

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.040

岩溶区峰丛洼地山体阴影区域植被指数随机模拟*

杨奇勇 蒋忠诚 罗为群 马祖陆 曹建华 沈利娜
(中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 针对岩溶峰丛洼地遥感影像山体阴影区域信息缺失的问题,以广西壮族自治区果化野外基地的归一化植被指数(NDVI)为研究对象,对研究区域 NDVI 进行了 14 次序贯高斯模拟(SGS),并就模拟结果与普通克里格进行对比分析。结果表明,受岩性和地形地貌等内在因素的影响,研究区域 NDVI 具有强烈的空间自相关性;随着模拟次数的增加,SGS 模拟值与验证值之间的相关系数增加,平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)减小,模拟精度逐渐提高;当模拟次数大于 50 次时,模拟精度高于普通克里格(OK)插值精度,模拟次数继续增加,SGS 模拟精度提高不明显。研究较精确地获取了阴影区域的 NDVI,可为区域石漠化评估与岩溶生态重建提供参考。

关键词: 峰丛洼地 石漠化 遥感 植被指数 半方差函数 随机模拟

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0232-05

Sequential Simulation of Normal Different Vegetation Index of Mountain Shadow in Karst Peak Cluster Area

Yang Qiyong Jiang Zhongcheng Luo Weiqun Ma Zulu Cao Jianhua Shen Li'na
(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem of the missing shadow information of remote-sensing images existing in the karst peak and depression area, 14 relations of SGS (Sequential Gaussian simulation) for NDVI (Normal different vegetation index) of Guohua ecological experimental area were obtained in Guangxi Zhuang Autonomous Region. The simulation results were compared with ordinary Kriging. Validation results indicated that the NDVI of the study area was impacted intrinsic factors and performed strong spatial autocorrelation. With the increase of the number of simulations, the correlation coefficient between the simulation and verify values increased, and the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) reduced. Along with the increase of simulation times, SGS simulation precision was gradually improved, and the precision of SGS was higher than that of OK (Ordinary Kriging) interpolation when simulation times were more than 50 times. Using SGS methods to predict the missing shadow information can provide a new idea and method for evaluation and ecological reconstruction of the karst rock desertification.

Key words: Peak-cluster depression Karst rocky desertification Remote sensing Normal different vegetation index Semi-variances Sequential simulation

引言

石漠化是中国西南岩溶地区土地退化的顶级形式,目前已成为备受关注的研究热点和生态环境治

理的重点^[1]。植被指数是对地表植被状况简单、有效、经验的度量,是中国西南岩溶区石漠化评估的重要指标。但是,在中国西南岩溶区,峰丛洼地是典型的岩溶地貌,峰丛与洼地正负地形交错分布^[2],使

收稿日期: 2012-05-30 修回日期: 2012-06-12

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAE00739-02)、广西自然科学基金资助项目(2012GXNSFAA053186)、中国地质科学院岩溶地质研究所所控资助项目(2012015)和西南岩溶石漠化遥感调查与地面监测项目(1212011220958)

作者简介: 杨奇勇,助理研究员,主要从事岩溶区水土资源持续高效利用和地理信息系统研究,E-mail: yangqiyong0739@163.com

遥感影像大量存在“月牙型”、“棒状”阴影分布区域,为植被指数信息的提取带来很大误差^[3],从而影响石漠化遥感评估精度。因此,进行岩溶区峰丛洼地山体阴影区植被指数的估计,对岩溶区石漠化精确评估有着重要的意义。

地统计学方法是研究空间变异最有效的手段^[4-7],其中最常用的就是 OK (Ordinary Kriging) 法,它可以给出有限区域内区域变量的最佳线性无偏估计量。但是 OK 法具有“平滑效应”^[8],不能很好地再现区域化变量的空间结构。于是 Matheron 提出的基于转向带法的地统计模拟取得越来越广泛应用^[9]。杨奇勇等^[8,10]将国内在空间变异的序贯高斯模拟 (Sequence Gaussian simulation) SGS 方面的研究总结为序贯高斯模拟单次实现 (Sequential Gaussian simulation to achieve variance, SGSV) 和序贯高斯模拟平均实现 (Sequential Gaussian simulation of the average achieved, SGSA) 2 个方面,并分别以土壤有机质和阳离子交换量为例,进行了两者在应用上的比较研究。但是与众多的研究者一样,在 OK 插值和 SGS 模拟的优劣比较上缺乏定性的评价和精度验证。

