

黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演

常春艳¹, 赵庚星^{1*}, 李 晋², 王 凌¹, 王卓然¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 莱西市农业局, 莱西 266600)

摘 要: 黄河三角洲是典型的生态环境脆弱区, 土壤质量不高, 盐渍化状况普遍, 快速准确掌握该区土壤退化状况, 对退化土壤恢复重建、可持续利用具有重要意义。该研究选择黄河三角洲垦利县为研究区, 以 2008 年实测数据为依据, 通过建立土壤退化评价指标体系, 以参评因素权重与隶属度值加权组合构建土壤退化综合指数, 在 GIS 支持下对土壤退化进行了综合评价; 采用与实测同时相的 TM 影像数据, 结合不同程度退化土壤光谱特征、土壤退化综合指数与波段灰度值的相关性分析, 筛选土壤退化敏感波段, 进而构建土壤退化敏感光谱指数, 并建立基于敏感光谱指数的土壤退化综合指数反演模型, 最终筛选出拟合程度最高的指数模型作为研究区土壤退化的反演模型, 对模型进行精度分析, 并利用 2008 年遥感影像验证反演结果; 将该反演模型应用于 2011 年和 2013 年的遥感影像, 并对研究区 2008—2013 年的土壤退化状况及动态变化进行了分析。结果显示: 基于土壤退化综合指数评价结果, 研究区土壤退化程度从沿海到内陆呈现由高到低过渡的趋势; TM1、TM2、TM3 波段为土壤退化敏感波段, 基于此 3 个波段组合的土壤退化光谱指数构建的土壤退化遥感反演模型有较高的精度, R^2 为 0.7182, 其验证均方根误差、相对误差和决定系数分别为 0.0241、3.66% 和 0.6724, 反演结果与同年基于实测数据的综合评价结果相一致; 研究区 2008—2013 年土壤退化状况总体变化不大, 有逐渐改善趋势。

关键词: 遥感; 土壤; 光谱分析; 盐渍化; 生态脆弱区; 反演; 黄河三角洲

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.020

中图分类号: S127; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0127-06

常春艳, 赵庚星, 李 晋, 等. 黄河三角洲典型生态脆弱区土壤退化遥感反演[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 127—132.

Chang Chunyan, Zhao Gengxing, Li Jin, et al. Remote sensing inversion of soil degradation in typical vulnerable ecological region of Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 127—132. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤是人类赖以生存的重要自然资源, 土壤退化可导致全球环境恶化, 加剧人口、粮食、资源、环境、能源间的矛盾, 已成为当前全球关注的问题^[1-3]。对于土壤退化的研究可通过直接观测, 也可通过解译影响土壤退化的各环境因素进行间接研究^[4-5]。遥感可在不同时空尺度快速提供多种地表特征信息, 适用于大范围的地表及其覆盖物、退化类型等信息的获取, 利用遥感手段进行土壤退化监测, 成本低、宏观及时, 具有广阔的应用前景^[6-8]。

黄河三角洲土地资源丰富, 且黄河每年新淤土地 1 000 hm² 左右, 是中国东部沿海后备土地资源最多、开发潜力最大的地区。但该区受海陆河等多种动力系统的作用, 是典型的海陆交错带, 生态环境脆弱, 土地资源易受人类活动的影响, 土壤质量不高, 盐渍化状况普遍^[9-10], 严重制约该区农业及社会经济的发展。在国家级高效生

