

区域生态环境变化的遥感评价指数

徐涵秋^{1,2*} (1.福州大学环境与资源学院,福建 福州 350108; 2.福州大学遥感信息工程研究所,福建 福州 350108)

摘要: 基于遥感信息技术提出一个新型的遥感生态指数(RSEI),以快速监测与评价区域生态质量.该指数耦合了植被指数、湿度分量、地表温度和土壤指数等 4 个评价指标,分别代表了绿色度、湿度、热度和干度等 4 大生态要素.与常用的多指标加权集成法不同的是,本研究提出用主成分变换来集成各个指标,各指标对 RSEI 的影响是根据其数据本身的性质来决定,而不是由人为的加权来决定.因此,指标的集成更为客观合理.将 RSEI 应用于福建长汀水土流失区,并与国家环境保护部《生态环境状况评价技术规范》中的生态指数 EI 的计算结果相比较,发现二者的结果具有可比性.不同的是,RSEI 不仅可以作为一个量化指标,而且还可以对区域生态环境变化进行可视化、时空分析、建模和预测.因此,可弥补 EI 指数在这些方面的不足.

关键词: 生态; 遥感; RSEI 指数; 评价; 主成分分析; 长汀县

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)05-0889-09

A remote sensing index for assessment of regional ecological changes. XU Han-qiu^{1,2*} (1.College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2.Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China). *China Environmental Science*, 2013,33(5): 889~897

Abstract: A remote sensing based ecological index (RSEI) was developed specially for monitoring and assessing regional ecological changes. The index combined four indicators from existing remote-sensing indices/components to represent greenness, dryness, wetness and heat, which were the important ecological indicators frequently used in assessing regional ecology. Instead of a weighted addition of the four indicators, the principal component analysis (PCA) was utilized to compress the four indicators into one in order to assess overall regional ecological status. The RSEI was then constructed using the first component (PC1). The application of RSEI in Hetian area of County Changting in Fujian Province, China, showed that the RSEI could quantitatively reveal regional ecological changes during the period from 1988 to 2010. The RSEI values could be well compared with the commonly-used ecological index (EI). Nevertheless, besides working as a quantitative indicator, the RSEI had more functions than the EI, such as detecting, simulating and predicting spatiotemporal changes of regional ecological quality.

Key words: ecology; remote sensing; RSEI; assessment; principal component analysis; County Changting

当前,卫星遥感对地观测系统以其宏观、快速、实时的优点在生态环境领域得到广泛的应用.利用各种遥感指数来对森林^[1]、草地^[2]、城市^[3-4]、河流^[5]乃至整个流域^[6]的生态系统进行监测和评价,已经是生态环境保护领域的重要组成部分.2006 年,国家环境保护部以行业标准的形式颁发了《生态环境状况评价技术规范》^[7](以下简称规范),推出了主要基于遥感技术的生态环境状况指数 EI,旨在对我国县级以上生态环境提供一种年度综合评价标准.《规范》试行以来,已在国内得到广泛的应用,有的用于省级生态环境评价^[8-10],有的用于县级评价^[11-12],有的则用于工

程项目评价^[13-14].但《规范》试行中也发现了不少问题,如权重的合理性^[11-12,15]、归一化系数的设定^[10,15-16]、指标的易获取性等.还有一个明显的不足就是《规范》所获得的 EI 指数只是一个数值,只能笼统地说明一个地区的生态状况,无法可视化,无法说明该区中不同生态环境状况的空间分布情况,无法对不同期间的生态环境进行空间变化分析.而这些问题对于生态环境指数这

收稿日期: 2012-09-22

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT0960);国家科技支撑项目(2013BAC08B01);福建省自然科学基金项目(2011J01269)

* 责任作者, 教授, hxu@fzu.edu.cn

样一个和空间地理位置紧密联系的指标来说,又显得极为重要.因此,本文提出一个完全基于遥感技术、指标容易获得、没有人为权重设定、且结果能被可视化的遥感生态指数,以期作为EI的辅助指标来快速、定量、客观地评价区域生态环境.

1 基本原理与方法

1.1 实验区

福建西部的长汀县是中国南方红壤地区的典型水土流失区,其河田镇一带的水土流失之严重更是一直为各界所瞩目.近 20 多年,该区的水

土流失治理已取得很大的成效.因此,本研究选择该区进行水土流失治理期间生态状况的变化分析,检验新生态指数的有效性.所选的时间段为治理初期的 1988 年和最近的 2010 年.

长汀县属亚热带季风气候,年平均气温 18.3℃,年降雨量 1500~1700mm.长汀县呈四周隆起,中部下凹的盆地特征.从 1988 年的卫星影像可以直观看出(图 1),当时该县大部分为绿被所覆盖,但中部为白中泛红的裸土区,该区即为闻名的长汀河田水土流失区,也被称之为河田盆地.因此,本次研究将河田盆地及其周边地区作为实验区,面积约 775km²(图 1).