本文以国土资源部广西石漠化-果化野外基地所在的典型峰丛洼地地区为研究区域,以归一化植被指数 (Normal different vegetation index, NDVI) 为例,综合运用图像处理软件 ENVI 6.0、地理信息系统软件 ArcGIS 9.2 和地统计分析软件 GS⁺ 9.0,采用 SGS 法对示范区山体阴影区 NDVI 信息进行模拟研究,探讨随着模拟次数的增加,SGS 模拟实现精度的变化规律,并与 OK 插值精度进行比较,为 SGS 的应用提供参考。获取研究区域 NDVI 的空间分布图,为示范区生态重建提供支持。

1 研究区域概况

果化生态重建示范区建于 2001 年,以广西壮族自治区平果县果化镇龙何屯为核心,面积约 10 km²。经过多年的石漠化治理与生态重建,示范区生态环境有了很大的改善。本文选取生态重建示范区内以龙何屯 (107°23'E, 23°22'N) 为中心的典型的岩溶峰丛洼地地貌分布区为研究区域 (图 1)。研究区域总面积 5.76 km²,海拔处在 150 ~ 530 m 之间。研究区域平均年降水量 1 400 ~ 1 550 mm,冬季候温大于 10℃。区域内岩性以灰岩为主,土壤类型以红壤、砖红壤、黄红壤、棕色石灰土为主。该地区过去生态环境非常脆弱,经过石漠化治理后有所好转,但是周边石漠化仍然非常严重。

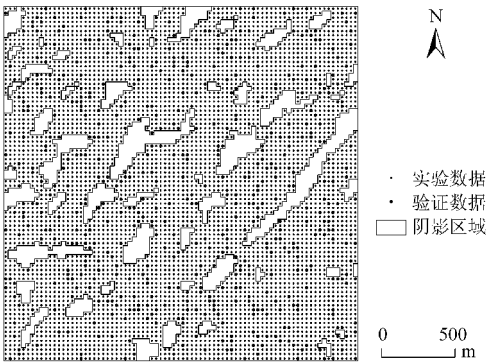


图 1 研究区域阴影分布与半方差函数分析内插图
Fig. 1 Map of shadow distribution, semi-variogram analysis and interpolation in study area

2 研究方法

2.1 NDVI 的计算

归一化植被指数通常用来反映植被覆盖、生长等信息,是岩溶区植被遥感中应用最广泛的植被指数,其计算公式为^[11]

$$I_{NDVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \tag{1}$$

式中 I_{NDVI} ——植被指数
 ρ_{NIR} ——NDVI 近红外波段灰度
 ρ_R ——NDVI 红光波段灰度

NDVI 取值在 (-1.0, 1.0) 之间,与植被密度呈正相关。在中国西南岩溶区 NDVI 经常作为石漠化评估的重要指标,其值越小,植被覆盖越差,石漠化越严重。

2.2 数据处理

本研究用到的遥感影像为 2010 年 10 月 24 日的 Landsat ETM+,影像来源于中国科学院国际数据服务平台。本文采用 GIS、遥感和地统计学相结合的方法,对示范区 NDVI 的空间变异性进行 OK 插值和 SGS 模拟对比研究。具体数据处理流程为:①在 ENVI 中对比分析阴影区域的光谱信息,利用决策分类法进行阴影区域的提取,得到剔除阴影后的研究区域的 NDVI。②在 ArcGIS 9.2 中进行研究区域 NDVI 图像灰度的提取,并将其分为实验数据与验证数据 2 类。③利用实验数据在 GS⁺ 中进行半方差函数模拟,通过反复比较计算,得出研究区域 NDVI 的最佳半方差函数模型。④在 GS⁺ 中进行 OK 插值和序贯高斯模拟,并导出结果,其中 SGS 模拟是在 GS⁺ 中通过设定不同的模拟次数和不同的种子,进行了 14 次 SGS 模拟实现,分别记为 SGS1、SGS5、SGS10、…、SGS5000。⑤利用验证数据点位图对 OK 插值结果和模拟实现图像灰度提取,进行精度评价。

