

基于滁州市 TM 数据的叶面积指数估算模型研建

樊荣荣, 王妮, 李霞*, 张洒洒, 陈财, 余俞寒 (滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽滁州 239000)

摘要 以 2010 年 TM 影像为数据源, 结合实测叶面积指数(LAI)数据, 采用逐步回归方法, 分析滁州市森林叶面积指数与植被指数关系并建立估测模型。结果表明: 在 0.01 显著水平下, 地面 LAI 和 NDVI、RVI、SAVI 的相关性分别为 0.899、0.868、0.853; 以 NDVI 为自变量构建的指数函数关系模型与 LAI 相关系数最高, 相关性达 0.839, LAI 预测精度达 78.96%; 以 NDVI、RVI、SAVI 为自变量构建的多元线性回归模型与 LAI 相关性达 0.917, LAI 估测平均精度达 83.36%, 符合森林资源监测要求。研究结果为使用遥感数据进行滁州市大面积森林质量监测、森林分布变化提供依据和技术支持。

关键词 叶面积指数; 植被指数; 逐步回归; 滁州市

中图分类号 S127; TP79 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)21-241-04

Establishment of Leaf Area Index Estimation Model Based on TM Data of Chuzhou City

FAN Rong-rong, WANG Ni, LI Xia* et al (School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000)

Abstract Based on the TM images of 2010 as the data source, combining with the measured LAI data, using stepwise regression method, the relationship between forest leaf area index and vegetation index in Chuzhou City was analyzed, the estimation model was established. The results showed that: under 0.01 significant level, the ground LAI and NDVI, RVI, SAVI correlation were 0.899, 0.868, 0.853; the correlation coefficient between the index function relation model constructed with NDVI as independent variables was highest, correlation was 0.839, LAI prediction accuracy reached 78.96%; the correlation between multivariate linear regression model constructed with NDVI, RVI and SAVI as independent variables and LAI was up to 0.917, the average accuracy of LAI prediction was 83.36%, which is conform to the requirements of forest resources administration. The results can provide basis and technical support for large-area forest quality monitoring, forest distribution change in Chuzhou City using remote sensing data.

Key words Leaf area index; Vegetation index; Stepwise regression; Chuzhou City

森林生态系统是陆地生态系统的主体,也是生境变化监测的主要对象。叶面积指数(LAI)是单位面积所有叶片垂直投影面积。森林叶面积指数是衡量森林质量的重要指标,其变化体现森林不同生长状态,可用来表达森林绿量并作为构建森林生态系统功能模型的主要指标。LAI 测量主要有 2 种方法:一是使用仪器直接测量,测定结果可为间接测量方法提供定标依据,但费时费力,且破坏性大。另一种是间接测量,基于遥感数据采用经验法和物理模型法进行估测。汪小钦等^[1]对森林 LAI 遥感定量反演的研究趋势和方向进行了展望,认为基于遥感数据对森林 LAI 的监测具有时效性。石月婵等^[2]对部分植被类型 LAI 反演模型精度进行了比较,结果表明利用整个生长期 LAI 建立的模型精度最高,其中基于 NDVI 的 LAI 指数模型最优。刘婧怡等^[3]利用偏最小二乘法把握了各森林类型 LAI 动态变化,并结合研究区森林覆被信息进行区域估算。赵丽芳等^[4]分析了用高光谱遥感数据估测森林叶面积指数常用方法的优劣,指出在实际应用中应结合不同方法的长处对 LAI 进行估测,以提高模型精度。王龔^[5]以安徽省滁州市为研究区,采用统计模型法结合 HJ 卫星数据建立以杨树树种为主的展叶期、花果期、叶面积稳定期和落叶始期 LAI-NDVI 估算模型,并进行了适用性分析,结果表明此模型可用于时间序列 LAI 的反演。孙晓^[6]基于高光谱遥感数据对森林叶面积指数进行反演研究,探讨和分

析了高光谱遥感森林叶面积指数反演的能力,筛选最优模型,认为 MSAVI(修正土壤调整植被指数)的二次多项式反演精度最高,为 83.01%。上述研究表明,构建 LAI 与植被指数关系模型对植被和环境监测评估具有重要意义。但是对滁州不同森林类型而言,基于 TM 数据植被指数与 LAI 关系模型的研究鲜见报道。笔者基于地面实测 LAI 数据和 TM 遥感数据,采用统计分析方法,探讨滁州市主要森林类型 LAI 估测的可靠性和应用效果,为研究区森林资源监测与评估提供依据。

