

基于遥感归一化指数的生态环境破坏和恢复能力的监测与评价

王井利¹, 马畅², 张宁¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 四川农业大学资源学院, 四川 成都 611130)

摘要 目的 研究自然生态环境破坏与恢复能力的监测及评价方法,更清晰、准确地了解城市植被覆盖情况与生态环境受到破坏的程度. 方法 提取湖北省襄樊市遥感影像,对 SPOT 和 TM 卫星遥感数据进行生态因子归一化指数分析,通过对影像数据的正射校正、图像融合、影像配准、大气校正等一系列操作,统计植被覆盖度(NDVI 指数)、土壤指数及坡度环境因子等相关参数,形成生态因子归一化指数,再对归一化后的环境因子进行进一步加权处理,得出生态环境评价结论. 结果 湖北省襄樊市 78% 地区自然生态环境处于良好和一般状态,其中约 21% 区域为优等环境地区,主要分布在森林集中区域及庄稼长势极好的平原;自然生态环境处于一般状态的区域大部分为耕地;评价指标最差的是城市水源地、居民地、城市交通用地,主要为人口分布密集地区,比例约为 13%,其生态系统自身功能和自我恢复能力较弱. 结论 生态因子归一化指数方法,适用于生态环境受到破坏并评价恢复能力的研究.

关键词 生态环境评价;遥感解译;数据融合;综合指数法;生态因子

中图分类号 TU985.2 文献标志码 A

Monitoring and Evaluation of Ecological Environmental Damage and Recovery Capability Based on Remote Sensing Image Normalization Index

WANG Jingli¹, MA Chang², ZHANG Ning¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, China, 611130)

Abstract: Monitoring and evaluation of of destruction and restoration of natural ecological environment are studied to a clearer and more accurate understanding of urban vegetation coverage and the degree of damage to the ecological environment. The remote sensing image of Xiangfan city of Hubei province was extracted, and the ecological factor normalization index of SPOT and TM satellite remote sensing data was analyzed through a series of operations, such as orthophoto correc-

tion, image fusion, image registration, atmospheric correction. Statistical vegetation cover (NDVI index), soil index, slope environmental factors and other related parameters were analyzed too. The normalization index of ecological factors is formed, and the normalized environmental factors are further weighted to obtain the conclusion of ecological environmental assessment. The natural ecological environment in the 78% region of Xiangfan, Hubei Province, is in good and general condition, of which about 21% areas are favorable environment areas, mainly distributed in the forest area and the crops with excellent plains. The area where the natural ecological environment is in the general state is mostly arable land. The area where the evaluation index is worst is urban water source, residential land and urban traffic land, which is mainly a densely populated area with a proportion of about 13%, and its own ecosystem function and self-recovery ability are weak. The conclusion of this paper is ecological factor normalization index method can be applied to the study of the destruction of the ecological environment and the evaluation of recovery capacity.

Key words: ecological environmental assessment; remote sensing interpretation; image fusion; comprehensive index method; ecological factor

中国幅员辽阔,地质环境种类繁多,有相当大的国土面积自然生态条件不满足人类居住的基本要求,其中干旱、半干旱地区占52%,大片天然草原逐渐退化,沙化、盐碱化严重,极度脆弱的自然环境给社会建设与环境保护带来巨大挑战。通过研究区域的影像数据,时时主动掌握生态结构的组成、分布、变化趋势、总结变化规律,并通过植被、土壤、坡度的指标得出生态因子归一化模型,以正确的评价方法得出自然生态环境的客观情况,预测今后的发展趋势及发展走向。近年来,在遥感技术的帮助下,以更高效率的遥感监测技术手段和正确的评价方式来监测生态环境。沈鸿飞^[1]运用区域生态环境状况综合评价的方法对干旱区资源与环境进行研究,然而缺乏相关的评价指标,对研究结果存在着片面性。张淑金^[2]在对大连环境保护与可持续发展战略的几点思考中并未考虑到自然生态破坏性及其修复性等因素。目前,很少有研究者应用自然生态环境归一化模型的方法对自然生态环境的破坏与修复能力进行研究。因此,笔者以湖北省襄樊部分地区为研究对象,通过影像的配准、融合及生态模型的建立,研究自然生态环境破坏与恢复能力的监测及评价方法,更清晰、准确地了解城市植被覆盖情况与生态环境受到破坏的程度。

