

# 干旱区典型盐碱土壤含盐量估算的最佳高光谱指数研究

蒲智<sup>1,2</sup>, 于瑞德<sup>3</sup>, 尹昌应<sup>4</sup>, 陆亦农<sup>5</sup>

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆农业大学  
计算机与信息工程学院, 新疆, 乌鲁木齐, 830052; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐  
830011; 4. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 5. 新疆师范大学 地理系, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 盐碱土的表层土壤含盐量是土壤盐碱化程度分级的主要因素之一。对西北干旱区不同含盐量和含水率的典型盐碱土进行了分析, 运用统计方法分析了 5 种高光谱指数与土壤含盐量的定量关系, 并通过对比研究, 确定了能提高盐碱土壤含盐量估算精度的最佳光谱指数及定量预测模型。结果表明, 不同的指数所选择出的对土壤含盐量最敏感的波段基本都位于近红外(NIR)和短波红外波段(SWIR), 说明盐类矿物在近红外和短波红外波段(VNIR—SWIR)区域会产生特有的光谱特征。所选定的最佳光谱 ND 指数结构简单, 易于计算, 且对土壤中的水分不敏感, 该技术对于大面积土壤含盐量制图具有较广的应用前景。

**关键词:** 盐碱土; 土壤含盐量; 高光谱; 高光谱指数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)06-0129-05

中图分类号: S153.6

## Optimal Hyperspectral Indices for Soil Salt Content Estimation on Typical Saline Soil in Arid Areas

PU Zhi<sup>1,2</sup>, YU Rui-de<sup>3</sup>, Yin Chang-ying<sup>4</sup>, LU Yi-nong<sup>5</sup>

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumq, Xinjiang 830002, China; 2. College of Computer and Information Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 4. Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. Department of Geography, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

**Abstract:** Salt content in the top layer of soil is one of main factors that should be taken into account in soil salinity classification. This study analyzed three saline soil reflectance spectral database which include soils with various salt and soil moisture contents. With the help of statistic analysis, the relationship between soil salt content and five hyperspectral indices was analyzed and contrasted. The optimal hyperspectral index and spectral predicting models for soil salt content was developed. The results showed that the most sensitive wavelengths for soil salt content were in the NIR and SWIR domains, indicating possible sensitivity of the characteristic features associated with salt minerals in the VNIR—SWIR region. The selected ND index can be calculated easily and is insensitive to soil moisture, and therefore has wide applicability for large-scale soil salt content mapping.

**Keywords:** saline soil; soil salt content; hyperspectral; hyperspectral indices

土壤盐碱化是干旱地区土地退化的一种主要形式和诱因, 对干旱、半干旱区的农业生产具有十分不利的影响。要对盐碱化土壤进行治理, 防止其进一步退化以及实现农业可持续发展, 必须及时获取有关盐碱化土壤的性状、范围、面积、地理分布及盐碱化程度

等方面实时、可靠的信息。近些年来, 遥感已经成为监测土壤盐碱化的一种新的探测手段。对于盐碱化土壤而言, 研究土壤盐渍度分级应考虑的主要因素是表层土壤的含盐量, 以及盐分组成和积盐厚度, 同时评价耕地地力等级的重要因素之一就是土壤盐渍化

收稿日期: 2012-02-19

修回日期: 2012-04-25

资助项目: 中国气象局气候变化专项“古尔班通古特沙漠历史气候变化及其对区域沙漠化影响研究”(CCSF201206); 科技部公益性行业科研专项(GYHY201206014); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(IDM201106)

作者简介: 蒲智(1975—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 博士研究生, 主要从事生态遥感研究。E-mail: puzhi2012@sina.com。

通信作者: 于瑞德(1962—), 男(汉族), 山东省招远市人, 博士, 研究员, 主要从事气候变化与环境演变研究工作。E-mail: yuruide@yahoo.com.cn。

程度。由于不同程度的盐碱化土壤具有不同的光谱反射特征,因此可以利用遥感技术识别土壤盐碱化程度。而建立基于光谱分析的土壤盐分定量反演模型则是开展基于遥感技术的土壤盐碱化监测的基础工作。