1 材料与方

1.1 研究区概况 研究区滁州市位于 117°10'~119°14' E、31°51'~33°13' N,北亚热带向暖温带过渡区,四季分明,气候温和,雨量适中,年降雨量 800~1 100 mm,无霜期 220 d。全市土地总面积 1.33 万 km²,地跨长江、淮河两大流域,地貌大致可分为丘陵区、岗地区和平原区 3 种类型,其中丘陵和岗地占 88.5%,平原、圩区和湖泊占 11.5%。

滁州市森林总面积 2 733 km²,森林覆盖率 20.55%。研究区域集中在滁州市琅琊、南谯 2 区。城区森林分布集中在琅琊山国家 4A 级景区,群落类型包括阔叶林、针叶林、针阔混交林,从森林质量和面积比例角度,估测滁州市森林叶面积指数具有典型性和代表性。图 1 为研究区森林分布。

1.2 地面数据收集

1.2.1 试验区与样点选设。所选样区为滁州市城区内多个森林点,涉及庭院林、道路林、风景游憩林、生态公益林和生产经营林^[7]。基于地形及地表均质性对观测结果的影响,样区一般选择在地势相对平坦、优势树种相对单一、树木空间分布相对均匀处,样区在研究区内尽量均匀分布,并基本涵

基金项目 全国大学生创新创业项目(201510377012)。
作者简介 樊荣荣(1995-),女,安徽长丰人,本科生,专业:地理科学。
*通讯作者,教授,博士生导师,从事遥感技术应用及森林资源监测研究。
收稿日期 2016-06-08

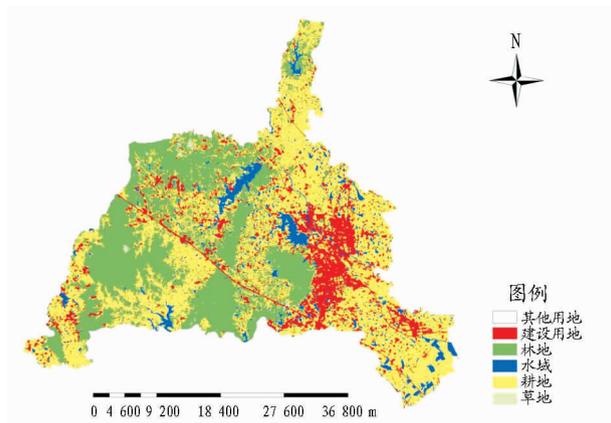
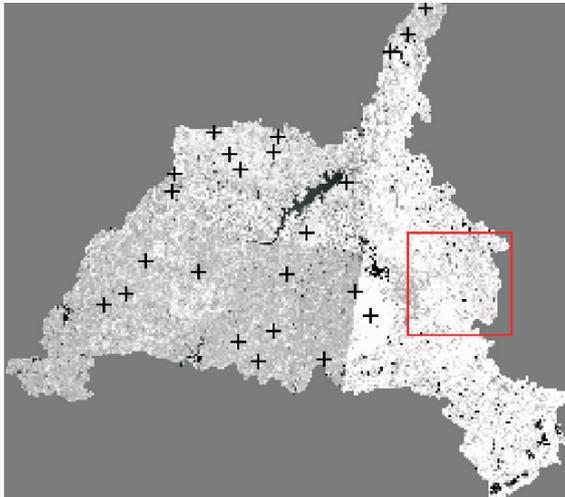


图1 滁州市森林分布

Fig.1 Chuzhou forest distribution

盖研究区全部森林类型 and 主要树种。通过手持式 GPS 地面定位仪获取样地中心点的经纬度和海拔,并采集样区优势木树高、树冠高、胸径、叶片大小、郁闭度以及坡向、坡度等二类调查数据。样点分布位置见图2。



注: + 为样点分布处。

Note: + stands for sample distribution.