1 自然生态环境评价流程

襄樊市自然生态环境评价总体流程如图1所示。

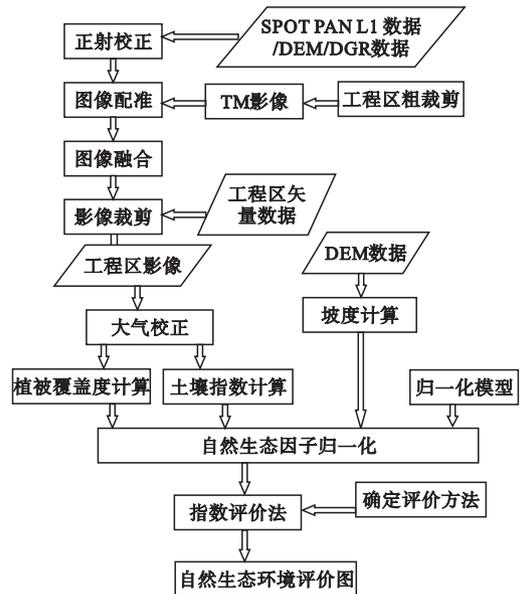


图1 自然生态环境评价流程

Fig. 1 Flow chart of natural ecological environment evaluation

选取湖北省襄樊市部分地区为研究区域,笔者采用30 m分辨率的landsat8影像数据,进行一系列处理,以人机交互方式提取数据,通过ENVI 5.4对SPOT全色数据与TM多光谱数据进行操作及其图像处理,其中包

括影像配准、融合、裁剪、快速大气校正等,得到更为清晰、准确的高分辨率的影像信息.通过预处理后的遥感影像为基础,提取植被覆盖度、土壤指数、坡度指数、地形因子等参考因素进行影像归一化处理和指数叠加,通过评价参数、评价指数和评价等级对湖北省襄樊地区生态环境进行监测与评价.

2 数据预处理

2.1 辐射定标

在传感器记录的有关电压变化值(DN)通过转换得到的有关地表反射率、温度等的相对值,在满足用户不同的要求下,将辐射定标分为绝对和相对两种定标,绝对定标是以各种标准射源为基础,建立数字量化值(DN)与辐射率(绝对辐射亮度)之间的数学函数关系;相对定标是各探测器、各像元、各波段以及不同时相探测的辐射亮度的相对值^[3].进行多光谱波段的辐射定标,用到 ENVI 中 Radiometric Calibration 模块,设置参数:定标类型(Calibration Type);辐射率数 Radiance;储存顺序(Interleave);BIL 或者 BIP;数据类型(Data Type);Float;辐射率数据单位调整系数(Scale Factor),取 0.1.

2.2 SPOT 数据正射校正

结合传感器的姿态参数、地面控制点以及高精度的 DEM 数据进行几何校正,这种方式就是正射校正^[4].笔者采用的是有控制点的正射校正,SPOT 全色图像的正射校正是在 ENVI classic 中完成.由于卫星影像和航空影像中会有一些几何误差,其中大部分是由于一些系统误差造成的,主要包括传感器、比例尺、方位等因素,但通过图像的校正处理,很容易消除这些误差,使处理结果达到更清晰、更准确的要求^[5].在选择控制点的过程中,由于传感器的倾斜角度,不宜选择建筑物的顶点,而应该选择地面上的控制点,当待配准的两幅图像质量不是很好时,手动增加几个“种子点”既可提高自动找点精度^[6].

2.3 几何精校正

得出畸变产生的原因后,对其进行的校正,即通过控制点,运用数学模型表示出图像的几何畸变过程^[7].几何精校正包含空间位置精计算和内插亮度值 2 个步骤:

2.3.1 位置计算

图像点位之间的数学表达式为

$$\begin{cases} x = f_x(x', y') \\ y = f_y(x', y') \end{cases} \quad (1)$$

式中:(x, y)代表原始图像的坐标;(x', y')是原始坐标经过计算后变换的坐标.

则多像元空间位置的数学表达式为

$$\begin{cases} X = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} x^i y^j \\ Y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-1} b_{ij} x^i y^j \end{cases} \quad (2)$$

式中:(X, Y)为图像参考坐标; a_{ij}, b_{ij} 为系数; n 代表次数^[8];(x', y')多像元空间中的变换后坐标.