目前在盐碱土的遥感监测领域多光谱卫星遥感技术已获得了大量的应用,但是其应用受一系列因素的制约。例如,盐渍土壤中的盐离子结晶相对较弱而导致其吸收特征不明显,而其它理化特征(如含水率、表面粗糙度、有机质等)则会影响土壤的反射率光谱。此外多光谱相对较低的空间和光谱分辨率很难区分复杂的地表混合光谱特征,会导致了地物光谱中一些细节特征丢失,从而无法精确地定量分析土壤的含盐参数。近些年来,高光谱传感器技术得到了长足发展。与多光谱遥感相比,高光谱遥感具有的精细的光谱分辨率,能够较客观地反映地物光谱特征极其微弱的变化,可以进行光谱波形形态分析,从而检测出具有诊断意义的地物光谱吸收特征,因此可以依据诊断性的光谱吸收特征来识别地物,进行遥感定量分析并且研究地物的化学成分<sup>[1-5]</sup>。基于高光谱技术的这一优势,近年来国内外多位学者应用高光谱技术定量半定量地研究了土壤盐碱化及土壤特性<sup>[6-11]</sup>。

本研究以新疆维吾尔自治区阜康市三工河流域典型的盐碱化土壤为研究对象,进行了野外光谱实测,以及室内人工控制配盐实验,用以测量分析具有不同含盐参数的土壤的光谱特征,并采用了多种高光谱指数进行了土壤含盐量提取的研究,确定了反映盐碱土土壤含盐量的最佳高光谱指数,探讨了采用高光谱指数提取土壤含盐量的可行性,为今后实现基于高光谱遥感方法进行土壤盐分含量信息提取奠定理论基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 土样采集

以地面土壤的反射光谱为研究对象,建立土壤含盐量与高光谱数据之间的关系。在阜康市三工河流域采集了 37 个表层土样,采集的样点布及了各点的空间分布的均匀性,且代表了各盐渍化等级。采样同时,测量了每个点的土壤光谱反射率。将土样风干、磨细后过 2 mm 筛,充分混合后一分为二,一份用于土壤化学分析,另一份用于室内光谱测量。

### 1.2 试验设计

农化分析结果显示,研究区土壤中硫酸钠含量达 98%,表明该区域土壤为硫酸钠型盐碱土,因此着重于硫酸钠型盐碱土的光谱特性及土壤含盐量的估算

研究。研究目的是为了获得一个能估算土壤含盐量的高光谱指数,该指数应该能适于不同含盐量和含水率的土壤。

野外采集的土样中含盐量和含水率的取值范围都比较窄,要比理论上的取值范围小。因此,本研究进行了室内控制试验,用人工方法配制了含盐量不同和含水率不同的盐碱土样本,用来模拟自然条件下可能存在的各种含盐状态,为创建具有广泛适用性的高光谱土壤含盐量指数提供模拟实验数据。

室内控制试验添加的盐分为硫酸钠,共设置了 7 个含盐量梯度,即:0.8%,1.6%,2.6%,4%,7%,10%和 20%,含盐量包括了不同的盐碱化程度,取值范围覆盖了野外常见的含盐量范围。含水率也设置了 7 个梯度,即:5%,7.5%,10%,12.5%,15%,17.5%和 20%,也覆盖了干旱区野外实测土壤水分的范围。为减小系统误差,确保数据的准确性,每个含盐量梯度和含水率梯度做 4 次重复。

室内控制实验的光谱测量分两个阶段。第一阶段先测量含盐量不同的风干土样,获取了干燥盐碱土在不同含盐量状态下的反射率光谱;第二阶段对每个土样均按照预定的含水率所需加水量从 5%的低含水率开始,按梯度依次加水。每加一次水,待土样表面的自由水消失后,立即进行室内光谱测量。每个土样测量 7 次,可获得了 7 个不同梯度含水率的土壤反射率光谱曲线。

将室内控制实验所测的光谱数据建立光谱数据库 1,并以该数据库为基础,利用高光谱指数建立土壤含盐量估算模型。将野外采样时所测光谱数据建立为光谱数据库 2,而将室内所测的野外风干土样的光谱数据建立为光谱数据库 3。光谱数据库 2 和 3 用来验证土壤含盐量估算模型和检验光谱指数。

### 1.3 光谱测量

光谱测量采用 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro FR 型光谱仪(波谱范围为 350~2 500 nm;350~1 000 nm 光谱分辨率 3 nm,1 000~2 500 nm 为 10 nm,重采样为 1 nm)。光谱测量分野外实地测量和实验室室内测量两部分进行。野外光谱测量选择在晴朗无风的天气进行,时间为 12:00—16:00。测量时采用 25°视场角探头,垂直于土样表面 20 cm 进行测量。光谱仪每次扫描时间为 0.1 s,输出的光谱为 10 条原始扫描光谱自动平均所得。室内光谱测量在一个能控制光照条件的暗室内进行,土壤样本分别放置于直径 7 cm,深 3 cm 的容器内,土样表面用直尺刮平;光源是功率为 1 000 W 的钨灯,距土壤样品