图2 滁州市森林样点分布

Fig.2 Forest sample distribution in Chuzhou City

1.2.2 叶面积指数测定。使用 CI-110 植物灌层分析仪,于树木生长季(夏季),在每个样点中确定观测位置后,定位3个间隔 10 m 的点,在地表灌草上方离地面 1 m 处,利用鱼镜头和 CCD 图像传感器获取植物冠层图像并进行分析,通过应用 CI-110 系统自带软件 Plant Digital Imager 分别计算每个观测点 3 个点位的 LAI,取 3 个点位的平均 LAI 作为该样点 LAI 值。同时利用 GPS 定位每个样点的坐标位置,并进行记录。按照上述方法分别对 23 个不同的样点测量得到相应坐标参数和 LAI。

1.3 遥感数据处理 所用 2010 年 TM 数据空间分辨率为 30 m × 30 m,选取均匀分布的 25 个地面控制点,使用 ENVI 软件对 TM 影像进行几何精纠正,将误差范围控制在 0.5 个像元以内,并对图像进行重采样。由于地表反射电磁波被卫星的传感器记录下来得到的 DN 值并没有实际意义,需要通

过辐射定标把图像上的 DN 值转为辐射亮度或者是反射率,通过 TM 各个波段的增益偏置^[8]进行辐射定标计算出 TM 影像对应的地表反射率,最后对 TM 影像进行大气校正,以消除或减少大气散射对图像的干扰。校正过程中,气溶胶模式采用大陆气溶胶模式。

1.4 植被指数计算与提取 城市植被覆盖类型通常分为乔木、灌木、草地、疏林地和其他绿地 5 类,其中乔木、灌木和草地 3 种类型在城市中分布范围较广。根据研究区植被分布和 TM 数据特点,提取以下植被指数。

1.4.1 归一化植被指数(NDVI)。NDVI 可通过遥感数据中近红外波段(nir)和红光波段(r)的反射率计算得到。NDVI 对植被冠层的背景亮度非常敏感,叶冠背景信息因气候、落叶、粗糙度、有机物质等因素影响使反射率呈现一定的变化,可以用来监测植被生长活动的季节与年际变化。其变化范围为 $[-1, 1]$,负值表示地面覆盖为云、水、雪等,对可见光高反射;0 表示有岩石或裸土等, nir 和 r 近似相等;当 $nir > r$,NDVI 为正值,表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r) \quad (1)$$

式中, ρ_{nir} 和 ρ_r 分别代表近红外波段和红光波段的反射率。

1.4.2 比值植被指数(RVI)。比值植被指数是遥感数据近红外波段(nir)和红光波段(r)反射率间的比值。RVI 是绿色植物的灵敏指示参数,与 LAI、叶绿素含量相关性高。植被覆盖度大小影响 RVI,当植被覆盖度较高时,RVI 对植被十分敏感;当植被覆盖度小于 50% 时,这种敏感性显著降低。RVI 计算公式为:

$$RVI = \rho_{nir} / \rho_r \quad (2)$$

式中, ρ_{nir} 和 ρ_r 分别代表近红外波段和红光波段的反射率。

1.4.3 土壤调节指数(SAVI)。土壤调节指数可以抑制土壤噪声影响,与 NDVI 相比,增加了根据实际情况确定土壤调节系数 L , L 取值范围为 $[0, 1]$ 。 $L = 0$ 时,表示植被覆盖度为零; $L = 1$ 时,植被覆盖度非常高,土壤背景的影响为零,这种情况只有在树冠浓密、高大树木覆盖的地方才会出现。该研究中 L 值取 0.5。SAVI 计算公式为:

$$SAVI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_r)(1 + L)}{\rho_{nir} + \rho_r + L} \quad (3)$$

式中, ρ_{nir} 和 ρ_r 分别代表近红外波段和红光波段的反射率。

1.4.4 植被指数提取。根据上述 3 种植被指数定义,基于 ENVI 软件,将研究区的遥感数据导入并利用 ENVI 中 Basic Tools 中的波段计算工具(band match)进行植被指数的提取。其中遥感数据的 3 波段(b_3)和 4 波段(b_4)分别代表红光波段和近红外波段。NDVI 波段计算公式为 $\text{float}(b_4 - b_3) / (b_4 + b_3)$;RVI 波段计算公式为 $\text{float}(b_4 / b_3)$;SAVI 波段计算公式为 $\text{float}(b_4 - b_3)(1 + L) / (b_4 + b_3 + L)$ 。

1.5 植被指数与叶面积指数关系模型建立 采用 ENVI 中的 ROI 信息导出方式,导出提取的植被指数信息,将实测坐标对应像元保存为感兴趣区,并将感兴趣区所有遥感信息导出为文本文件,在 Excel 中打开文本文件,根据 Excel 中数据

