

## 基于 NDVI 的绿洲棉田土壤肥力质量评价方法研究

王琼<sup>1,2</sup>, 王克如<sup>1,2</sup>, 李少昆<sup>1,2\*</sup>, 肖春华<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 戴建国<sup>1</sup>, 房林峰<sup>1</sup>, 陈兵<sup>3</sup>, 王方永<sup>3</sup>

(1. 石河子大学绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003; 2. 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081; 3. 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 以天山北坡典型国营农场棉田为研究对象, 探讨基于归一化植被指数(NDVI)的棉田土壤肥力质量评价方法。将棉花不同生育期表征长势的 NDVI 作为评价指标对棉田土壤肥力质量进行评价, 再将 NDVI 与少量理化测定的土壤样点数据(有机质、有效磷含量等)共同作为评价指标, 结合地统计方法与遥感影像聚类算法进行评价; 并与完全基于土壤样品理化测定数据的评价结果进行比较, 探讨基于 NDVI 评价方法对土壤肥力质量评价结果的准确性与可靠性。研究证明将 NDVI 与少量理化测定的土壤样点数据作为评价指标, 能显著提高评价结果与棉田实际土壤肥力状况的一致性。基于 NDVI 的土壤肥力质量评价方法快速、简便, 其评价结果可为研究绿洲棉田土壤质量及农业结构调整规划、耕地质量保护等提供科学依据。

**关键词:** 棉田; NDVI; 土壤肥力; 质量评价方法

**中图分类号:** S3; TP79 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-7807(2013)02-0148-06

## Study on Evaluation Methods for Soil Fertility in Oasis Cotton Field Based on the Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)

WANG Qiong<sup>1,2</sup>, WANG Ke-ru<sup>1,2</sup>, LI Shao-kun<sup>1,2\*</sup>, XIAO Chun-hua<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, DAI Jian-guo<sup>1</sup>, FANG Lin-feng<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>3</sup>, WANG Fang-yong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crop, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Institute of Cotton, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** The cotton fields of typical state farms which set in the northern slope of Tianshan Mountain, were used to explore the soil fertility assessment method based on normalized difference vegetation index (NDVI). Using the NDVI, which obtained during different cotton growth periods, as assessment index evaluate the soil fertility; then regard NDVI and soil physical and chemistry data such as soil organic matter content, available phosphorus content and so on, which come from small amount of cotton field soil samples, as the assessment index, the geostatistical methodology and remote sensing image clustering algorithm were used to evaluate the soil fertility. Comparing the two results with the one evaluated only by soil physical and chemistry data, accuracy and reliability of the methods based on NDVI were studied. It could be concluded that; the method based on NDVI and a few soil physical and chemistry data can improve the accuracy and the consistent of reality significantly. The evaluation method for cotton soil fertility based on NDVI can evaluate rapidly and conveniently, and it will provide a scientific basis to the research on oasis cotton soil quality, agricultural restructuring plan and the cultivated land quality protection.

**Key words:** cotton fields; NDVI; the soil fertility quality; evaluation methods

土壤是农业的基本生产资料, 土壤肥力质量高低直接影响作物生长、产量和经济效益。监测土壤肥力时空变异, 不仅可以准确把握土壤肥力

状况, 为提高耕地生产能力提供依据, 而且可以深入推进精细农业应用, 提高资源的利用效率, 降低生产成本<sup>[1]</sup>。土壤肥力质量评价方法主要有

收稿日期: 2012-12-29

作者简介: 王琼(1983-), 女, 博士研究生, wangqionghope@163.com; \* 通讯作者, lishk@mail.caas.net.cn

基金项目: 国家自然科学基金(30860139, 31071371, 41161068); 科技支撑计划(2012BAH27B04)

土壤质量综合指数评分法、土壤相对质量法、土壤质量动力学方法以及基于 GIS 的评价方法<sup>[2]</sup>。近年来,运用数理统计方法结合地理信息系统(GIS)及地统计学原理开展的研究较多<sup>[3-4]</sup>,并取得了显著进展。这些方法虽有各自的独到之处,但都依赖土壤样点测定数据;在进行较大尺度土壤肥力质量评价时,由于大量样点取土样、测定,耗时、费力,实效性较低。近年来,遥感技术的发展为解决该问题提供了有效途径。有学者发现基于遥感的植被覆盖度与土壤有机碳、全氮含量等土壤肥力相关指标间存在相关关系<sup>[5]</sup>;李欣宇等<sup>[6]</sup>对比了遥感方法和地统计方法在表层土壤有机碳空间格局研究中的应用,认为 2 种方法所得结果基本一致,但遥感方法所需样本量低于地统计法,且遥感方法的结果与当地实际情况更相符;Numata 等<sup>[7]</sup>选取 3 个不同年代的草场作为研究样地,利用遥感影像提取非光合植被(Nonphotosynthetic vegetation, NPV)、绿色植被(Green vegetation, GV)和归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)3 个植被指数与草地土壤养分含量进行相关分析,发现不同养分元素与 3 种指数的相关性均存在差异;张素梅等<sup>[8]</sup>通过 DEM(Digital elevation model)数据获取研究区地形因子,并辅之以卫星数据的 NDVI 运用回归克里金法有效地估测了研究区土壤养分的空间分布。遥感具有快速、高效以及大面积监测等特点,作为反映土壤和植被信息<sup>[9-10]</sup>的数据源被用于土壤肥力分析具有较强优势<sup>[11-12]</sup>,而目前利用这种数据进行土壤肥力质量评价的研究相对较少。