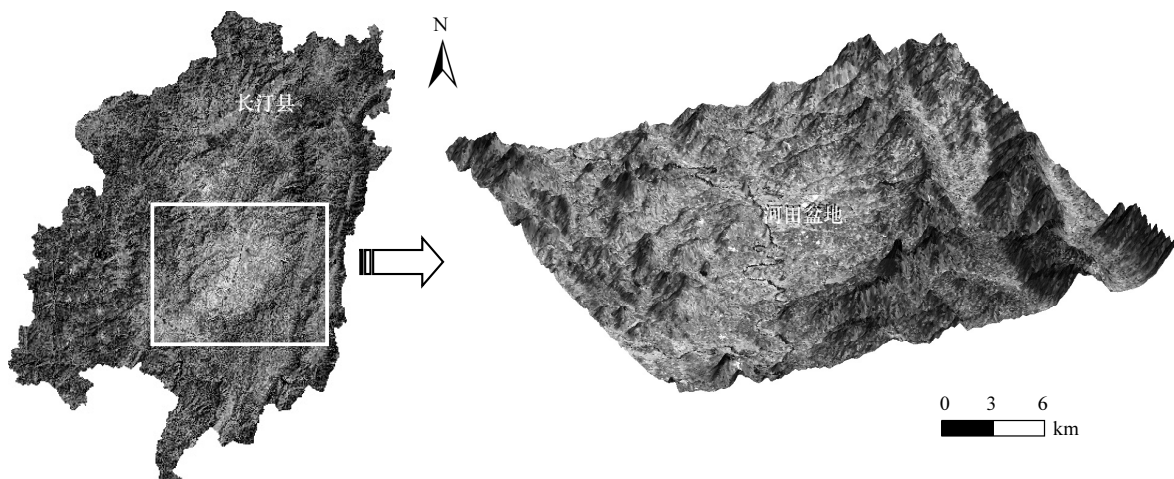


图 1 河田盆地区位置及其三维地貌特征 (RGB:741)

Fig.1 Location of the study area and 3D-perspective of the Hetian Basin (RGB:741)

1.2 遥感生态指数的构建

《规范》一共选择了 5 个评价指数,即:生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地退化和环境质量,并通过加权求和构成了生态环境状况指数(EI),即:

$$\begin{aligned} EI = & 0.25 \times \text{生物丰度指数} + 0.2 \times \text{植被覆盖指数} + \\ & 0.2 \times \text{水网密度指数} + 0.2 \times \text{土地退化指数} + \\ & 0.15 \times \text{环境质量指数} \end{aligned} \quad (1)$$

EI 的前 3 个指数可以通过遥感数据获得,土地退化指数可以通过遥感数据和地面监测数据获得,但其依据的土壤侵蚀模数计算复杂,而环境质量指数则必须通过年度统计数据获得.由于后两个指标较难获取,从而限制了 EI 指数的推广使

用.而最后一个环境质量指标又主要依赖于县级以上的环境年报,使得 EI 只能用于县域以上地区,且每年只能做 1 次,而实时、乡镇乃至更小范围的评价明显受到限制.

本文提出以自然生态环境的 4 个重要指标作为拟建生态指数的评价指标,即绿度、湿度、热度、干度.在反映生态质量的诸多自然因素中,这 4 个因素可谓与人类的生存息息相关,也是人类直观感觉生态条件优劣的最重要指标,因此常被用于评价生态系统^[17-20].就遥感技术而言,它可以从遥感影像中获得这 4 个指标的信息,如采用植被指数、裸土指数、湿度分量、地表温度就可以分别代表绿度、干度、湿度和热度.这样,拟建

的遥感生态指数(RSEI)就可以表示为这 4 个指标的函数,即:

$$RSEI = f(\text{Greenness}, \text{Wetness}, \text{Heat}, \text{Dryness}) \quad (2)$$

其遥感定义为:

$$RSEI = f(\text{VI}, \text{Wet}, \text{LST}, \text{SI}) \quad (3)$$

式中:Greenness 为绿度;Wetness 为湿度;Thermal 为热度;Dryness 为干度;VI 为植被指数;Wet 为湿度分量;LST 为地表温度;SI 为裸土指数。

在 RSEI 指数中,代表绿度的植被指数指标与《规范》中的植被覆盖指标含义相近,与其生物丰度指标也高度相关,因为《规范》中的生物丰度、植被覆盖这两个指标的计算依据是相同的,只是权重略有不同;代表湿度的指标与《规范》中水网指数指标相同,但湿度指标除了能代表开放水体外,还可以代表与生态环境高度相关的土壤和植被的湿度;代表干度的裸土指数指标则与《规范》中的土地退化指标紧密相关,裸土指数越高,地表越裸露,土地退化越严重。因此,新建 RSEI 中的 3 个指标与《规范》中的 4 个指标密切相关。由于《规范》中的环境质量指数依靠的是年报数据而不是空间数据,且在《规范》中被赋予的权重最小,在《规范的》生态分级特征描述中也没有用到该指标,所以如果暂不考虑该指标,则拟建的 RSEI 指数和《规范》中的生态环境指数 EI 就有较强的可比性。