根据原图像和现有图像中已知坐标系中的坐标通过运用最小二乘法算法,计算改正系数 a_{ij}, b_{ij} ,在进行图像几何精校正后,根据校正过程中选择的地面控制点数量、定位精度、点位分布等方面来确定校正后的精度^[9].

$$R = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \quad (3)$$

$$T_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n [(x_t - x_i)^2 - (y_t - y_i)^2]} \quad (4)$$

式中: R 为一次均方根误差; T_R 为多次叠加均方根误差;(x_i, y_i)为校正前的实际地面坐标值;(x_t, y_t)为计算后坐标值^[10].

2.3.2 辐射亮度值内插

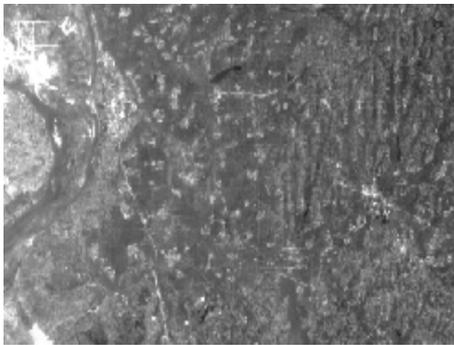
通过对应的(x, y)值,得到部分数据不处于像元中心位置,则要重新计算新位置辐射亮度值.通过 3 次卷积内插法取 16 个点的亮度值,构建连续的内插函数,再计算得到既不会产生线性特征方块化现象,进一步提高精度,改善目视解译效果的平滑图像^[11].

2.4 影像融合

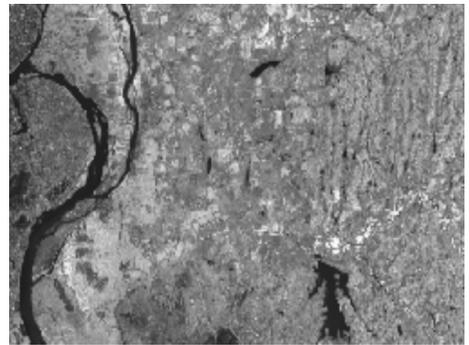
影像中的关键是融合两幅影像的精配

准,笔者采用的成像时间相同,分辨率大小不同,经过正射校正的全色和多光谱图像^[12].当 SPOT 和 TM 两景影像融合时,要现将这两景影像配准,以经过校准后的 SPOT PAN 作为基准,在通过配准 TM 影像,再进行融合全色影像和多光谱影像,得到的影像同时保留了这两景影像的优势,即得到多光谱特征又同时提高了空间分辨率,通过重采样处理后,得到的融合结果中已经没有重影现象^[13].在提高多光谱影像融合效率时,采用 BSQ 转换成 BIP 或者 BIL,大大地提高融合

效率,经过比较可得出融合效率可提高 30%. 所以用 543 的假彩色合成方式,使植被在近红外波段为高反射率,植物颜色更为接近实际绿色. 采用 NNDiffuse Pan Sharpening 融合方法,输入图像支持标准地理和投影坐标系统、具备 RPC 信息和基于像元位置(无空间坐标系)的几种地理信息元数据类型. 该种融合方法对于色彩、纹理和光谱信息,均能得到较好保留^[14-15]. 图 2 为融合前后两幅影像对比图.



(a) 融合前



(b) 融合后

图 2 融合前后两图像对比

Fig. 2 Comparison of before and after fusion images

2.5 快速大气校正

大气校正前后影像同一像元波谱对比如图 3 所示. 图 3(a) 为大气校正前植被光谱曲线, 图 3(b) 为同期大气校正后植被的正确的

光谱曲线. 在可见光与近红外波段之间, 反射率极具上升, 形成“红边现象”^[16-18], 这是植物曲线的最明显特征, 是研究的重点光谱区域.

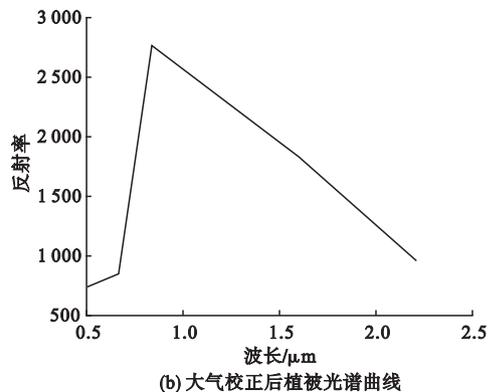
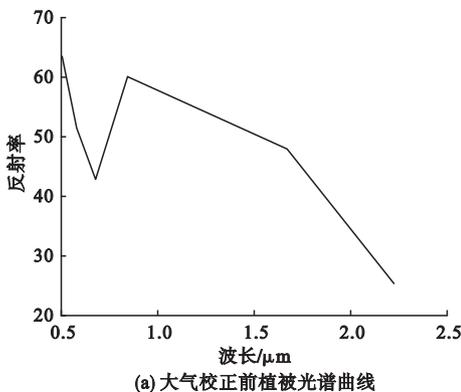