2.3 预测精度验证

OK 插值和 SGS 模拟验证的具体指标包括：
①相关系数，预测值与验证值之间的相关系数越接近 1 表明预测精度越高。②平均绝对误差 (MAE)，反映预测值偏离验证值的大小，越接近于 0，精度越高。③均方根误差 (RMSE)，介于 0 与 1 之间，越接近于 0，预测越准确^[12]。

I_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P - O| \tag{2}

I_{RMSE} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P - O)^2} \tag{3}

式中 I_{MAE}——平均绝对误差
I_{RMSE}——均方根误差
O——验证数据
P——OK 插值或 SGS 模拟的预测数据
n——验证数据与预测数据数目

3 结果与分析

3.1 NDVI 的半方差函数结构分析

研究区域的 NDVI 图像像元共 6 400 个，其中非阴影区域图像像元 5 418 个，山体阴影像元 982 个。阴影区域比重为 15.34%，这将在很大程度上影响研究区域 NDVI 解译的精度。在 ArcGIS 中利用 Create Subsets 模块随机生成实验数据 4 876 个与验证数据 542 个(图 1)。研究区域 NDVI 的偏度值为 0.525，峰度为 0.366，基本呈正态分布，适合地统计分析。由图 2 可见，研究区域 NDVI 的最优半方差函数理论模型为指数模型。C₀ 为 0.000 01，Sill 为 0.008 3，Range 为 300 m，R² 为 0.976。

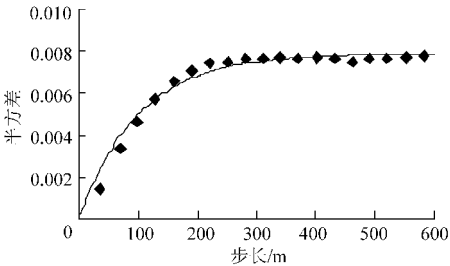


图2 研究区域 NDVI 的半方差函数
Fig. 2 Semi-variogram of NDVI in study area

研究区域 NDVI 的 C₀ 与 Sill 的比值为 0.12%，说明研究区域 NDVI 具有强烈的空间自相关性^[3,8]，其变异主要受到气候、岩性、地形等结构因素的影响，而受到砍伐破坏、开垦等随机因素的影响较小，这与多年来封山育林治理措施的实施是分不开的^[13]；研究区域 NDVI 的变程为 300 m，两像元之间的距离小于该值时，它们之间存在一定的相关关系，大于该值时则是相互独立的。

3.2 OK 插值与 SGS 模拟结果的对比分析

利用图 2 中的半方差函数理论模型分别进行 OK 插值、14 次 SGS 模拟，输出图像栅格的大小为 30 m。将 542 个验证点的随机场数据和验证结果进行整理与分析，如表 1、图 3 和图 4 所示；将阴影区域 982 个像元的 NDVI 计算值与相应的模拟结果整理如表 2 所示。其中数据来源 0 表示阴影区域 NDVI 计算数据；数据来源 1 表示 NDVI 验证数据；数据来源 2 表示 OK 插值结果；数据来源 3~16 表示 SGS1、SGS5、…、SGS5000 等 14 次 SGS 模拟实现。

表 1 NDVI 验证值与 OK 插值、SGS 模拟结果的统计分析
Tab.1 Statistical characteristics of Kriging estimated values, sequential Gaussian simulation values and verify values