1.2.1 指标的构建 (1)湿度指标(Wet):遥感缨帽变换所获得的亮度、绿度、湿度分量已被广泛地应用在生态环境监测中^[21-23]。其中的湿度分量反映了水体和土壤、植被的湿度,与生态密切相关,因此,本研究的湿度指标以这一湿度分量为代表。对于 Landsat TM 影像,其公式为^[21]:

$$\text{Wet} = 0.0315 \rho_1 + 0.2021 \rho_2 + 0.3102 \rho_3 + 0.1594 \rho_4 - 0.6806 \rho_5 - 0.6109 \rho_7 \quad (4)$$

式中: ρ_i ($i = 1, \dots, 5, 7$) 为 TM 各波段的反射率。

(2)绿度指标(NDVI):归一化植被指数 NDVI 无疑是应用最广泛的植被指数,它与植物生物量、叶面积指数以及植被覆盖度都密切相关^[24]。因此,选用 NDVI 来代表绿度指标:

$$\text{NDVI} = (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + \rho_3) \quad (5)$$

(3)热度指标(LST):热度指标由地表温度来

代表,它采用 Landsat 用户手册的模型^[25]和 Chander 等最新修订的参数^[26]来计算:

$$L_6 = \text{gain} \times DN + \text{bias} \quad (6)$$

$$T = K2 / \ln(K1 / L_6 + 1) \quad (7)$$

式中: L_6 为 TM 热红外 6 波段在传感器处的辐射值; T 为传感器处温度值; DN 为灰度值; gain 和 bias 为 6 波段的增益与偏置值; $K1$ 和 $K2$ 为定标参数,它们都可以从用户手册^[25]获得。

经过式(7)计算的温度 T 可以通过比辐射率纠正转换为地表温度 LST^[18]:

$$\text{LST} = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] \quad (8)$$

式中: λ 为 TM 6 波段的中心波长(11.5 μm); $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$; ε 为比辐射率,其取值见^[18]。

(4)干度指标(NDSI):干度指标选用的是裸土指数 SI^[27]。但在区域环境中,还有相当一部分的建筑用地,它们同样造成地表的“干化”,因此干度指标可由二者合成,即由裸土指数 SI 和建筑指数 IBI^[28] 合成:

$$\text{NDSI} = (\text{SI} + \text{IBI}) / 2 \quad (9)$$

其中:

$$\text{SI} = [(\rho_5 + \rho_3) - (\rho_4 + \rho_1)] / [(\rho_5 + \rho_3) + (\rho_4 + \rho_1)] \quad (10)$$

$$\text{IBI} = \{2\rho_5 / (\rho_5 + \rho_4) - [(\rho_4 / (\rho_4 + \rho_3) + \rho_2 / (\rho_2 + \rho_5))]\} / \{2\rho_5 / (\rho_5 + \rho_4) + [(\rho_4 / (\rho_4 + \rho_3) + \rho_2 / (\rho_2 + \rho_5))]\} \quad (11)$$

1.2.2 综合指数的构建 拟建的生态指数应既能以单一指标的形式出现,又可以综合以上 4 个指标的信息。因此如何以单一变量来耦合以上多个变量,是本研究的关键。当前常用的方法是将各个指标加权求和^[7,11-12,17,29-30],如《规范》中的 EI (式 1)。但是,指标之间权重的人为确定及其合理性,往往会影响这种方法的结果。而且当两个或两个以上的指标共同对生态变化起作用时,要确定究竟是哪个指标对生态系统的全局变化起主要作用,并为其赋一个特定的权重值是十分困难的。因此,即便是《规范》统一规定的权重值[式(1)],在应用中也往往是因人而异^[11-12]。

多元统计方法中的主成份分析(PCA)是一种将多个变量通过正交线性变换来选出少数重要变量的多维数据压缩技术。因此,本研究采用

主成分变换来进行指标集成.其最大优点就是集成各指标的权重不是人为确定,而是根据数据本身的性质、根据各个指标对各主分量的贡献度来自动客观地确定,从而在计算时可以避免因人而异、因方法而异的权重设定造成的结果偏差.

由表 1 可以看出,河田实验区 4 个指标的第一主成分(PC1)具有以下特征: (1) PC1 的贡献率都大于 85%,表明它已集中了 4 个指标的大部分特征; (2) 4 个指标对 PC1 中都有一定的贡献度,且相对稳定,不会像在其他特征分量中(PC2~PC4)出现忽大忽小的现象,从而丢失某些指标; (3) 在 PC1 中,代表绿度的 NDVI 和代表湿度的 Wet 呈正值,说明它们共同对生态起正面的贡献;而代表热度和干度的 LST、NDSI 在 PC1 中呈负值,说明它们协同对生态起负面的影响,这与实际情况相符.而在 PC2~PC4 中,这些指标忽正忽负,难以解释生态现象.可见,较之于其他分量,PC1 最大限度地集中了各指标的特征,能够合理地对生态现象进行解释,因此可用于创建综合生态指数.

