模型研究. *湿地科学*, 2013, 11(2): 167—172. Gu Y, Zhang Y, Li H. Remote sensing retrieval model on soil moisture content of Tidal Flat based on measured spectra (In Chinese). *Wetland Science*, 2013, 11(2): 167—172
- [20] 孙俊. 基于环境一号卫星的那曲地区青藏铁路沿线区域土壤含水量反演研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 18—23. Sun J. Retrieving soil moisture based on HJ-1 satellite—A case study of western region along Qinghai-Tibet railway in Naqu prefecture (In Chinese). Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012: 18—23
- [21] 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2005, 30(1): 27—30. Niu B R, Liu J R, Wang Z W. Remote sensing information extraction based on vegetation fraction in drought and half-drought area (In Chinese). *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(1): 27—30
- [22] 吴代辉, 范闻捷, 崔要奎. 高光谱遥感监测土壤含水量研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3067—3071. Wu D H, Fan W J, Cui Y K. Review of monitoring soil water content using hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(11): 3067—3071

HYPERSPECTRAL ESTIMATION AND REMOTE SENSING RETRIEVAL OF SOIL WATER REGIME IN THE YELLOW RIVER DELTA

Li Ping Zhao Gengxing[†] Gao Mingxiu Chang Chunyan Wang Zhuoran Zhang Tongrui An Deyu
Jia Jichao

(College of Resources and Environment; National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract Acquisition of the information of soil moisture regime is one of the hotspots in current researches. It is not an easy job to achieve inversion of regional soil moisture content just by depending on soil water estimation models established solely on near-ground hyper-spectra. The study is to explore feasible ways to forecast soil moisture contents by combining the use of narrow-band hyper-spectra and wide-band multi-spectral remote sensing images.

Field surveys were conducted and soil samples collected during April 28 to April 30, 2014 in Kenli County, the research area in the Yellow River Delta. Soil water contents were measured in lab using the soil samples and oven-drying method; soil spectra of undisturbed soil samples collected from fields were determined under natural light outdoors with an American ASD Fieldspec4 spectrometer; and the first 7 bands of the OIL sensor were selected and used to collate the LandSat8 remote sensing images of May 1, 2014 for atmospheric radiation correction, geometric precision correction, clipping and other processing. And further on, based on the hyper-spectral narrow-band reflectances measured outdoors LandSat8 wide-band reflectances were simulated with two fitting methods, center wavelength reflectance and band average reflectance methods; by means of band combination in four modes, i.e., ratio, difference, sum dividing reduction, and reduction dividing sum, with sensitive spectral parameters selected according to correlativity; then hyper-spectral single-form band combination and multi-form band combination soil moisture estimation models were established with the multiple stepwise linear regression analysis method, and then screened with the two fitting methods for the best model. Soil information in the remote sensing images was obtained using the linear mixed pixel decomposition method after excluding the vegetation information; the soil information was compared with the measured hyper-spectral reflectance and remote sensing image reflectances were corrected with the ratio and mean method. On this basis, the best hyper-spectral model

for estimation of soil moisture contents was applied to the LandSat8 satellite images. Hence, remote sensing inversion of soil moisture contents in the study area was realized; a soil moisture content distribution map based on remote sensing inversion was plotted which was compared with the interpolated soil moisture content map based on measured data at the monitoring sites; Based on spatial distribution and area percentage of each water content level, the results of the inversion were analyzed and verified.

Results show that 1) the spectral curves generally proceeded gently in a similar shape; soil reflectance tended to decline with rising water content; and to a certain extent, the 7 bands of LandSat8 OIL were related with soil moisture; 2) the model based on average reflectance of the bands for estimation of soil moisture contents is better than that based on center wavelength reflectance and the model based on multi-form band combination is superior to that based on single-form band combination; 3) the outdoor measured reflectance fitted with the band average reflectance method is quite consistent with the remote sensing image reflectance in variation trend with correlation coefficient being 0.989, up to an extremely significant level; and 4) soil moisture content distribution map based on remote sensing inversion and the interpolated soil moisture content distribution map based on measured data are quite consistent and uniform in spatial distribution and numerical statistics, indicating that the estimation of soil moisture contents based on remote sensing inversion is in conformity with the actual situation of study area, displaying good reliability and authenticity.

The study explored feasibility of combining hyper-spectral estimation with remote sensing inversion in estimating soil moisture contents in the studied area, and provided some scientific basis and technical reference for quick acquisition of the information of soil moisture regime in the Yellow River Delta.

Key words The Yellow River Delta; Soil moisture content; Hyper-spectrum; Remote sensing

(责任编辑: 檀满枝)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
 Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
 Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
 Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
 Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
 Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
 Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
 Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
 Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
 Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
 Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
 Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
 Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
 Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
 Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
 Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
 Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
 Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
 Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
 Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
 Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
 Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《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: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第52卷 第6期 2015年11月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

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

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: 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



9 770564 392156