态经济区建设大力推进的背景下, 快速准确掌握该区土壤退化状况, 对退化土壤恢复重建、资源保护和开发利用有重要意义。

土壤退化问题受到国内外学者的广泛关注, 主要研究方向有土壤退化的类型划分、过程机理、监测预警、评价及防治等方面^[11-14], 其中, 利用遥感技术进行土壤退化动态监测的研究较少, 且偏重于对特定土壤退化类型(盐碱化、沙漠化、土壤侵蚀等)的变化研究^[15-16], 如 Tripathy 利用 MSS 和 IRS 数据, 通过 GIS 融合地面信息, 选用反射率(ALB)、归一化植被指数(NDVI)等指标, 对印度 Gulabarga 沙漠化进行了监测^[17]; 邸利等^[18]采用 TM 和 CBERS 数据, 通过计算植被覆盖度、地表坡度等指标, 对安定区土壤侵蚀进行了分级, 对整体土壤退化的遥感反演相关研究较少, 对缺少区域综合性土壤退化遥感反演的研究不深入。另外, 从研究区域看, 针对滨海典型环境脆弱区的相关研究也较少。黄河三角洲土壤退化遥感反演的有关研究主要集中于盐碱化这一退化类型, 如李晋等利用 HSI 高光谱及 TM 影像, 在分析地类光谱特征的基础上, 以决策树分类的方法研究了盐碱土地信息的提取^[19]; 李百红等^[20]利用 TM 及中巴卫星数据, 通过构建盐碱土地退化指数模型, 获取盐碱土地退化等级分布及空间变化。本研究以黄河三角洲典型区域土壤退化综合评价结果为依据, 分析不同退化程度土壤的光谱特征, 构建土壤退化的遥感反演模型, 探索典

收稿日期: 2015-01-08 修订日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(41271235、41301482); “十二五”国家科技支撑计划项目课题(2013BAD05B06-5); 山东农业大学青年基金(23837)

作者简介: 常春艳, 女, 讲师, 博士, 从事土地资源利用研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。Email: chyan0103@163.com

*通信作者: 赵庚星, 男, 教授, 博士生导师, 从事土地(土壤)资源与信息技术研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。

Email: zhaogx@sda.edu.cn

型生态脆弱区土壤退化遥感反演方法, 以期为该区土壤退化监测提供技术支持, 为黄河三角洲土地资源的持续利用与保护提供决策依据。

1 研究区概况及数据准备

本研究以黄河三角洲垦利县作为研究区。该县位于黄河尾间, 属暖温带半湿润季风气候, 多年平均降水量 592.2 mm, 平均蒸发量 1 908.2 mm, 蒸降比达 3:1, 蒸发强烈, 易造成地表积盐^[21]; 地势西南高东北低, 地下水位高, 矿化度大, 加之地势低平, 排水不畅, 土壤盐渍化现象严重; 土壤类型主要有潮土、盐化潮土、滨海潮盐土等类型。该区为黄河三角洲的核心区域, 是海陆 2 种生态系统交错带和典型生态脆弱区, 土壤退化现象严重。

研究采用 2008 年 4 月 14 日、2011 年 4 月 15 日和 2013 年 5 月 6 日 Landsat TM 遥感影像数据, 空间分辨率 30 m。同时收集相应的土地利用现状图、地形图等基础图件。对遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何精纠正、裁剪等预处理。由于影像的第 6 波段热红外波段分辨率低, 且主要用于探测地表物质的自身热辐射, 第 7 波段短波红外主要探测高温辐射源以及区分人造地物类型和岩系判别, 与研究区的土壤退化关联较小, 故剔除第 6、7 波段。

2 土壤退化综合评价

根据黄河三角洲地区的实际情况, 以 2008 年实测数据为基础, 采用 Delphi 法, 由研究区相关专家对土壤退化各影响因素进行定性筛选, 并通过系统聚类等进行定量分析, 确定了由土壤自然环境、化学和物理性状 3 个类别 12 个指标构成的土壤退化评价指标体系。自然环境指标分别为: 地下水矿化度、地下水埋深、微地貌; 化学指标分别为: 土壤含盐量、全氮、速效磷、速效钾、有机质、pH 值; 物理指标分别为: 土壤质地、土壤容重、土壤侵蚀程度。由于东部沿海滩涂地区土壤质量低, 盐渍化严重, 难以进行农业土地利用活动, 评价时予以剔除。

采用土壤图与土地利用现状图的叠置方法划分土壤退化评价单元, 利用层次分析法确定各参评因素的权重值, 并采用模糊评价中的隶属函数法将参评因素实际值与隶属度值曲线进行拟合, 确定其各自的隶属函数。在此基础上, 以参评因素的权重与隶属度值加权组合构建土壤退化综合指数, 在 GIS 支持下进行土壤退化综合评价, 并采取累计曲线分级法将研究区土壤退化划分为 6 个等级, 其中, 一级、二级为轻度退化, 三级、四级为中度退化, 五级、六级为重度退化。土壤退化综合指数计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n F_i \cdot M_i \quad (1)$$