分析工具,建立 LAI 与植被指数的散点图,确定相关系数。

在对叶面积指数与植被指数进行相关分析的基础上,建立相应回归模型。使用 SPSS 软件,对 LAI 和 NDVI、RVI、SAVI 数据进行逐步回归^[9]。将提取的 23 个样地点 6 个波段组合值:NDVI、RVI、SAVI 和海拔、坡度、坡向等立地信息作为自变量,剔除无显著性的海拔、坡度、坡向 3 个立地因子,采用逐步回归方法,构建叶面积指数与植被指数间一元及多元线性回归方程,比较结果中的 R 、 R^2 ^[10] 及显著性水平 Sig. 值,选取 LAI 与植被指数的最优模型。根据决定系数 R^2 判断方程拟合的相关性, R^2 越趋近于 1,表示拟合方程具有越高的参考价值;相反, R^2 越接近 0,表示参考价值越低。

2 结果及分析

2.1 LAI 与各植被指数相关关系

LAI 与各植被指数间相关系数揭示两者间相互密切程度,主要通过对相关系数的计算与检验完成。相关系数取值范围为 $[-1, 1]$,正值表示正相关,负值表示负相关;相关系数绝对值越接近于 1,表示二者关系越密切。越接近于 0,表示二者间关系越不密切。

根据导入到 Excel 中的 LAI 以及植被指数,利用 Excel 中数据分析工具,计算出 LAI 与 NDVI、RVI、SAVI 相关系数分别为 0.899、0.868、0.853。由此可知,LAI 与 NDVI、RVI、SAVI 均呈正相关,且相关系数都在 0.85 以上,相关性较高;其中 NDVI 与 LAI 的相关程度最高,达到 0.899。

2.2 不同类型植被指数与 LAI 遥感估测模型的建立

2.2.1 一元线性回归模型。

利用 SPSS 软件,对各个植被指数类型与 LAI 建立一元线性回归模型,其公式为:

$$Y = a + bX \quad (4)$$

式中, Y 是地面 LAI 实测值, X 为各植被指数, a 、 b 为拟合参数。该研究用 NDVI、RVI、SAVI 分别与 LAI 进行拟合,所得一

元线性模型见表 1。

表 1 各植被指数与 LAI 的一元线性回归模型

Table 1 Simple linear regression model of vegetation index and LAI

植被指数类型 Vegetation index	R	R^2	Sig.	回归模型 Regression model
NDVI	0.899	0.809	0.000	$Y = -2.172 + 8.342X_{ndvi}$
RVI	0.868	0.754	0.000	$Y = 0.347 + 0.805X_{rvi}$
SAVI	0.853	0.727	0.000	$Y = 0.561 + 3.913X_{savi}$

由表 1 可知,一元线性模型中,在 0.01 显著性水平下,LAI 与 NDVI 之间的拟合度比 RVI 和 SAVI 的拟合度好;NDVI 与 LAI 建立的回归模型中, R^2 值 0.809,说明模型得出的结论能正确反映因变量的准确率为 80%,相对于 RVI 和 SAVI 与 LAI 回归模型,NDVI 与 LAI 回归模型有较高的精确性。

2.2.2 多元线性回归模型。

LAI 与各植被指数建立多元线性回归模型,公式为:

$$Y = a_0X_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n \quad (5)$$

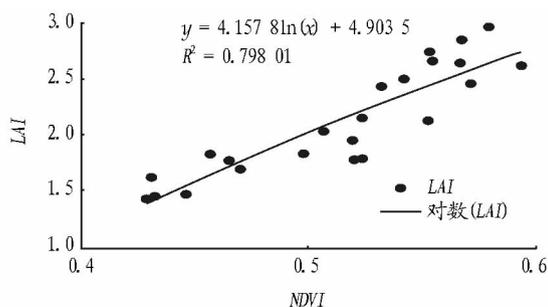
式中, Y 代表实测 LAI 值; X_i 为 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 种植被指数; a_n 代表拟合参数。该研究建立 LAI 与 NDVI、RVI、SAVI 的多元线性回归模型,结果为:

$$Y = -1.197 + 4.229X_{ndvi} + 0.291X_{rvi} + 1.256X_{savi}$$

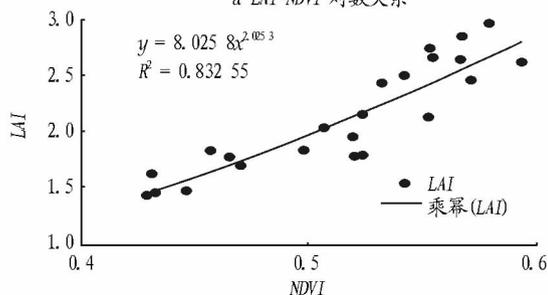
构建的多元回归模型在 0.01 显著性水平下,LAI 与 NDVI、RVI、SAVI 多元回归模型 R^2 值为 0.917,表明模型中得出的结论能正确反映因变量的准确率为 91.7%,具有较好的拟合效果。