表 1 指标主成分分析					
Table 1 Principal component analysis of four factors					
年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
1988	Wet	0.363	-0.270	-0.752	0.479
	NDVI	0.681	0.491	0.392	0.377
	NDSI	-0.541	-0.075	0.271	0.793
	LST	-0.335	0.825	-0.455	0.005
	特征值	0.084	0.006	0.004	0
	特征值贡献率(%)	89.36	6.38	4.26	0
2010	Wet	0.297	-0.151	-0.480	0.841
	NDVI	0.723	0.449	0.490	0.190
	NDSI	-0.581	0.025	0.638	0.505
	LST	-0.318	0.880	-0.350	0.033
	特征值	0.056	0.005	0.003	0
	特征值贡献率(%)	87.50	7.81	4.69	0

必须注意的是,由于式(4)~式(9)计算出的 4 个指标的量纲不统一,因此,在做主成分变换前,必须先对这些指标进行正规化,将它们的数值映射到[0,1]区间,转化成无量纲,然后再计算 PCA (表 1).各指标的正规化公式为:

$$NI_i=(Indicator_i-Indicator_{min})/$$
$$(Indicator_{max}-Indicator_{min}) \tag{12}$$

式中: NI_i 为正规化后的某一指标值; $Indicator_i$ 为该指标在象元 i 的值; $Indicator_{max}$ 为该指标的最大值; $Indicator_{min}$ 为该指标的最小值.

经过正规化后的 4 个指标就可以用来计算主成分.为使 PC1 大的数值代表好的生态条件,可进一步用 1 减去计算出的 PC1,获得初始的生态指数 $RSEI_0$:

$$RSEI_0=1-\{PC1[f(NDVI,Wet,LST,NDSI)]\} \tag{13}$$

为了便于指标的度量和比较,可同样对 $RSEI_0$ 进行正规化:

$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{0_min})/(RSEI_{0_max}-RSEI_{0_min}) \tag{14}$$

$RSEI$ 即为所建的遥感生态指数,其值介于 [0,1]之间. $RSEI$ 值越接近 1,生态越好.

根据 PC1 建立的 $RSEI$ 的综合代表性还可以从它和各指标之间的相关度来分析. $RSEI$ 与各指标的相关度越强,就越能综合代表各个指标.表 2 是各指标和 $RSEI$ 的相关系数以及各指标自身之间的相关系数.就单指标而言,各指标相互之间平均相关度最高的为 NDSI,在 1988 年达到 0.866,两年平均为 0.848.而新指数与这 4 个指标的各年平均相关系数都大于 0.88,两年平均为 0.897,比单指标最高的 NDSI 的均值高出了 5.8%,比最低的 LST 的均值高出了 29.3%,比 4 个指标的平均值(0.775),高出了 15.7%.显然,新指数与各指标之间更高的相关度说明了它比任一单指标更具代表性,更能综合代表各指标的信息.

1.3 影像处理

遥感数据统一选用 Landsat TM 影像,获取时间为 1988 年 10 月 16 日和 2010 年 10 月 29 日(图 2).

首先对 3 幅影像进行辐射、几何校正和配准.辐射校正采用 Chander 等^[26]和 Chavez^[31]的模型与参数将影像的灰度值(DN)转换为传感器处反射率;不同时相影像之间的配准采用二次多项式和最邻近象元法,配准的均方根误差小于 0.5 个象元.在此基础上,分别求出各时相影像的 4 个指标,然后对它们进行正规化,计算

PC1,最后获得各时相的遥感生态指数 RSEI 影 像(图 2).

表 2 各指标和 RSEI 指数的相关系数矩阵
Table 2 Correlation matrix of RSEI and four factors

指标	1988 年					2010 年				
	Wet	NDVI	NDSI	LST	RSEI	Wet	NDVI	NDSI	LST	RSEI
Wet	1	0.780	-0.906	-0.712	0.889	1	0.703	-0.896	-0.651	0.824
NDVI	0.780	1	-0.949	-0.703	0.972	0.703	1	-0.899	-0.658	0.972
NDSI	-0.906	-0.949	1	0.743	-0.987	-0.896	-0.899	1	0.696	-0.967
LST	-0.712	-0.703	0.743	1	-0.802	-0.651	-0.658	0.696	1	-0.761
平均相关度*	0.799	0.811	0.866	0.719	0.913	0.750	0.753	0.830	0.668	0.881
两年平均值	Wet = 0.775, NDVI = 0.782, NDSI = 0.848, LST = 0.693, RSEI = 0.897									