式中: I 为土壤退化综合指数; F_i 为第 i 个评价因素的隶属度值; M_i 为第 i 个评价因素的综合权重; $i=1, 2, 3 \dots n$ 。

通过对各参评因素权重值、隶属度值计算, 得到各评价单元土壤退化综合指数及研究区土壤退化等级分布图 (图 1)。

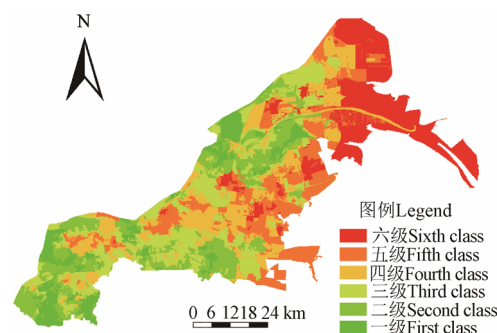


图 1 2008 年垦利县土壤退化等级分布图
Fig.1 Soil degradation grades map of 2008 in Kenli county

从土壤退化评价结果可以看出 (图 1), 一级、二级的轻度退化土地分布在离海洋较远地区, 主要在县域西南及中西部, 三、四级中度退化土地零散分布在距离海洋相对较近的中南部区域, 而五、六级重度退化土地则主要位于垦利县的东部和东北部, 离渤海较近。总体上, 距海洋较远的土壤退化程度比较低, 而距海洋较近的土壤退化程度比较高, 大致以距离海洋远近为参考, 形成了从沿海到内陆土壤退化程度由高到低过渡的趋势。

3 土壤退化遥感反演模型构建

3.1 土壤退化光谱指数

3.1.1 土壤退化敏感波段

参照垦利县土地利用现状图, 将该区土地分为重度、中度、轻度退化等几种主要不同退化程度地类, 并剔除了沿海滩涂地区。以实测数据的土壤退化综合评价结果为遥感图像分类依据, 采用遥感影像参数统计方法, 在遥感图像上均匀选取典型地类样点, 分析其不同波段的样本灰度均值, 并依据 Landsat 数据的反射率建立典型地类光谱曲线图 (图 2)。由典型地类光谱特征曲线分析看出, 不同程度退化的土壤在波段 1~3 的灰度值都呈增长趋势, 波段 4 轻度退化的灰度值陡升, 与中度、重度区分度较高, 波段 5 的灰度值随退化强弱变化规律不明显。同时, 采用定量方法选择敏感波段, 将土壤退化综合评价指数分别与波段 1~5 的单波段影像灰度值进行相关性分析, 波段 1~5 的相关系数分别为 0.326、0.412、0.355、0.212、0.150。可见, 波段 1~3 与土壤退化综合指数的相关性较高, 且随退化程度的增加, 土壤灰度值呈上升趋势。因此, 结合定性及定量方法, 确定波段 1~3 为土壤退化敏感波段, 用于构建土壤退化光谱指数。

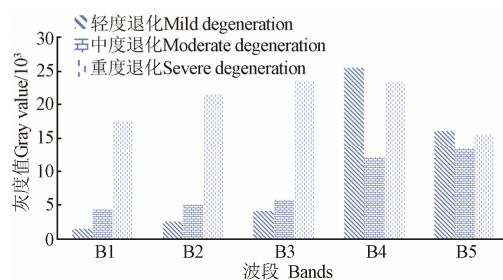


图 2 研究区典型地类光谱特征
Fig.2 Spectral curves of typical land use types in study area

3.1.2 土壤退化光谱指数

由于单波段遥感影像对土壤退化的表现力较弱，为了避免或减少日照、大气等因素的影响，运用多波段组合的方式形成包含多波段信息的新的光谱指数，进一步突出土壤退化的光谱信息。常见波段组合方式有比值、加减等方法，为加大突出指数间差异，研究中采用比值形式构建了土壤退化光谱指数，经多次试验，筛选确定了如下的土壤退化光谱指数：