2.2.3 非线性回归模型。

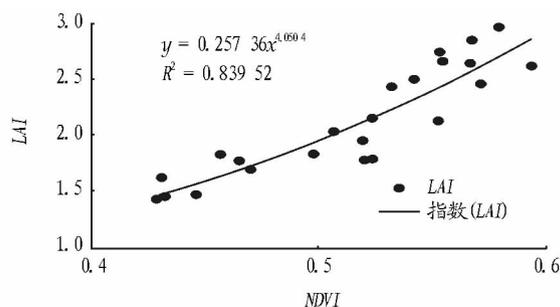
由表 1 可知,NDVI 与 LAI 的相关性较高,故选 NDVI 建立与 LAI 的非线性回归模型。分别构建 LAI-NDVI 的对数关系、指数函数关系、幂函数关系、多项式函数关系模型,结果见图 3。



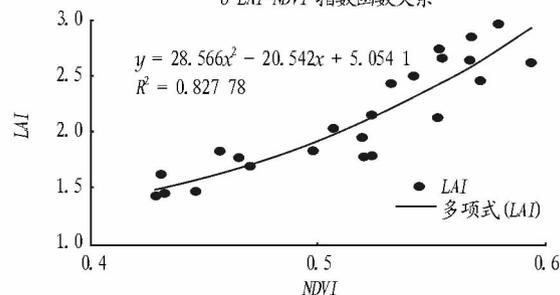
a LAI-NDVI 对数关系



c LAI-NDVI 幂函数关系



b LAI-NDVI 指数函数关系



d LAI-NDVI 多项式函数关系

图 3 LAI-NDVI 非线性函数关系模型

Fig. 3 Functional relationship model of LAI-NDVI

由图 3 可知,NDVI 和 LAI 呈正相关关系,随着 LAI 的增

大,NDVI 线性增大,且变化的幅度较大;NDVI 与 LAI 具较好

的非线性相关关系。其中以指数函数关系的决定系数 R^2 最高,具有最优的拟合效果。

2.3 模型精度的检验 由于估测模型存在不同的误差,所以有必要对建立的模型进行检验,以验证估算结果的可靠性及模型的适用性。模型精度检验使用未参与建模的6个样点测定值进行,基于拟合效果最好的多元回归模型以及以 $NDVI$ 为自变量构建的指数函数关系模型反演其叶面积指数,并根据所得的预测值跟相对应的实测值进行比较。其精度计算公式为:

$$\text{精度} = 1 - \frac{|\text{实测值} - \text{预测值}|}{\text{实测值}} \times 100\% \quad (7)$$

利用公式(7)对多元回归模型和 $LAI - NDVI$ 指数模型的精度进行验证,结果见表2、3。

表2 多元回归模型精度验证

Table 2 Multiple regression model accuracy validation

样点 Sample plot	实测 Actual	预测 Prediction	误差 Error	精度 Precision // %
1	2.324	2.631	0.307	86.79
2	2.556	2.149	0.407	84.08
3	1.762	1.521	0.241	86.32
4	2.139	2.482	0.343	83.96
5	1.921	1.476	0.445	76.83
6	1.753	2.013	0.260	85.17
平均精度 Average precision				83.36

表3 $LAI - NDVI$ 指数模型精度验证

Table 3 Index model accuracy validation of $LAI - NDVI$

样点 Sample plot	实测 Actual	预测 Prediction	误差 Error	精度 Precision // %
1	2.324	2.742	0.418	82.01
2	2.556	2.233	0.359	85.95
3	1.762	1.349	0.447	74.63
4	2.139	1.793	0.546	74.47
5	1.921	2.258	0.437	77.25
6	1.753	2.114	0.361	79.41
平均精度 Average precision				78.96

由表2、3可知,利用多元线性回归模型估测叶面积指数,精度为76%~87%,平均精度达到83.36%;以 $NDVI$ 为自变量构建的指数函数关系模型,其叶面积指数估测平均精度达78.96%。前一模型符合森林资源常规监测要求,后一模型精度接近森林资源监测要求。