图 3 大气校正前后植被光谱曲线对比

Fig. 3 Comparison of vegetation spectral curves between before and after atmospheric correction

在图像融合之后,为了使图像消除大气和光照因素对地物反射的影响,需要通过快速大气校正操作,通过查看地物的光谱曲线能提取正确的图像信息^[15].因此,大气校正同时获得反演地物真实的反射率.如蓝色波段,主要去除了大气散射的影响.利用 ENVI 中 FLAASH Atmospheric Correction Module Input Parameters 模块,依据大气模型图表选取相应的大气模型,根据影像元数据确定传感器类型和气溶胶模型,影像成像时间等.最后对多光谱参数进行设置^[16].点击 Apply,进行解算,输出成果.以遥感影像大气校正为例,参数设置为:传感器类型为 Landsat - 8 OLI,研究区的经纬度分别为: N32° 04', E112° 05', 飞行时刻为 2016 - 09 - 20T14: 34:48、飞行高度为 705 km.

表 1 NDVI 取值的确定

Table 1 Etermination of NDVI value

NDVI 最小值				NDVI 最大值			
NDVI _{min}	像元值	累积误差	累积比例/%	NDVI _{max}	像元值	累积误差	累积比例/%
-0.588 24	34 776	0.173 865	4.817 217	0.631 373	167 521	0.837 531	94.290 287
-0.050 980	34 152	0.170 745	4.987 962	0.639 216	152 266	19 011 997	95.051 549
-0.043 137	34 865	0.174 310	5.162 272	0.647 059	91 496	19 103 493	95.508 989

表 1 中的第二行即为置信度区间,即累积为 5% 左右.将该行的 0.639 216 和 -0.050 980 分别取小数点后两位,得到 $NDVI_{max} = 0.64$, $NDVI_{min} = -0.05$.将 $NDVI_{min}$ 、 $NDVI_{max}$ 代入式(5)中,得到归一化植被指数,该指数可以判断各种作物的生长期和覆盖度,更好的分离生长在水中和土中的植被.

(2) 验证方法:植被覆盖度的验证一般通过野外验证的方法来获取.

(3) 植被覆盖度模型的建立:根据得到的 $NDVI$,及其最大值、最小值,通用 ENVI 5.4 语言来表示植被覆盖度模型.

$$(b1lt - 0.05) \times 0 + (b1gt 0.64) \times 1 + (b1ge - 0.05 \text{ and } b1le 0.64) \times ((b1 + 0.05)/(0.64 + 0.05)). \quad (6)$$

式中:b1 代表 $NDVI$ 值;lt、gt、ge、le 分别代表小于、大于、大于等于、小于等于.

3 生态因子生成

3.1 植物覆盖度生成

(1) 生成方法:植被覆盖度通过 $NDVI$ 估算模型为

$$FC = NDVI - NDVI_{min} / NDVI_{max} - NDVI_{min}. \quad (5)$$

式中: $NDVI$ 为归一化植被指数; $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为区域最大值和最小值,正常的植被覆盖度的取值范围在 $[0, 1]$ 之间,即为置信度区间,然而由于图像中不可避免地存在一些噪声、异常值,这是由于在置信度之外的像元产生的,在 $[0, 1]$ 之外,即为无效值.在 ENVI 5.4 统计工具中,选择 5% 的累积百分比为置信度区间,读取相应的像元值,对 5% 以外的部分予以去除,并确定有效的最大值和最小值(见表 1).

其模型的表达式的意义为选取置信度区间的像元值去除不符合条件的像元值.

(4) 植被覆盖度模型的输出:通过植被覆盖度模型的建立,将植被的覆盖率按照等级划分为 10 级(见表 2).经过划分,对植被的长势、分布等情况都达到了清晰的认识.该植被覆盖度为单波段黑白影像(见图 4),其范围值为最小值为 0,最大值为 1,当值越大时,说明该像元的植被含量越高,其相应的生态环境越好.