土壤退化光谱指数：

$$A=(255-\Sigma Bi)/(255+\Sigma Bi) \tag{2}$$

式中：A 为土壤退化光谱指数，可通过 A 值的大小度量土壤退化程度，反映土壤退化状况； ΣBi 指 2 个或 3 个敏感波段灰度值之和，本研究为 TM 影像波段 1~3 不同组合的灰度值之和。

基于筛选出的 3 个土壤退化敏感波段，构建了基于 B1/B2/B3、B1/B2、B2/B3、B1/B3 等 4 种波段组合的土壤退化光谱指数。利用式（2）计算不同组合方式下土壤退化光谱指数，并将其与土壤评价综合指数进行相关性分析，得 4 种土壤退化光谱指数与土壤退化综合指数的相关系数，分别为：0.7128、0.3797、0.3946、0.3848。

表 1 基于不同波段组合的土壤退化光谱指数与评价结果多种回归模型的 F 值

Table 1 F value of multiple regression models based on different bands combination of soil degradation spectral indices and evaluation results

土壤退化光谱指数 Spectral indices of soil degradation	回归模型 Regression model			
	线性模型 Linear model	对数模型 Logarithmic model	幂指模型 Exponential power model	指数模型 Exponential model
$[255-\Sigma(B1+B2+B3)]/[255+\Sigma(B1+B2+B3)]$	2160.717	1756.361	1822.931	2253.769
$[255-\Sigma(B1+B2)]/[255+\Sigma(B1+B2)]$	1868.221	1456.709	1518.747	1956.369
$[255-\Sigma(B1+B3)]/[255+\Sigma(B1+B3)]$	2075.161	1511.589	1568.308	2167.312
$[255-\Sigma(B2+B3)]/[255+\Sigma(B2+B3)]$	2115.071	1429.568	1474.268	2197.66

3.2.2 精度分析及结果验证

采用均方根误差(RMSE)、相对误差和决定系数(R^2)等指标验证最佳模型反演精度。随机抽取 200 个原始图像样点进行模型检验，结果显示，预测值与实测值回归分析的均方根误差较小，为 0.0241；相对误差为 3.66%；决定性系数较高，为 0.6724。说明反演模型的预测值和实测值比较吻合，精度较高，总体能满足要求，可较好反演研究区土壤退化状况。

利用最佳反演模型，应用 ENVI 软件对 2008 年研究区遥感影像进行反演，得到该年土壤退化综合指数图，将其与研究区同年基于实测数据的土壤退化评价结果图进行叠加（图 3），分析反演结果与实际评估结果的一致性，进一步验证反演的准确性与可靠性。

从图 3 看出，反演结果与土壤退化评价结果完全一致的区域面积占 87.97%，反演结果与评价结果相差一级的面积占 6.9%，相差两级的面积占 5.12%，说明模型反演结果准确性较高。与研究区原始遥感影像进行对比分析可以看出，相差一级的区域主要为河流、水田、水库等地类，相差两级的区域则为个别的盐荒地地类。究其原因，一是旱地存在不同程度的盐碱化，地类插花现象较严重；二是部分水田及建设用地与某些旱地、盐荒地的光谱信息比较类

由此可见，基于 B1/B2/B3 3 个波段组合的土壤退化光谱指数最能反映研究区土壤退化状况，选择其为土壤退化敏感光谱指数。

3.2 土壤退化遥感反演模型

3.2.1 反演模型构建

利用土壤退化光谱指数与土壤退化综合指数的关系，构建多种形式的回归模型，并根据 F 值进行显著性检验，筛选出拟合度最高的最佳遥感反演模型。表 1 为土壤退化光谱指数与土壤退化综合指数的 4 类回归函数模型，分别为线性模型、对数模型、幂指模型和指数模型。统计学上一般认为 F 值越大，拟合程度越高。由表 1 可以看出，指数模型回归方式与土壤退化综合指数的拟合程度最高，其次为线性模型、幂指模型和对数模型。从不同波段组合的土壤退化光谱指数看，以 B1/B2/B3 此 3 个波段组合的土壤退化敏感光谱指数回归效果最好，为最佳模型，模型 R^2 为 0.7182。