表面 50 cm,光源照射方向与垂直方向夹角为 15°,5° 探头置于离土壤样本表面 20 cm 的垂直上方。测试之前先去除暗电流的影响,然后以白板进行定标;每个土样采集 10 条光谱曲线,算术平均后得到该土样的实际反射光谱数据。

1.4 光谱数据处理

由于光谱仪波段之间对能量响应上的差别,光谱曲线上存在许多“毛刺”噪声,反射率变化剧烈,需要对光谱曲线进行平滑优化处理。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。

1.5 高光谱指数的构建

在国际上,高光谱指数被广泛地应用于提取植被的生物理化参数。国内外许多学者研究利用高光谱指数提取叶面积指数、叶绿素浓度、植被色素含量、叶片的含水率及叶片含氮量等植被生物物理和化学参数,获得了很好的效果<sup>[12-16]</sup>,而高光谱指数应用于土

壤盐分参数方面的应用还较少<sup>[17-18]</sup>。

本研究选择多个高光谱指数对土壤盐分含量信息提取进行比较研究,以期获得提取土壤含盐量的最佳高光谱指数。表 1 为采用的 5 种高光谱指数及其构建方法。其中  $\rho_{\lambda_1}$  和  $\rho_{\lambda_2}$  分别为任意两个波长的反射率,波段  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的范围均为 350~2 500 nm。

对于每一种指数而言,先对数据库 1 进行校验。即对在 350~2500 nm 范围内,以 5 nm 间隔读取光谱反射率数据,采用矩阵的方式,将两两组合的所有可能波段构建的指数与土壤盐分含量进行拟合,计算相应的均方根误差(RMSE)。均方根误差的值为最小时的波段组合即为该指数所确定的最佳波段。然后再利用该波段组合对光谱数据库 2 和 3 的光谱数据进行验证,并计算其均方根误差。如果对 3 个光谱数据库的计算所得的 RMSE 均较小,则该指数为估算土壤含盐量的最佳指数。

表 1 高光谱指数的名称与算法

高光谱指数	类型	含义	公式
D	导数	一阶导数	$\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}$
SR	反射率	简单比值	$\rho_{\lambda_2} / \rho_{\lambda_1}$
ND	反射率	归一化差值	$(\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}) / (\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2})$
mSR	反射率	改进的简单比值	$(\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}) / (\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2} - 2\rho_{\lambda_3})$
mND	反射率	改进的归一化差值	$(\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_3}) / (\rho_{\lambda_2} - \rho_{\lambda_3})$

注: $\rho$ 表示光谱反射率, $\lambda$ 为波长。

2 结果与分析

2.1 不同盐分含量的土壤光谱特征

对野外采集的土样的光谱曲线按盐渍化程度进行分类并取其平均光谱,并对不同含盐量级别的光谱曲线进行对比。图 1—2 分别显示了野外采集的不同含盐量的土样反射光谱曲线及对应的去除包络线的光谱曲线特征。

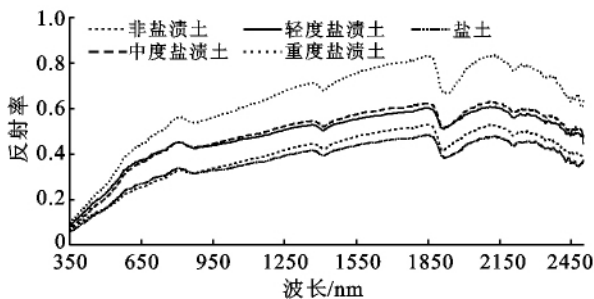


图 1 不同含盐量土壤样本室内光谱曲线

由图 1 的土壤反射光谱曲线形状可以看出,尽管不同含盐量的土壤光谱曲线存在着一定程度的差异,但所有曲线的总体变化趋势相似,表现为从 350~

2 500 nm 波段范围内的光谱反射率来看,土壤光谱曲线除在 1 400 和 1 900 nm 处有明显的水分吸收峰,整体表现平缓。同时随着土壤含盐量的升高,整个波段范围内的反射率呈上升趋势,尤其在 350~800 nm 波段处,不同含盐量土壤光谱曲线的斜率有较明显的差异,含盐量越高,曲线斜率越大。