数据来源	最小值/最大值	均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
1	-0.19/0.24	0.028	0.091	324.3	-0.61	-0.33
2	-0.19/0.19	0.027	0.081	298.2	-0.56	-0.31
3	-0.24/0.23	0.027	0.091	334.2	-0.47	-0.21
4	-0.21/0.21	0.028	0.087	309.7	-0.51	-0.29
5	-0.23/0.21	0.028	0.086	304.5	-0.52	-0.30
6	-0.23/0.21	0.027	0.084	308.8	-0.57	-0.30
7	-0.23/0.21	0.027	0.084	308.7	-0.53	-0.32
8	-0.23/0.21	0.028	0.084	303.9	-0.55	-0.31
9	-0.23/0.21	0.028	0.085	301.3	-0.55	-0.30
10	-0.23/0.21	0.028	0.085	301.5	-0.54	-0.31
11	-0.23/0.21	0.028	0.085	302.1	-0.54	-0.31
12	-0.23/0.21	0.028	0.085	303.4	-0.55	-0.31
13	-0.23/0.21	0.028	0.085	303.1	-0.55	-0.31
14	-0.23/0.21	0.028	0.085	304.4	-0.56	-0.31
15	-0.23/0.21	0.028	0.084	304.5	-0.54	-0.32
16	-0.23/0.21	0.028	0.084	304.9	-0.54	-0.32

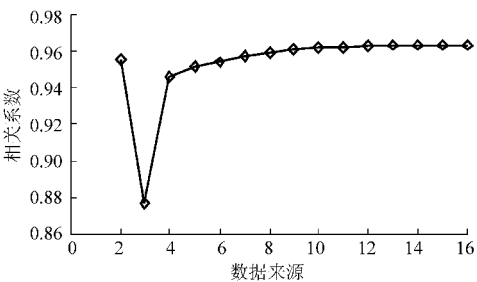


图3 研究区域 NDVI 的 OK 插值和 SGS 模拟相关系数
Fig.3 Correlation coefficient of OK interpolation and SGS simulation in study area

3.2.1 OK 插值、SGS 模拟结果的统计分析

从表 1 中可以看出，OK 插值和 SGS 模拟的最值范围、平均值和标准差等与 NDVI 验证数据基本相同，其变化规律都与文献[8,10]相似。但是随着模拟次数的增加，变异系数、偏度、峰度等并不呈现出上述文献中的变化规律，与文献[14~16]也不相同。分析其中的原因可能有 2 个：①文献[8]和文

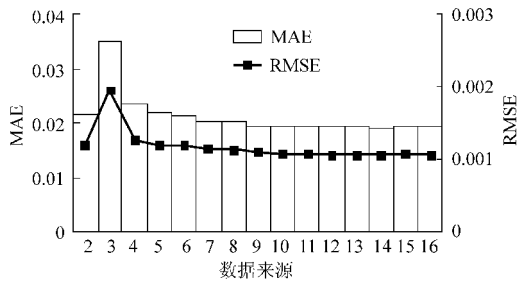


图4 研究区域NDVI的OK插值和SGS模拟误差
Fig.4 Errors of OK interpolation and SGS in study area

献[10]中采样网格分别为1.5 km和0.5 km,输出的图像栅格大小分别为0.5 km和0.2 km,本文中“采样点”网格和输出图像栅格相同,为30 m。而采样网格大小与输出图栅格大小对预测精度有很大的影响^[17]。②上述文献都是针对整个研究区域将预测数据与采样数据进行对比的,本文是通过预留验证数据与预测数据进行分析比较,在分析方法上更合理,更有说服力。而OK法有较为明显的“平滑效应”,SGS模拟实现中采样点上的预测数据等于原始数据。

表2 阴影区域NDVI与OK插值、SGS模拟结果的统计分析

Tab.2 Statistical characteristics of Kriging estimated values, sequential Gaussian simulation values and values of shade area

数据来源	最小值/最大值	均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
1	-0.22/0.16	-0.012	0.06	-509.4	0.06	-0.17
2	-0.19/0.17	0.031	0.06	192.8	0.20	-0.58
3	-0.27/0.23	0.029	0.07	255.2	0.29	-0.43
4	-0.19/0.19	0.026	0.06	234.2	0.33	-0.50
5	-0.18/0.18	0.028	0.06	206.3	0.31	-0.49
6	-0.17/0.17	0.028	0.06	199.4	0.28	-0.50
7	-0.16/0.17	0.029	0.06	193.4	0.33	-0.54
8	-0.17/0.17	0.029	0.06	191.1	0.43	-0.57
9	-0.18/0.17	0.029	0.06	199.2	0.49	-0.61
10	-0.18/0.17	0.028	0.06	200.8	0.53	-0.61
11	-0.19/0.17	0.028	0.06	202.2	0.57	-0.63
12	-0.19/0.17	0.028	0.06	201.2	0.52	-0.63
13	-0.19/0.17	0.028	0.06	202.8	0.50	-0.62
14	-0.19/0.17	0.028	0.06	202.4	0.49	-0.62
15	-0.18/0.16	0.028	0.05	198.6	0.46	-0.58
16	-0.18/0.16	0.028	0.05	197.9	0.47	-0.59