$$y=1460.7x^2-2418.2x+1108 \tag{3}$$

式中：y 代表通过模型计算得到的研究区土壤退化综合指数；x 为原始遥感影像土壤退化光谱指数值。

似，主要存在于研究区中部和西南部地类分布较复杂地区，而在地物分布相对单一、光谱信息相对明确的东部及东北部等地区，图像反演的结果则更为理想。

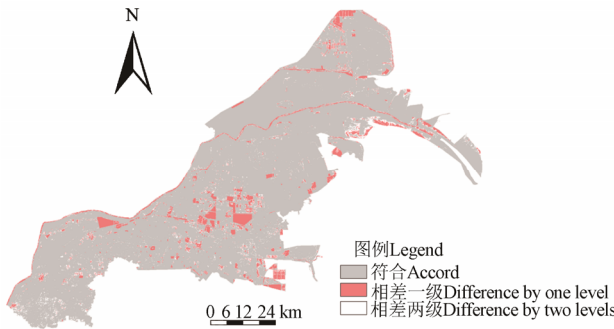


图 3 2008 年研究区土壤退化反演结果与评价结果对比图
Fig.3 Comparison map between soil degradation inversion results and evaluation results of 2008 in study area

4 研究区土壤退化状况及动态分析

4.1 研究区土壤退化状况

利用反演模型对研究区 2011 年和 2013 年的遥感影像进行反演，得到多时相的土壤退化状况，研究区 2008 年、2011 年和 2013 年土壤退化等级面积及空间分布图见

表 2、图 4。可见，研究区土壤退化各等级除最轻的一级所占面积比例较小，不足 10%外，其他各级面积比例相差不大，均在 20%上下。从空间分布看，研究区西南部、

南部和东北部沿黄区域土壤退化程度较轻，中部和东部沿海区域土壤退化程度较高，土壤退化等级总体呈现自西南向东及东北沿海逐步升高的趋势。

表 2 研究区 2008—2013 年土壤退化遥感反演结果等级面积统计
Table 2 Inversion grades area of soil degradation during 2008-2013 in study area

等级 Grade	2008 年		2011 年		2013 年	
	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%
一级 First class	14527.92	6.262	18409.3	7.935	18611.14	8.022
二级 Second class	36187.56	15.598	35971.8	15.505	36809.32	15.866
三级 Third class	47346.82	20.408	46629.94	20.099	47673.94	20.549
四级 Fourth class	48149.54	20.754	45230.97	19.496	44061.68	18.992
五级 Fifth class	41389.03	17.84	42757.83	18.43	41317.11	17.809
六级 Sixth class	44400.4	19.138	43001.44	18.535	43528.08	18.762
总计 Total	232001.27	100	232001.27	100	232001.27	100

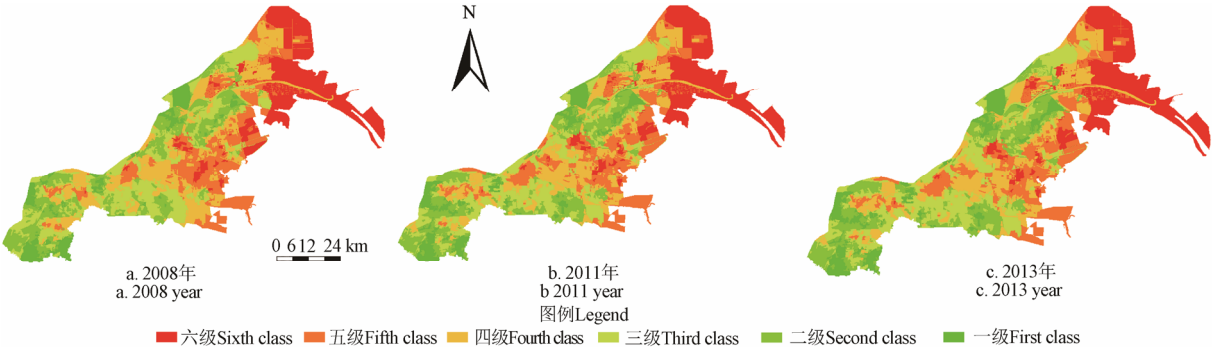


图 4 研究区不同时期土壤退化等级分布图
Fig.4 Grades distribution maps of soil degradation in different period in study area