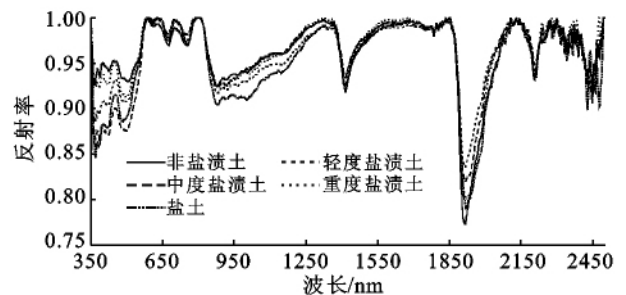


图 2 不同含盐量土壤样本室内去包络线光谱曲线

在土壤光谱曲线相似的情况下,不便于直接对不同含盐量的光谱曲线的吸收特征进行对比分析,需要对光谱曲线做进一步处理以突出土壤光谱的总体形状特征。对光谱曲线去包络线处理后使可见光近红外波段的吸收特征得到显著增强(图 2),观察分析可

以发现这些土壤光谱曲线具有 5 个特征吸收谷, 分别以 490, 874, 1 414, 1 913 和 2 205 nm 为中心。在 1 414 和 1 913 nm 附近, 有 2 个明显的水分吸收特征带, 且随着含盐量的加深, 这两个吸收带的深度加深且更加不对称。在 673, 752, 1 785 和 2 341 nm 这 4 个吸收带处, 随着土壤含盐量的升高, 光谱曲线的吸收深度随之减小, 而在 1 414, 1 913, 2 447 nm 这 3 个吸收带处, 光谱曲线的吸收深度则随着土壤盐碱化程度的加重而加深。

## 2.2 土壤盐分含量估算的最佳高光谱指数及定量估算模型

对 5 种指数校验和验证的分析结果详见表 2, 表中每个光谱指数所入选的波段是基于室内控制试验

光谱数据库(数据库 1)所得到的最小 RMSE 值时的光谱波段, 这些波段即为每种光谱指数对土壤含盐量的敏感波段。比较这些波段可以发现, 就所有参与测试的光谱指数来说, 对土壤含盐量最敏感的波段基本都位于近红外和短波红外波段。这一结果与许多研究所证明的“盐类矿物在近红外和短波红外波段区域会产生特有的光谱特征”的结论是相一致的。

数据库 1 的 RMSE 值为每种指数在基于室内控制试验数据库的基础上, 进行光谱指数校验时所获得的最小 RMSE 值。数据库 2 和数据库 3 的 RMSE 值分别为每种指数所建立的土壤含盐量预测模型对研究区野外实测光谱数据库和土样室内实测光谱数据库进行验证所得的 RMSE 值。

表 2 5 种光谱指数基于室内控制试验数据的校验结果

光谱指数	$\lambda_1/\text{nm}$	$\lambda_2/\text{nm}$	$\lambda_3/\text{nm}$	回归模型	均方根误差 RMSE/%		
					数据库 1	数据库 2	数据库 3
<i>D</i>	1 155	1 190		$0.65+79.29D$	0.155 8	0.105 8	0.105 9
ND	1 135	1 595		$0.44+6.79ND$	0.128 3	0.105 2	0.105 0
mSR	1 350	1 490	2 000	$-1.43+6.18mSR$	0.150 8	0.099 1	0.106 0
mND	1 410	2 000	1 440	$-0.21-1.72mND$	0.192 8	0.105 3	0.105 8
SR	1 965	2 395		$1.97-2.19SR$	0.396 8	0.087 2	0.093 8

注: 回归模型是每种光谱指数以入选波段为输入变量时的土壤含盐量的预测模型。

在所有参与测试的光谱指数中, 确定表层土壤含盐量最佳高光谱指数的标准是该光谱指数在校验数据库和验证数据库中均具有较小的 RMSE 值。通过比较所有的 5 个指数的校验和验证的结果, 发现 ND 指数用于检验数据库 1 时的结果最好, RMSE 值非常小, 而且对数据库 2 和数据库 3 进行验证时得到的 RMSE 值也很低, 表明该 ND 指数是 5 个指数中最能有效地预测土壤含盐量的光谱指数。