注: *平均相关度是以某一指标与其他指标相关系数的绝对值来计算,以1988年Wet为例: $Mean_{wet_{1988}} = [|0.780| + |-0.906| + |-0.712|]/3 = 0.799$

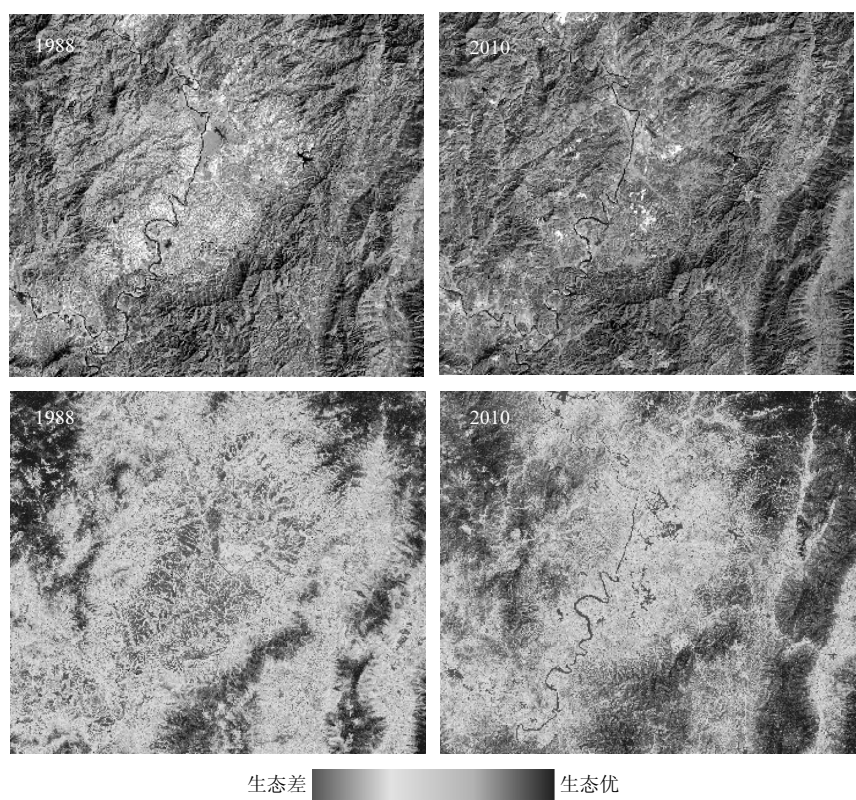


图 2 河田盆地区遥感影像(上) (RGB: 543)和 RSEI 遥感生态指数影像(下)
Fig.2 Images of the Hetian basinal area (upper) (RGB: 543) and the corresponding RSEI images (lower)

计算 RSEI 指数时要注意:(1)要做大气校正, 2 结果与讨论
因为植被指数对大气很敏感;(2)要将影像的 DN 值转换为反射率,不提倡用原始 DN 值来计算;(3) 2.1 RSEI 和 EI 指数的对比
计算湿度时,要选对公式,不能用基于 DN 值的公式来计算基于反射率的数据,反之亦同.

为了将新建的 RSEI 指数与《规范》的 EI 指数对比,分别按《规范》的要求对实验区进行

水网密度计算、基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀度计算,以及基于分层分类法的土地利用分类.然后严格按照《规范》中的权重和中国环境监测总站制定的县级归一化系数分别计算出生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地退化指数,以及由它们合成的 EI 指数(表 3).

表 3 河田实验区土地利用分类、水网密度和土壤侵蚀等级统计数据 (km²)

Table 3 Land use class, water network density and soil erosion grade in the Hetian area (km ²)			
项目	类别	1988 年	2010 年
土地利用分类	阔叶林	228.68	230.27
	针叶林	288.18	328.71
	竹林	9.25	9.87
	草地	35.04	33.79
	水田	70.10	78.92
	建筑用地	5.72	18.58
	河流	5.57	4.50
	湖泊	0.55	0.50
	沙地	2.20	2.07
	裸土	130.11	68.19
	合计	775.40	775.40
水网密度	河流长度	177.71	175.90
	湖泊面积	0.55	0.53
土壤侵蚀强度	轻度	559.32	689.55
	中度	85.00	47.16
	重度	131.08	38.69
生物丰度指数		53.99	56.81
植被覆盖指数		55.73	58.87
水网密度指数		19.76	19.23
土地退化指数		26.60	13.84

将表 3 计算出的各指标指数值代入式(1),获得各年的 EI 指数值(表 4).由于 EI 的值介于 [0,100],而 RSEI 为[0,1],为了统一量纲,将 RSEI 乘 100.由于计算 EI 所用的 4 个指标所占的分数只有 85 分,为了和百分制的 RSEI 对比,进一步将 85 分制的 EI 转换为百分制;同理将百分制的 RSEI 转换为 85 分制,以利于与 85 分制的 EI 对比.表 4 是整理后的 EI 和 RSEI 对比表.从中可以看出,二者在 1988 年的数据很接近,无论是 85 分制或百分制的数据,二者相差都小于 1;而 2010 年的差距最大的也只有 3.4(百分制).总的看