3 结论

研究森林叶面积指数 (LAI) 与 TM 数据植被指数 ($NDVI$ 、

RVI 、 $SAVI$) 的关系,构建了其关系模型,是使用常规遥感数据进行森林生境监测及森林质量评估的基础。该研究以滁州市 TM 数据为例,构建了相关模型,得出以下结论。

(1) 基于 TM 数据植被指数 $NDVI$ 、 RVI 、 $SAVI$ 与 LAI 相关性分别为 0.899、0.868、0.853, $NDVI$ 与 LAI 的相关性最高;在建立的以 $NDVI$ 为参数的 4 种单因素相关模型中,指数函数模型相关系数最高,为 0.839,根据此模型估测 LAI 值的平均精度达 78.96%。

(2) 研究区不同类型植被指数与 LAI 估测模型中,以多元线性回归模型拟合效果最好。据此模型估测 LAI 值的平均精度达到 83.36%。

(3) TM 影像具较高空间分辨率、较丰富的信息量和较高定位精度,在实际研究中也较易于获取。研究结果表明,利用 TM 影像对森林叶面积指数进行估测,能够满足森林资源监测的基本精度要求。基于该研究中建立的相关模型,可对同一地区、同一时相的森林叶面积指数进行估测;但对于不同地区、不同时段森林 LAI 估测,则需要进一步取样和分析。

(4) 由于森林空间结构的异质性和复杂性,使其叶面积指数实测值受树种、时相及仪器使用误差精度等因素的影响;此外,气象、地形因素也可导致叶面积指数实测精度降低。因此,在 LAI 估测中,应注意取样点的均质性和代表性,注意研究和构建遥感数据为主、多源数据参与的 LAI 估测模型,尽可能降低人为误差和非人为误差,以提高森林叶面积指数估测精度。

参考文献

- [1] 汪小敏,江洪,傅银贞.森林叶面积指数遥感研究进展[J].福州大学学报,2009,37(6):822-828.
- [2] 石月婵,杨贵军,冯海宽,等.北京山区森林叶面积指数季相变化遥感监测[J].农业工程学报,2012,28(15):133-139.
- [3] 刘婧怡,汤旭光,常守志,等.森林叶面积指数遥感反演模型构建及区域估算[J].遥感技术与应用,2014,29(1):18-25.
- [4] 赵丽芳,谭炳香,杨华,等.高光谱遥感森林叶面积指数估测研究现状[J].世界林业研究,2007,20(2):50-54.
- [5] 王翼.基于星遥感数据的落叶阔叶林识别模型及其全生长期估算方法[D].南京:南京大学,2014.
- [6] 孙晓.基于CASI高光谱遥感数据估测森林叶面积指数研究[D].北京:中国林业科学研究院,2012.
- [7] 何兴元,刘常富,陈玮,等.城市森林分类探讨[J].生态学杂志,2004(5):175-178,185.
- [8] 陈静,姚静. Landsat-5 TM 影像增益偏差值对地面反射率计算影响分析[J].国土资源遥感,2010,22(2):45-48.
- [9] 吕海燕,李海旺,李武林.基于逐步回归分析的河南粮食产量因素研究[J].河南科学,2013(12):35-38.
- [10] 张文彤.SPSS.11.0 统计分析教程(高级篇)[M].北京:希望电子出版社,2002:65-77.

(上接第236页)

参考文献

- [1] 马万钟,杜清远.地理国情监测的体系框架研究[J].国土资源科技管理,2011,28(6):104-111.
- [2] 祁向前.地理国情普查成果管理信息系统设计[J].安徽农业科学,2016,35(3):344-346.
- [3] 陈俊勇.地理国情监测的学习札记[J].测绘学报,2012,41(5):633-635.

- [4] 张静,郭玉芳.地理国情监测中地表覆盖分类体系研究[J].测绘标准化,2012,28(3):8-10.
- [5] 史文中,秦昆,陈江平,等.可靠性地理国情动态监测的理论及关键技术探讨[J].科学通报,2012,57(24):2239-2248.
- [6] 阮于洲,陈常松,常燕卿,等.我国地理国情监测基础建设和工作实践进展评述[J].测绘与空间地理信息,2012,35(6):222-225.
- [7] 李德仁,眭海刚,单杰,等.论地理国情监测的技术支撑[J].武汉大学学报,2012,37(5):505-513.