从表2可以看出,从NDVI的最大值和最小值来看,SGS1(数据源3)模拟数据变幅最大,与SGS单次模拟的波动性有关^[8];阴影区域数据变幅次之;Kriging插值和其他的随机模拟实现数据数据变幅相近,但都比表1中的变幅略小,其原因可能是单个阴影区域的面积较大,而表1中的验证数据是随

机分布在模拟数据中的,是Kriging和SGS平均模拟的“平滑”效应下的结果^[8,16]。从均值来看,阴影区域NDVI最小,为负值,Kriging插值数据均值最大,SGS模拟数据的均值与表1中的相近。

因此,从表1和表2中阴影区域NDVI数据、预留的验证数据与其预测数据的各项统计特征来看,Kriging和SGS模拟都能对阴影区域NDVI进行较好的预测,但是随机模拟的效果要好些。

3.2.2 OK插值、SGS模拟结果的精度分析

OK插值和SGS模拟结果的验证分析表明(图3),验证值和预测值之间的相关系数 r 处在0.877~0.963之间,相关性达到极显著水平($P < 0.01$),说明NDVI验证值与OK插值、SGS模拟实现结果之间具有较好的一致性。从图3可以看出,当模拟次数小于30次时,OK插值的 r 比SGS模拟高;模拟次数大于30次后,OK插值的 r 比SGS模拟低;随着模拟次数的增加, r 逐渐增大,模拟次数大于50次时, r 趋于稳定。

从平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来看,MAE和RMSE最高值都出现在SGS1,也只有0.035和0.0019,说明研究区域NDVI的OK插值和SGS模拟具有非常高的预测精度(图4)。随模拟次数增加,MAE和RMSE减小,其变化规律与相关系数随模拟次数增加的变化规律相似。

从以上分析可知,研究区域阴影区域NDVI“缺失”信息的OK插值和SGS模拟结果是可信的,具体应用中选用SGS模拟方法较好,模拟次数大于50次。

3.3 NDVI的空间分布

NDVI空间分布上OK插值和SGS模拟实现具有一致性。但是,由于OK插值的“平滑效应”,在NDVI等级分布图上,OK插值图的等级比SGS模拟实现的等级要少,这与已有的研究结论^[8,10]是一致的。

限于篇幅,本文给出研究区域OK插值与SGS100模拟实现的NDVI空间分布图(图5)。研究区域NDVI平均值只有0.028。高值区域主要分布在西北部,最高值为0.21;低值区域主要集中在中东部和东南部,最低值为-0.23。NDVI在空间分布上高值区域与低值区域都呈斑块状、条带状的“插花”分布,这与研究区域峰丛、洼地的空间分布是相似的。