来,RSEI 和 EI 具有一定的相似性.所产生的差距可能是 RSEI 指数的热度指标引起的.当前热度这一指标在我国的生态环境监测中并没有引起足够的重视,也不是环境统计年报的指标.但热污染(如城市热岛)同样对人体健康造成很大的危害,因此引入热度作为一项指标还是很有必要的.由于 RSEI 中的这几个指标和 EI 中的相应指标有着较强的可比性,因此 RSEI 虽然多了一个热度指标,但由于其对 PC1 的贡献较小(表 1),所以表 4 中的 EI 和 RSEI 的计算结果还是比较接近的.总之,无论是 EI 或 RSEI 都能反映出河田水土流失区经过生态修复治理后,区域生态环境状况得到改善的事实.比照《规范》中的生态环境状况划分等级,表 4 中 EI 或 RSEI 的数值变化表明该区的生态环境大致从 1988 年的“较差”级转到 2010 年的“一般”级.RSEI 和 EI 的评价结果并没有出现相悖,或出现较大的差距.因此,通过与 EI 对比,可以看出 RSEI 的构建是合理的.

表 4 EI 和 RSEI 的计算结果

Table 4 Computed EI and RSEI

项目	EI		RSEI (均值)	
	1988	2010	1988	2010
85 分制	43.27	47.05	42.68	49.92
100 分制	50.91	55.36	50.21	58.73

2.2 RSEI 的应用

2.2.1 时空变化分析 RSEI 指数除了和 EI 指数一样可以作为刻画区域生态环境状况的一个定量数值指标外,还可用于区域环境时空变化的可视化和量化,用于不同时期生态环境状况的对比.为此,首先将各年份的 RSEI 指数以 0.2 为间隔分成差、较差、中等、良、优 5 个生态等级.统计结果表明(表 5),1988~2010 年间,生态等级为差~中级(1~3 级)所占的面积比例从 66.1%下降到 47.7%,而优良等级(4~5 级)所占的比例则从 33.9%上升到了 52.3%.表明河田盆地区的生态质量得到了较大改善.

遥感变化检测是对比不同年份生态状况时空变化的有效手段.因此,可在以上 5 个分级的基础上,对河田盆地区的生态变化进行差值变化检

测.以绿色代表生态质量上升的地区,以红色代表生态质量下降的地区,而黄色则代表生态质量的不变区(图 3).从变化检测的结果来看(表 6),1988~2010 年间,该区生态条件变差等级下降的面积为 88.44km²,而生态转好的面积则达 371.4km².从空间上看,生态条件变好的地点主要分布在盆地中(图 3 变化图中的绿色图斑).生态变差的主要是一些新增的建设用地和零散分布的火烧迹地(图 3 变化图中的红色图斑),而盆地周边变化不大,以黄色调为主.

表 5 河田盆地区的生态级别面积和比例

Table 5 The area and percentage change of each RSEI level from 1988 to 2010 in the Hetian area

RSEI 级	1988 年		2010 年	
	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)
1: (0~0.2)	50.92	6.57	21.65	2.79
2: (0.2~0.4)	182.53	23.55	102.48	13.22
3: (0.4~0.6)	278.55	35.94	245.40	31.66
4: (0.6~0.8)	245.07	31.62	331.69	42.80
5: (0.8~1.0)	17.93	2.31	73.78	9.52
合 计	775.00	100.00	775.00	100.00

2.2.2 建模与预测 RSEI 还可用于建立生态模型,模拟和预测区域生态变化趋势.为此,首先对各年份的 NDVI、Wet、LST、NDSI、RSEI 专题影像进行采样,然后以 RSEI 为因变量,以

NDVI、Wet、LST、NDSI 为自变量进行逐步回归分析,建立它们的关系模型.采用 5×5 网格贯穿全影像的采样方法,每幅影像采集 28000 个样点.足够多的样点和贯穿全影像的采样方法可以保证回归分析结果的代表性和客观性,避免小样本和局域性抽样所带来的结果不确定性. 以下为获得的回归模型(模型都通过了 1%的显著性检验):

1988 年: $RSEI = 0.231Wet + 0.432NDVI - 0.343NDSI - 0.213LST + 0.452$
($R^2 = 0.973$)

2010 年: $RSEI = 0.201Wet + 0.552NDVI - 0.402NDSI - 0.236LST + 0.354$
($R^2 = 0.988$)

表 6 遥感变化检测 (km²)
Table 6 Change detection (km²)

类别	级差	级面积	类面积
变差	-3	1.57	88.44
	-2	13.39	
	-1	73.48	
不变	0	315.16	315.16
变好	+1	301.29	371.40
	+2	66.60	
	+3	3.48	
	+4	0.03	