表 2 植被覆盖度分级

Table 2 Scale of vegetation coverage rating

编码值	覆盖率/%	编码值	覆盖率/%
1	0 ~ 10	6	50 ~ 60
2	10 ~ 20	7	60 ~ 70
3	20 ~ 30	8	70 ~ 80
4	30 ~ 40	9	80 ~ 90
5	40 ~ 50	10	90 ~ 100

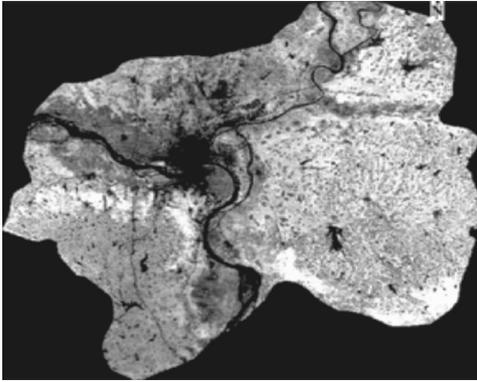


图4 植被覆盖度图像

Fig. 4 Image of Vegetation coverage

3.2 土壤指数生成

在 TM 影像中,一种常用的图像变换方法为穗帽变换,其所包含的矩阵的特点是将所绘制的图像形状像帽子一样,以绿度、亮度、湿度 3 个边来描述裸土的指数信息.把植被的生长状况和生态因子根据一定的形式组合,得到有关土壤生态指数:

$$GRABS = VI - 0.09178BI + 5.58959. \quad (7)$$

式中:BI 指数是评价裸土指标;VI 指数用来评价植被的行为,VI 指数与不同类别植被的覆盖有较大的相关性.

将 BI 和 VI 指数线性组合,即形成该地区的裸土植被指数,其结果准确反映土壤的裸露情况,亮度指标主要表现裸土信息的变化,包括植物变黄、枯萎情况、大气散射物理影响、土地信息变化及其他景物的变化程度等.将裸土指数值分为 10 级,当表中的编码值越大时,表明其质量越好(见表 3).

表3 土壤指数分级

Table 3 Soil index classification

编码值	指数值	编码值	指数值
1	-5 300 ~ -1 021	6	-111 ~ 26
2	-1 021 ~ -718	7	26 ~ 163
3	-718 ~ -470	8	163 ~ 301
4	-470 ~ -277	9	301 ~ 494
5	-277 ~ -111	10	494 ~ 1 800

3.3 坡度指数生成

地形的起伏变化、坡度、坡向等因素通过

光、水、气候等影响着自然生态的好坏,其中坡度对水土流失影响最大.一般情况下,坡度影像数据中的坡度信息,在坡度越低的情况下,土地资源更能充分地利用同时能更多的减少灾害的发生.对坡度指数进行处理:将坡度从高到低赋予 1~10 等级.在确定好归一化对照表后,用 ENVI 下的密度分割工具做归一化处理,在分割面板上分别输入每个区间的最大值和最小值,笔者添加 10 个等级,按照从 1 到 10 的编码顺序输入,在图层管理中即可得到按数值分割成的坡度密度分割结果,不同的编码对应着研究区的坡度值(见表 4).

表4 坡度因子分级

Table 4 Slope factor classification

编码值	坡度值/(°)	编码值	坡度值/(°)
10	<3	5	23 ~ 28
9	3 ~ 8	4	28 ~ 33
8	8 ~ 3	3	33 ~ 38
7	13 ~ 8	2	38 ~ 43
6	18 ~ 3	1	>43

3.4 生态环境评价

采用生态环境评价模型的指数法与综合指数法来进行生态环境评价^[19],这是关于生态环境质量评价研究中的新方法和新技术,将定性分析与定量分析有机结合,既能从整体评价的基础上分层次、分等级更综合的对生态环境的优劣程度进行研究.评价模型为

$$E = W_1 \times S_v + W_2 \times S_s + W_3 \times S_t. \quad (8)$$

式中:E 为自然生态环境的综合指数;使用权重为 $W_1 = 0.7$, $W_2 = 0.2$, $W_3 = 0.1$,考虑到每个因子贡献量估算的权重. S_v 为植被覆盖度归一化 S_s 为土壤指数归一化 S_t 为坡度归一化.

通过掩膜文件对环境评价结果进行掩膜后,将背景值变为 0^[20].采用密度分割法把环境分 4 个等级(见表 5).