4.2 土壤退化动态分析

表 3 为研究区 3 个时相的土壤退化程度分析，可以看出，2008—2013 年间研究区土壤退化动态变化总体不大，轻度退化约占总区域的 23%左右，中度退化约占 40%左右，重度退化约占 37%左右。自 2008—2013 年，轻度退化土壤面积增加了 4 704.98 hm²，中度退化土壤面积减少 3 760.74 hm²，部分中度退化土壤演变为轻度退化，重度退化土壤面积呈略微减少的趋势。该现象主要得益于

近些年研究区正进行的土地整理项目，另外，灌排配套设施、水库和蓄水池等水利设施的修建、排盐管网的布设等，都有利于降低土壤含盐量，提高土壤质量，使土壤退化状况得到改善。在空间变化上，轻度土壤退化在西南部有增多趋势，该区域为土壤质量相对良好区域；中部地区的中度退化面积逐渐减少，土壤退化程度减轻；东部及东北部地区的重度退化土壤面积变化甚微。总体看，研究区土壤退化程度呈现为逐步改善趋势。

表 3 研究区 2008—2013 年土壤退化程度分析
Table3 Extents of soil degradation during 2008-2013 in study area

年份 Year	轻度退化 Mild degeneration		中度退化 Moderate degradation		重度退化 Severe degradation	
	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%
2008 年	50715.48	21.86	95496.36	41.162	85789.43	36.978
2011 年	54381.1	23.44	91860.91	39.595	85759.27	36.965
2013 年	55420.46	23.888	91735.62	39.541	84845.19	36.571

5 结 论

1) 构建了研究区土壤退化评价指标体系，并基于参评因素权重与隶属度值加权组合计算了土壤退化综合指数，完成了研究区土壤退化综合评价。评价结果显示，研究区距海洋较远的土壤退化程度较低，距离海洋较近的土壤退化程度较高，从沿海到内陆，土壤退化程度呈由高到低过渡的趋势。

2) 筛选确定了土壤退化的敏感波段，并构建了基于 1~3 波段组合的土壤退化光谱指数，在此基础上，建立土壤退化光谱指数与土壤退化综合指数的 4 类回归函数模型，通过分析其 *F* 值，确定了拟合程度最高的指数模型作为研究区土壤退化反演模型，模型 *R*² 为 0.7182，并对模型进行精度分析及验证，结果显示该反演模型有较高精度。

3) 利用反演模型分别对研究区 2008 年、2011 年、2013 年的遥感影像进行反演应用，结果显示：研究区土

壤退化动态变化总体不大, 轻度、中度、重度退化面积分别占研究区总区域的 23%、40%、37% 左右, 轻度退化土壤面积增加, 中度退化土壤减少, 少量中度退化土壤演变为轻度退化土壤, 重度退化土壤略微减少, 整体有逐渐改善趋势。

总之, 通过对研究区不同时相的遥感影像进行土壤退化反演, 进行土壤退化状况演变分析, 可为黄河三角洲地区土壤退化的动态监测提供新的技术方法和科学依据, 但由于该区生态环境的脆弱性和典型性, 地类变化相对较为频繁, 地物插花现象严重, 地物光谱特征复杂, 在一定程度上影响土壤退化遥感定量反演模型的应用。其次, 该遥感反演模型基于黄河三角洲典型区域垦利县而构建, 虽在该研究区取得较理想的效果, 但在整个黄三角区域的通用性仍需进一步探讨。再次, 本研究应用了陆地卫星图像, 而不同传感器类型和分辨率的遥感影像也会对反演结果有一定影响, 因此基于不同类型遥感影像及快速准确的土壤退化遥感反演方法仍需进一步探索。