4 结论

(1) 该文利用地统计学方法,通过OK插值和SGS模拟对岩溶区山体阴影“缺失”NDVI信息进行预测,取得了较好的效果。

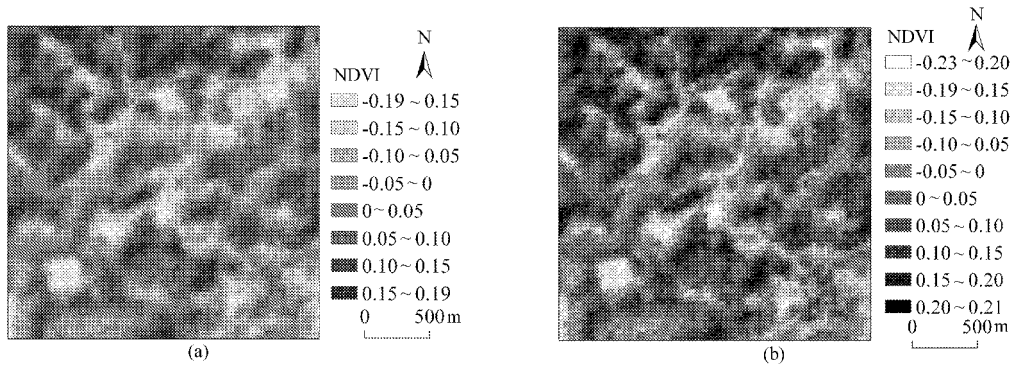


图 5 研究区域 2010 年 NDVI 分布预测图
Fig. 5 Prediction map of NDVI index in 2010
(a) OK 插值 (b) SGS100 模拟

(2)NDVI 空间结构分析表明,受到地形地貌等结构因素的影响,研究区域 NDVI 呈强烈的空间自相关性;SGS 模拟结果表明研究区域 NDVI 较低,均值约为 0.028。

(3)针对遥感图像上由于受云层、云阴影、建筑物或山体等遮挡,造成影像上部分区域信息的“缺失”问题,用 SGS 模拟“缺失”信息具有很高的精度,模拟次数高于 50 次为宜。

参 考 文 献

1 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议[J]. 地球科学进展,2003,18(4):489~492.

2 蒋忠诚,李先琨,曾馥平,等. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京:地质出版社,2007:1~11.

3 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. 农业机械学报,2010,41(7):57~63.

She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 57~63. (in Chinese)

4 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):39~44.

Zhang Shujuan, He Yong, Fang Hui. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 39~44. (in Chinese)

5 张源沛,胡克林,李保国,等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报,2009,25(7):19~24.

Zhang Yuanpei, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 19~24. (in Chinese)

6 崔潇潇,高原,吕贻忠. 北京市大兴区土壤肥力的空间变异[J]. 农业工程学报,2010,26(9):327~333.

Cui Xiaoxiao, Gao Yuan, Lü Yizhong. Spatial variability of soil fertility in Daxing District of Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 327~333. (in Chinese)

7 段旭,王彦辉,程积民. 宁夏固原云雾山天然草坡土壤电阻率和含水率的关系及其空间变异[J]. 农业工程学报,2012, 28(7):130~137.

Duan Xu, Wang Yanhui, Cheng Jimin, et al. Spatial variation and relationship of soil resistivity and water moisture on typical grass slopes of Yunwu Mountains[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 130~137. (in Chinese)

8 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 耕地土壤有机质空间变异性的随机模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(12):324~329.

Yang Qiyong, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Stochastic simulation of cultivated soil organic matter spatial variability[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 324~329. (in Chinese)

9 Matheron G. The intrinsic random functions and their applications[J]. Advances in Applied Probability, 1973(5): 439~468.

10 杨奇勇,杨劲松. 基于 GIS 和 GS⁺的耕地土壤阳离子交换量的序贯高斯模拟[J]. 中国农业科学,2010,43(18):3 759~3 766.

Yang Qiyong, Yang Jinsong. Sequential gaussian simulation of farmland soil cation exchange capacity based on GIS and GS⁺ [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3 759~3 766. (in Chinese)

11 沈明霞,何瑞银,丛静华,等. 基于主成分分析与 Brovey 变换的 ETM+ 影像植被信息提取[J]. 农业机械学报,2007, 38(9):87~89.

Shen Mingxia, He Ruiyin, Cong Jinghua, et al. Study on extraction of vegetation information of ETM+ by using PCA method and Brovey transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 87~89. (in Chinese)

12 Jiang Xiaowei, Wan Li, Du Qiang, et al. Estimation of NDVI images using geostatistical methods[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 71~80.

13 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,等. 岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析[J]. 环境科学,2012,33(4):1 404~1 408.

Yang Qiyong, Jiang Zhongcheng, Ma Zulu, et al. Kriging analysis of vegetation index depression in peak cluster karst area[J]. Environmental Science, 2012, 33(4): 1 404~1 408. (in Chinese)

distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8):2 271 ~ 2 278. (in Chinese)

12 Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie [C] //Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan: Ann Arbor, 1972,2:1 357 ~ 1 381.