笔者通过对 SPOT 和 TM 卫星遥感数据进行预处理,将植被覆盖度、土壤指数及坡度

指数的归一化分析后,采用生态环境评价模型对湖北省襄樊地区的生态环境破坏与恢复

能力监测与评价(见图5)。

表5 生态环境评价分级

Table 5 Ecological environment assessment hierarchy

评价等级	综合评价指数	综合评价说明
优	9~10	自然生态环境未受到破坏,生态结构合理、稳定,生态系统自身功能和自我恢复能力很强
良	6~9	自然生态环境基本未受到破坏,生态结构合理、稳定,生态系统自身功能和自我恢复能力较强
中	4~6	自然生态环境基本受到破坏,生态结构合理、稳定,生态系统自身功能和自我恢复能力较弱
差	1~4	自然生态环境基本受到严重破坏,生态结构合理、稳定,生态系统自身功能和自我恢复能力很弱

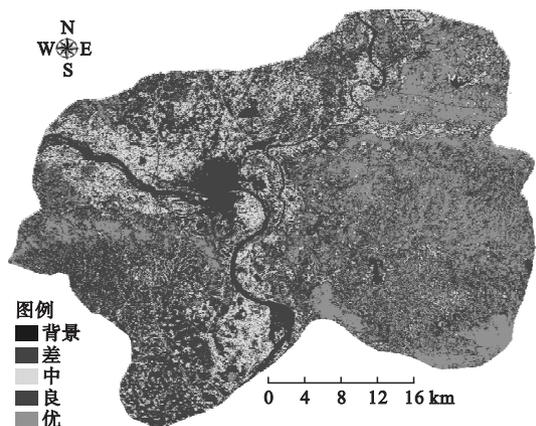


图5 生态环境评价结果

Fig. 5 Result of ecological environment evaluation

评价指数在中、良、优3个等级的占大多数,约78%占。在图5中显示为深绿色区域,说明湖北省襄樊市的自然生态环境总的看来还是属于良好和一般状态。林地所在区域为环境质量最好值,其次是耕地,最差环境质量是城市。湖北省襄樊市约21%综合评价指数处于优秀。图5中浅绿区域,大部分集中在平原且耕地作物长势较好以及森林腹地^[20],该地的生态系统自身功能和自我恢复能力较强,其植被覆盖度高,生物种类丰富,生态系统稳定,尤为适宜人类居住。约13%综合评价指数很差,见图5中红色区域,生态系统自身功能和自我恢复能力较弱,在这部分中水域部分占了大部分,其余主要集中在居民地、交通用地区域,该地区植被覆盖度小,物种较少,生态环境恶劣,并不适合人类居住。

4 结论

(1) 归一化植被指数的方法能反映地表、土壤亮度、环境影响、土壤湿度、等复杂混合反应的综合状况,准确地反映出生态环境的优、良等级情况。

(2) 通过植物覆盖度、土壤指数、坡度指数和生态环境评价方法的综合应用,使自然生态环境破坏和恢复能力的监测与评价结果达到了较高的准确性。

(3) TM影像和SPOT影像的NND影像融合技术及快速大气校正方法,更能体现出地物纹理信息、植被分布状况及长势状况,大大提高了精度,为生态系统自身功能和自我恢复能力的研究和监测提供了准确的依据。

参考文献

- [1] 沈鸿飞,张军,邱慧珍,等. 区域生态环境状况综合评价:以甘肃省庆阳市为例[J]. 干旱区资源与环境,2011(6):55-56.
(SHEN Hongfei, ZHANG Jun, QIU Huizhen, et al. Comprehensive evaluation of regional ecological environment: Taking Qingyang city of Gansu Province as an example[J]. Journal of arid land resources and environment, 2011(6): 55-56.)
- [2] 张淑金,孙家琪. 大连环境保护与可持续发展战略的几点思考[J]. 大连海事大学学报(社会科学版),2007(1):48-51.
(ZHANG Shujin, SUN Jiaqi. Reflections on the strategy of environmental protection and sustainable development in Dalian[J]. Journal of dalian maritime university (social science edition), 2007(1):48-51.)
- [3] 张俊,王宝山,吕宝庆. 面向对象高分辨率影像信息提取中的尺度效应研究[J]. 北京测