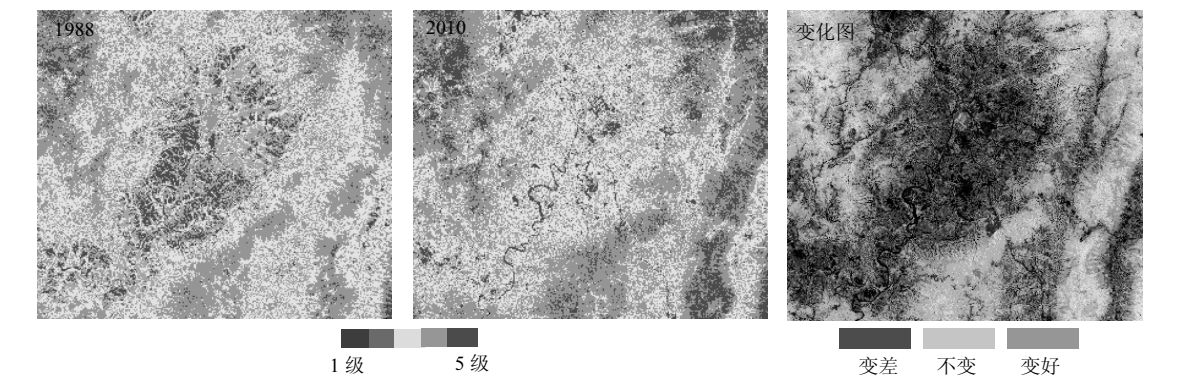


图 3 河田区 1988、2010 年生态分级图 and 变化检测图

Fig.3 5-leveled RSEI images of the Hetian basinal area in 1988 and 2010 and their change detection map

从所获得的模型可以看出,4 个指标在各年份的逐步回归中没有一个被剔除,说明所选的 4 个指标都是生态的关键指标.从各指标回归系数来看,NDVI 和 Wet 的系数为正值,说明对生态起

正面影响,LST 和 NDSI 为负值,说明对生态起负面作用.进一步考察回归系数的变化可以看出,对生态起正面影响的 NDVI 和 Wet 的综合影响力超过了起负面影响的 NDSI 和 LST,因为二者的系数之和要大于起负面影响的 NDSI 和 LST 系数的绝对值之和.

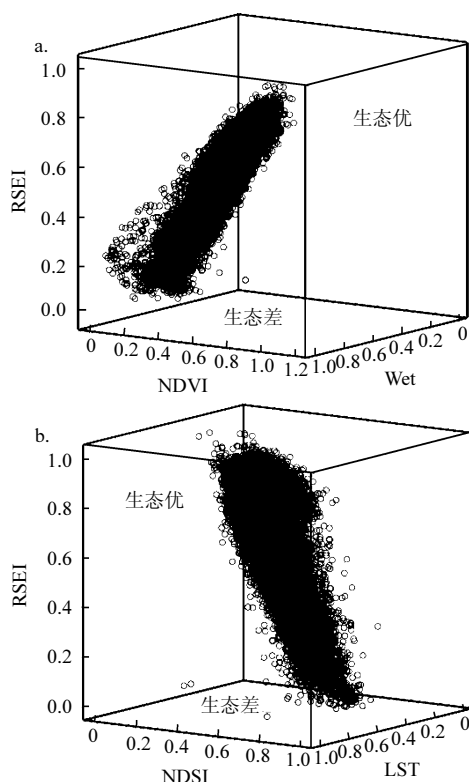


图4 2010年NDVI、Wet与RSEI及NDSI、LST与RSEI的3维投影图

Fig.4 3D-scatterplots of feature space RSEI vs. NDVI and Wet and RSEI vs. LST and NDSI

图4是以最新的2010年为例,从各指标的散点在3维特征空间的分布情况来看它们与RSEI指数的关系.图4a是对生态起正面影响的NDVI、Wet与RSEI的3维投影图;图4b是对生态起负面影响的NDSI、LST与RSEI的投影图.散点群的顶端为代表生态条件好的散点的集聚区,主要为高覆盖植被区;散点群的底端则为生态条件差的散点的集聚区,代表裸土区.从图4b可以看出散点呈上粗下细的楔形,说明随着水土流失的治理,裸土正在逐渐减少.

综合来看,无论是回归模型或主成分分析都表明以NDVI为代表的绿度和以NDSI为代表的干度对生态影响最大,且NDVI影响大于NDSI.这一数据模拟的结果也证明,该区以增加绿被来治理水土流失取得的成效更大.如以最新的2010年模型进行预测,今后该区的生态质量RSEI每提升0.1,其NDVI就要相应提升0.181.但是,在水土流失治理中,绿地的增加和裸地的减少往往是同时进行的,因此实际RSEI的提升效果将不止0.1.假设增加0.181NDVI的同时,减少0.181的NDSI,则实际RSEI的提升将达到0.173.