在本研究中采用了 RMSE 矩阵图来显示各个指数的测试效果。矩阵分析结果表明, 由于数据库 1 样本所覆盖的范围较广, 而数据库 2 和 3 样本的覆盖范围小, 因此三者之间的 RMSE 矩阵图有所差异。光谱数据库 2 和 3 所测量的土壤样本是完全一样的, 光谱数据库 2 是风干土样的光谱, 样本含水率近于 0; 而光谱数据库 3 是野外原始土样的光谱, 其土样含水率变化范围较大, 但两者的 RMSE 矩阵图差异较小, 这表明土壤的含水率对 ND 指数没有影响。分析矩阵图可以发现, 以 1 135 和 1 595 nm 为特征波段组建的 ND 指数拟合的方程的 RMSE 的值最小, 因此选择最佳波段 1 135 和 1 595 nm 构建土壤含盐量高光谱指数, 而这两个波段不处于土壤光谱中的两个水分吸收带, 这进一步表明指数对盐碱土壤中的水分不敏感。

## 2.3 土壤含盐量估算模型的检验

利用光谱数据库 1, 2 和 3 的光谱数据及土壤盐分含量数据对所构建的土壤盐分含量估算模型进行了测试和检验, 用预测值与观察值的 1:1 关系图分析基于 ND(1 135, 1 595) 所建模型的可靠性和一致性, 结果表明, 预测值和观察值之间的符合度较高。对于数据库 1 来说, 土壤高含盐量和低含盐量的预测值和实际值都比较接近, 数据库 2 和数据库 3 的低含盐量的预测值和实际值比较接近, 表明 ND(1 135, 1 595) 高光谱指数具有预测土壤含盐量的潜力, 因而模型具有较好的实用性。

## 3 结论

(1) 本方法参数结构简单, 误差小, 而且对土壤中严重影响土壤光谱曲线形状的水分不敏感, 可以对盐分含量和含水率取值范围较宽的盐碱土进行土壤含盐量的进行估算, 因而该 ND 指数具有较广的应用前景。

(2) 在对几种高光谱指数的比较中发现, 这些不同的指数所选出的最佳波段取值范围均处于近红外和短波红外波段, 表明该波段区域对土壤的盐分参数较为敏感, 这与前人的研究结果基本一致。而且使用两个以上的波段组合比单个波段更能有效地估算盐分参数。

(3) 本研究区域的土壤是含单一硫酸钠盐分的土壤,因此本研究所得出的 ND 指数只适用于该类型的盐碱土。该指数是否能运用于其它类型的盐碱土还有待验证。今后的研究要通过对不同类型的盐碱土进行广泛检验,以期建立一种具有普适性的估算土壤含盐量的高光谱指数。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Howari F M. Comparison of spectral matching algorithms for identifying natural salt crusts[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2003, 70(5):782-787.
- [2] Howari F M. The use of remote sensing data to extract information from agricultural land with emphasis on soil salinity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(7):1243-1253.
- [3] Howari F M. Chemical and environmental implications of visible and near-infrared spectral features of salt crusts formed from different brines [J]. *Annali di Chimica*, 2004, 94(4):315-323.
- [4] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectroscopy for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, 228(4707):1147-1153.
- [5] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000:115.
- [6] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3):406-418.
- [7] Ben-Dor R, Patkin A, Banin A, et al. Mapping of several soil properties using dais-7915 hyperspectral scanner data: A case study over clayey soils in Israel[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(6):1043-1062.
- [8] Farifteh J, van der Meer, Atzberger C, et al. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods(PLSR and ANN) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 7(2):1-20.
- [9] 刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2):138-142.
- [10] Weng Yongling, Gong Peng, Zhu Zhiliang. Reflectance spectroscopy for the assessment of soil salt content in soils of the Yellow River delta of China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(10):5511-5531.
- [11] 屈永华, 段小亮, 高鸿永, 等. 内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5):1362-1366.
- [12] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Noland T L, et al. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7):1491-1507.
- [13] Kochubey S M, Kazantsev T A. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(12):1648-1655.
- [14] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data Part I: Theoretical approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2):188-197.
- [15] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76(2):156-172.
- [16] Stylinski C D, Gamon J A, Oechel W C. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species [J]. *Oecologia*, 2002, 131(3):366-374.
- [17] Weng Yongling, Gong Peng, Zhu Zhiliang. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River delta region of China using EO-1 Hyperion data[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3):378-388.
- [18] Zhang Tingting, Zeng Shenglan, Gao Yu, et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(3):1552-1562.