参 考 文 献

- [1] 张桃林, 王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 280—284.
Zhang Taolin, Wang Xingxiang. Development and orientation of research work on soil degradation[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 280—284. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗明, 龙花楼. 土地退化研究综述[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 287—293.
Luo Ming, Long Hualou. Progress in the research on land degradation[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 287—293. (in Chinese with English abstract)
- [3] Lai R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998, 17(4): 319—464.
- [4] Vrieling A, Sterk G, Vigiak O. Spatial evaluation of soil erosion risk in the West Usambara Mountains, Tanzania[J]. Land Degrad Dev, 2006, 17(3): 301—319.
- [5] 张喜旺, 周月敏, 李晓松, 等. 土壤侵蚀评价遥感研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1010—1017.
Zhang Xiwan, Zhou Yuemin, Li Xiaosong, et al. A review of remote sensing application in soil erosion assessment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 1010—1017. (in Chinese with English abstract)
- [6] Thiam A K. The causes and spatial pattern of land degradation risk in southern Mauritania using multitemporal AVHRR-NDVI imagery and field data[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14(1): 133—142.
- [7] Toutin T, Gray L. State of the art of elevation extraction from satellite SAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 55(1): 13—33.
- [8] 赵其国, 滕应. 国际土壤科学研究的新进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 1—7.
Zhao Qiguo, Teng Ying. New advances in international soil science[J]. Soils, 2013, 45(1): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 秦元伟, 赵庚星, 王静, 等. 黄河三角洲滨海盐碱退化地恢复与再利用评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 306—311.
Qin Yuanwei, Zhao Gengxing, Wang Jing, et al. Restoration and reutilization evaluation of coastal saline-alkaline degraded lands in Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 306—311. (in Chinese with English abstract)
- [10] 常春艳, 赵庚星, 王凌, 等. 黄河口生态脆弱区土地利用时空变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 226—234.
Chang Chunyan, Zhao Gengxing, Wang Ling, et al. Land use spatiotemporal changes and its driving forces analysis in vulnerable ecological region of Yellow River Estuary[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 226—234. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘刚才, 张建辉, 高美荣, 等. 土壤水蚀影响因子与土壤退化研究进展[J]. 西南农业学报, 2003, 16(增刊): 23—28.
Liu Gangcai, Zhang Jianhui, Gao Meirong, et al. A review of soil degradation and affecting factors of water erosion[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2003, 16(Suppl.): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [12] 卢金伟, 李占斌. 土壤侵蚀退化研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 72—76.
Lu Jinwei, Li Zhanbin. The development in research work on soil degradation[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1): 72—76. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陆冠尧, 李森, 魏兴琥, 等. 粤北石漠化地区土壤退化过程研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 20—25.
Lu Guanyao, Li Sen, Wei Xinghu, et al. The processes of soil degradation in rock desertification area of northern Guangdong[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 20—25. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 长江河口地区土壤肥力质量综合评价研究——以启东市为例[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 513—517.
Zhang Tongjuan, Yang Jinsong, Liu Guangming, et al. Evaluation of soil quality in Yangtze River Estuary Area: A case study of Qidong city[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 513—517. (in Chinese with English abstract)
- [15] 林晨, 周生路, 吴绍华. 30 年来东南红壤丘陵区土壤侵蚀度时空演变研究——以长汀县为例[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1235—1241.
Lin Chen, Zhou Shenglu, Wu Shaohua. Evolution of soil erosion degree in 30 years in Granite Hills, Southeastern of China: A case study of Changting County, Fujian[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(10): 1235—1241. (in Chinese with English abstract)
- [16] 蒋德明, 曹成有, 押田敏雄, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中植被与土壤退化特征的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 156—161.
Jiang Deming, Cao Chengyou, Toshio Oshida, et al. Characteristics of the vegetation and soil changes in the process of desertification in Horqin Sandy[J]. Land Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 156—161. (in Chinese with English abstract)
- [17] Tripathy G K, Ghosh T K, Shah S D, et al. Monitoring of desertification process in Karnataka state of India using multi-temporal remote sensing and ancillary information using GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(12): 2243—2257.
- [18] 邸利, 张仁陟, 张富, 等. 基于 RS 与 GIS 的定西市安定区土地利用变化与土壤侵蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(2): 40—45.
Di Li, Zhang Renzhi, Zhang Fu, et al. Landuse changes and soil erosion in Anding Region, Dingxi City of Gansu Province based on RS and GIS [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(2): 40—45. (in Chinese with English abstract)