3 结论

3.1 RSEI指数是基于绿度、湿度、热度和干度指标建立的一个完全基于遥感信息和自然因素的指数,因此可以快速简便地评价区域生态质量.RSEI指数各指标的集成不是人为的加权求和,而是根据各指标对第一主成分的贡献来集成.因此,RSEI能够客观地耦合各个指标,合理地代表区域生态质量.

3.1 RSEI指数与《规范》的EI指数有较强的可比性,二者均客观反映了长汀河盆地水土流失得到治理后,生态状况有了明显改善.但RSEI不仅可以作为一个量化指标来刻画区域生态质量,还可以将区域生态质量可视化,可以对区域生态变化进行时空分析、模拟和预测,可以不受时间和空间限制的使用,因此,可以弥补EI指数在这些方面的不足.

3.3 RSEI不适宜大面积的水域地区使用.研究区中如有大片水域,最好将其掩膜后再应用.由于RSEI的构建需要用到热红外影像,因此RSEI主要适用于中尺度制图.对于小尺度比例尺,最好先对热红外影像进行细化.

参考文献:

- [1] Ochoa-Gaona S, Kampichler C, de Jong B H J, et al. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(5):618-627.
- [2] Sullivan C A, Skeffington M S, Gormally M J, et al. The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature

- value assessment [J]. *Biological Conservation*, 2010,143(6): 1529–1539.
- [3] Xu H Q, Ding F, Wen X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009,2(2):74–79.
- [4] 曾 辉,刘建国. 基于景观结构的区域生态风险分析 [J]. *中国环境科学*, 1999,19(5):454–457.
- [5] Ivits E, Cherlet M, Mehl W, et al. Estimating the ecological status and change of riparian zones in Andalusia assessed by multi-temporal AVHRR datasets [J]. *Ecological Indicators*, 2009,9(3): 422–431.
- [6] Moran M S, Peters-Lidard C D, Watts J M, et al. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(5):805–826.
- [7] 国家环保总局. 中华人民共和国环境保护行业标准(试行) HJ/T192–2006 [S].
- [8] 智颖飙,王再岚,马 中,等. 宁夏资源环境绩效及其变动态势 [J]. *生态学报*, 2009,29(12):6490–6498.
- [9] 王 瑶,宫辉力,李小娟. 基于 GIS 的北京市生态环境质量监测与分析 [J]. *国土资源遥感*, 2008,(1):91–96.
- [10] 刘建红,徐建军,李 诚,等. 基于遥感更新的省级生物丰度归一化系数研究——以湖北省为例 [J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2007,35(4):46–50.
- [11] 孟 岩,赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价——以黄河三角洲垦利县为例 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(2): 163–167.
- [12] 程晋南,赵庚星,李 红,等. 基于 RS 和 GIS 的土地生态环境状况评价及其动态变化 [J]. *农业工程学报*, 2008,24(11):83–88.
- [13] 范建忠,李登科,董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测 [J]. *农业工程学报*, 2012,28(7):228–234.
- [14] 胡明玉,焦开虹,刘胜祥,等. 三峡翻坝运输江南公路沿线生态环境质量现状分析 [J]. *四川环境*, 2007,26(6):40–43,48.
- [15] 叶有华,梁永贤,沈一青,等. 《生态环境状况评价技术规范(试行)》中若干值得商榷的问题 [J]. *热带地理*, 2009,29(4):404–406.
- [16] 张 媛,王靖飞,黄云龙,等. 关于生态环境状况评价指标计算的问题与探讨 [J]. *河北工业科技*, 2008,25(6):363–365.
- [17] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban Neighborhood Green Index—A measure of green spaces in urban areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012,105:325–335.
- [18] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005,71(6):613–621.
- [19] Xu H Q. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface Index (NDISI) [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010,76(5):557–565.
- [20] 赵跃龙,张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究 [J]. *地理科学*, 1998,18(1):73–79.
- [21] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17:301–306.
- [22] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002,23(8):1741–1748.
- [23] Todd S W, Hoffer R M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998,64: 915–921.
- [24] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements—An exploration with the simplified simple biosphere model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,79:225–242.
- [25] NASA. Landsat 7 Science Data Users Handbook [EB/OL]. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>, 2012-09-05.
- [26] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113:893–903.
- [27] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical Ecology*, 2002,43(1):39–47.
- [28] Xu H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(14):4269–4276.
- [29] Reza M I H, Abdullah S A. Regional Index of Ecological Integrity: A need for sustainable management of natural resources [J]. *Ecological Indicators*, 2011,11:220–229.
- [30] Ochoa-Gaona S, Kampichler C, de Jong B H J, et al. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010,260:618–627.
- [31] Chavez P S Jr. Image-based atmospheric corrections—revisited and revised [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996,62(9):1025–1036.

作者简介: 徐涵秋(1955–),男,江苏盐城人,教授,博士,研究方向为环境与资源遥感应用.发表论文 100 余篇.