13 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12):1 541 ~ 1 552.

14 Rouse J W, Haas R H, Schell J A. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt,MD,USA,1974: 1 ~ 371.

15 Justice C O, Vermote E, Townshend J R G, et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4):1 228 ~ 1 250.

16 Guyot G, Baret F. Utilisation de la haute resolution spectral pour suivre l' état des couverts végétaux [C] //Proceedings of the 4th International Conference on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, 1988.

17 Hutet A R, Jackson R D, Post D F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(1): 37 ~ 53.

18 Rondeaux G. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996,55(2):95 ~ 107.

19 Bai J H, Li S K, Wang K R, et al. Estimating aboveground fresh biomass of different cotton canopy types with homogeneity models based on hyper spectrum parameters[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007,6(4):437 ~ 445.

20 Darvishzadeh R, Skidmore A, Schlerf M, et al. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008,63(4):409 ~ 426.

21 Fitzgerald G, Rodriguez D, O' Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI) [J]. *Field Crops Research*, 2010,116(3):318 ~ 324.

22 郭培国,陈建军,郑燕玲,等. 应用¹⁵N示踪法研究烤烟的氮素营养[J]. *中国烟草学报*,1998,4(2):64 ~ 68.
Guo Peiguo, Chen Jianjun, Zheng Yanling, et al. Studies on nitrogen nutrition of flue-cured tobacco by means of ¹⁵N isotope tracer[J]. *Atca Tobacco Sinica*, 1998,4(2):64 ~ 68. (in Chinese)

23 单德鑫,杨书海,李淑芹,等. ¹⁵N示踪研究烤烟对氮的吸收及分配[J]. *中国土壤与肥料*,2007(2):43 ~ 45.
Shan Dexin, Yang Shuhai, Li Shuqin, et al. Absorption and distribution of nitrogen of flue-cured tobacco with ¹⁵N tracer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(2):43 ~ 45. (in Chinese)

24 赵正雄,殷红慧,李宏光,等. 断根追钾条件下减量施氮对烟株后期氮、钾吸收及烟叶产量质量的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(7): 1 294 ~ 1 298.
Zhao Zhengxiong, Yin Honghui, Li Hongguang, et al. Integrated effects of reducing N application and cutting-roots with K top-dressing on N, K uptake, and yield, quality of flue-cured tobacco [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1 294 ~ 1 298. (in Chinese)

25 杨志晓,刘化冰,柯油松,等. 广东南雄烟区烤烟氮素累积分配及利用特征[J]. *应用生态学报*, 2011,22(6): 1 450 ~ 1 456.
Yang Zhixiao, Liu Huabing, Ke Yousong, et al. Nitrogen uptake and allocation characteristics of flue-cured tobacco in Nanxiong tobacco planting area of Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1 450 ~ 1 456. (in Chinese)

26 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京:科学出版社,1996:45 ~ 47.

(上接第 236 页)

14 李保国,胡克林,陈德立,等. 农田土壤表层饱和导水率的条件模拟[J]. *水利学报*,2002,33(2):36 ~ 41.
Li Baoguo, Hu Kelin, Chen Deli, et al. Conditional simulation of soil surface saturated hydraulic conductivity at field scale[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002,33(2): 36 ~ 41. (in Chinese)

15 张泽浦,王学军. 土壤微量元素含量空间分布的条件模拟[J]. *土壤学报*,1998,35(3):423 ~ 429.
Zhang Zepu, Wang Xuejun. Condition simulation for spatial distribution of trace elements in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 423 ~ 429. (in Chinese)

16 陈翠英,江永真. 土壤养分空间变异性的随机模拟及其应用[J]. *农业机械学报*,2006,37(12):67 ~ 70,95.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen. Stochastic simulation of spatial variability of soil nutrient property and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 67 ~ 70,95. (in Chinese)

17 Wang Hongbin, Yang Qing, Lin Zhijie, et al. Determining optimal density of grid soil-sampling points using computer simulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2006,22(8):145 ~ 148.