- [19] 李晋, 赵庚星, 常春艳, 等. 基于 HSI 高光谱和 TM 图像的土地盐渍化信息提取方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 520—525.
Li Jin, Zhao Gengxing, Chang Chunyan, et al. Land salinization information extraction method based on HIS hyperspectral and TM imagery[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 520—525. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李百红, 赵庚星, 秦元伟, 等. 黄河三角洲滨海盐碱退化土地变化遥感监测研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(6): 1166—1171.
Li Baihong, Zhao Gengxing, Qin Yuanwei, et al. A study of remote sensing detection of salt-affected coastal land degradation in the Yellow River Delta[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(6): 1166—1171. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孟岩, 赵庚星, 王静. 基于遥感图像的垦利县盐碱退化土地信息提取及其演化规律研究[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(5): 135—139.
Meng Yan, Zhao Gengxing, Wang Jing. Remote sensing image based information extraction for land salinized degradation and its evolution in Kenli County[J]. Areal Research and Development, 2009, 28(5): 135—139. (in Chinese with English abstract)

Remote sensing inversion of soil degradation in typical vulnerable ecological region of Yellow River Delta

Chang Chunyan¹, Zhao Gengxing^{1*}, Li Jin², Wang Ling¹, Wang Zhuoran¹

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Agriculture Bureau of Laixi City, Laixi 266600, China)

Abstract: The Yellow River Delta is a typical eco-environmental fragile region where soil quality is not high and salinization is universal, and it is of great significance for the rehabilitation and reconstruction of degraded soil to know the situation of degradation soil quickly and accurately in the region. This research chose Kenli County in the Yellow River Delta as the research area and the measured data in 2008 as the basis, and the comprehensive evaluation of soil degradation was carried out based on soil degradation composite index, which was built by weighted combination of soil degradation evaluation index weight and membership value. Using TM image that was at the same time as the measured data, the spectral characteristics of different soil degradation levels were researched, and the correlations between soil degradation composite index and the bands' gray values were analyzed; with the combination of qualitative and quantitative methods, the sensitive bands were screened. Then the sensitive spectral indices of soil degradation were built, based on which the remote sensing inversion model of soil degradation was established, and the exponential model was selected ultimately which had the highest fitting precision. Verified on the accuracy and the inversion results, the model was applied to the remote sensing images in 2011 and 2013, and the soil degradation dynamics were analyzed during 2008-2013 at last. The results showed the lower-degree degradation soil in the study area was far away from the ocean, and degradation degree of soil in close distance from ocean was relatively high; taken altogether, the extent of soil degradation from the coast to the inland in the study area showed a trend from high to low. The sensitive bands were TM1, TM2 and TM3, and the spectral indices of soil degradation based on the combination of these 3 sensitive bands were characteristic spectral indices of soil degradation. The regression function models were built by soil degradation spectral indices and soil degradation composite index, and the exponential model was the best, which had the highest F value and the best fitting. The remote sensing inversion model of exponential form based on the characteristic spectral indices of soil degradation had more higher accuracy, whose R^2 was 0.7182, and validation RMSE, relative error and determination coefficient were 0.0241, 3.66% and 0.6724, respectively. By contrast, the inversion results were consistent with the comprehensive evaluation results based on the measured data in the same year; in particular, the inversion results were more ideal in the area where the land types were relatively simple and the spectral information was relatively clear. The condition of soil degradation changed little in the study area during 2008-2013, and the specific performances were that the area of mild degradation soil increased and degradation soil at other grades decreased, a small amount of moderate degradation soil turned into mild, and there was a gradual improvement in the trend as a whole. This study provides technical support for monitoring the degradation soil in the Yellow River Delta, and provides decision-making basis for the sustainable utilization and protection of land resources in this area.

Key words: remote sensing; soils; spectrum analysis; salinization; vulnerable ecological region; inversion; Yellow River Delta