- 绘,2010(1):11-14.
(ZHANG Jun, WANG Baoshan, Lü Baoqing. Scale effect in object oriented high resolution image information extraction [J]. Beijing surveying and mapping, 2010(1):11-14.)
- [4] 陈思宁,赵艳霞,申双和. 基于波谱分析技术的遥感作物分类方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):154-160
(CHEN Sining, ZHAO Yanxia, SHEN Shuanghe. Remote sensing crop classification method based on spectral analysis technology [J]. Acta agronomica sinica, 2012, 28(5):154-160.)
- [5] 闫妍,朱教君,闫巧玲,等. 基于遥感和GIS方法的科尔沁沙地边界划定[J]. 地理科学, 2014, 34(1):122-123.
(YAN Yan, ZHU Jiao Jun, YAN Qiaoling, et al. Based on remote sensing and GIS method, the boundary delineation of the Horqin sandy land [J]. Geography science, 2014, 34(1):122-123.)
- [6] 卢远方,韩建征,杨书啟. 遥感技术在农业领域的应用研究[J]. 技术与市场, 2016(6):30-36.
(LU Yuanfang, HAN Jianzheng, YANG Shuqi. Application research of remote sensing technology in agriculture field [J]. Technology and market, 2016(6):30-36.)
- [7] 杨莎莎,李永强,李框宇. 基于搭载LIDAR数据的单株树提取[J]. 测绘工程, 2014, 23(8):23-27.
(YANG Shasha, LI Yongqiang, LI Kuangyu. Based on LIDAR data, the [J]. Mapping project is extracted from single tree, 2014, 23(8):23-27.)
- [8] DING J, GE X, CASEY R. "Blue competition" in China: current situation and challenges [J]. Marine policy, 2014, 44:351-359.
- [9] 陈仲新,任建强,唐华俊,等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. 遥感学报 2016, 20(5):748-767.
(CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, TANG Huajun, et al. Application and prospect of agricultural remote sensing research [J]. Journal of remote sensing, 2016, 20(5):748-767.)
- [10] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013(24):20-25.
(XU Hanqiu. Establishment and application of urban remote sensing ecological index [J]. Ecological journal, 2013(24):20-25.)
- [11] 徐升,牛志春,钱贞兵. 安徽省“十二五”生态环境遥感监测[J]. 环境监控与预警, 2016(8):6-9.
(XU Sheng, NIU Zhichun, QIAN Zhenbin. Anhui province's "12th Five-Year" ecological environment remote sensing monitoring [J]. Environmental monitoring and early warning, 2016(8):6-9.)
- [12] WANG W, LIU H, LI Y, et al. Development and management of land reclamation in China [J]. Ocean & coastal management, 2014, 10(8):31-35.
- [13] 刘洪岐. 基于RS和GIS的北京市生态环境评价研究[D]. 北京:首都师范大学, 2008.
(LIU Hongqi. Based on RS and GIS, Beijing ecological environment evaluation research [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.)
- [14] 福建省统计局,国家统计局福建调查总队. 福建统计年鉴 2016 [M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
(Fujian Bureau of statistics, National Bureau of statistics. Fujian survey team, Fujian statistical yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.)
- [15] 刘海江,张建辉,何立环,等. 我国县域尺度生态环境质量状况及空间格局分析[J]. 中国环境监测, 2010, 7(6):142-144.
(LIU Haijiang, ZHANG Jianhui, HE Lihuan, et al. Analysis of the environmental quality and spatial pattern of county scale in China [J]. China environmental monitoring, 2010, 7(6):142-144.)
- [16] 张伟科. 福田红树林自然保护区湿地生态系统动态监测模型[J]. 科技展望, 2015(23):223-224.
(ZHANG Weike. Dynamic monitoring model of wetland ecosystem in the mangrove nature reserve of fukuda [J]. Science and technology, 2015(23):223-224.)
- [17] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2009.
(SUN Jiabing. Principles and applications of remote sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.)
- [18] 王焕萍. 中卫绿洲及毗邻地区湿地的遥感动态监测方法研究[D]. 兰州:兰州大学, 2012.
(WANG Huanping. Study on remotely sense-monitoring of wetland at zhongwei oasis and its adjacent regions [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.)
- [19] ZHU W, GUO Y, SUN P, et al. Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream [J]. Acta ecologica sinica, 2012, 32(21):6609-6618.
- [20] 赵英时. 遥感应应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
(ZHAO Yingshi. Principles and methods of remote sensing application analysis [M] Beijing: Science Press, 2003.)