新疆是我国重要的棉花生产基地,棉花的连片规模化种植和生长季节晴朗少雨的天气状况为遥感技术应用的开展提供了理想的前提。近年来针对新疆棉田土壤肥力质量的研究大多使用较为传统的,以理化测定土壤样点数据为指标的评价方法<sup>[13]</sup>。本文以天山北坡典型国营农场棉田为研究对象,对比仅使用 NDVI 数据、仅使用土壤理化测定数据、以及使用 NDVI 和少量理化测定数据相结合进行土壤肥力质量评价结果的准确性和一致性,旨在寻找一种方便快捷的土壤肥力质量评价方法,为及时准确监测新疆棉田土壤肥力变化,以及作物种植结构调整、耕地质量保

护和高标准农田建设提供依据;同时,减轻不合理施肥对环境的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区域概况

研究区位于欧亚大陆腹地、天山北坡国营农场兵团农七师(44°2'31"~44°3'4"N, 84°7'6"~85°3'8"E),属温带大陆性干旱荒漠气候。全境地势平坦,主要为灰漠土和盐化灰漠土,植被生长期多在 4-10 月。农场以单块条田为一种作物的种植单元,棉花为主要农作物,种植面积比例接近 80%。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 遥感影像数据获取与处理。**采用美国陆地资源卫星 5 号专题绘图仪(Thematic Mapper)获取的图像(Landsat 5 TM 数据),并以研究区第二次全国土地调查现状图为轮廓进行剪裁。依据当地棉花物候期选取棉花蕾期、初花期和盛花期内无云、质量较好的影像数据,过境时间分别为 2009 年 6 月 5 日、6 月 21 日、7 月 23 日,条带号/行编号为 145/029。

对选取的影像进行预处理<sup>[15]</sup>,得到投影坐标为 UTM\_WGS84,空间分辨率为 30 m×30 m,配准误差小于 0.5 个像元的多光谱栅格数据,并计算出不同时相遥感影像的棉田归一化植被指数<sup>[16]</sup>(Normalized difference vegetation index, NDVI)。

**1.2.2 土壤数据的获取。**自 2009 年 9 月下旬至 10 月中旬,以田埂为界限,在棉田内按照 5 点取样法取 0~20 cm 耕层土壤样品,同时记录测点 GPS 信息;土样经自然风干后测定碱解氮(碱解扩散法)、有效磷(0.5 mol NaHCO<sub>3</sub> 法)、速效钾(NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度计法)、有机质(重铬酸钾容量法)及总盐(中性 NH<sub>4</sub>OAc 法)含量<sup>[17]</sup>。并将带有经纬度信息的采样点数据转换为与遥感影像空间投影坐标一致的矢量数据,剔除异常值后得到有效样点 489 个。

**1.2.3 数据分析方法。**苗期至盛花期是棉花植株进行生物量积累的重要时期,此时 NDVI 可以体现棉花长势状况,而多时相棉花长势信息能够对棉田质量状况进行诊断<sup>[18]</sup>。研究区棉田具有长期耕作、规模化管理的特点,土壤质地较为均匀,在

灌溉条件一致的情况下,生长期内棉花长势持续较好的地块可以间接反映棉田土壤肥力质量状况。因此,本研究通过棉花蕾期、初花期及盛花期的多时相 NDVI 数据制作棉田长势分级图,以当年相同时段实地调查的棉花长势参数进行验证。得到土壤肥力质量评价结果。

采用地块法<sup>[9]</sup>以团场棉田地块为评价单元。通过 ArcGIS 10.0 软件的空间分析模块对所测棉田样点土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、总盐含量数据进行克里金空间插值 (Ordinary Kriging); 并重采样为与 NDVI 栅格数据一致的空间分辨率,得到肥力评价指标的空间分布栅格图。利用 ENVI (The Environment for visualizing images) 软件对数据进行 Min-max 标准化处理<sup>[20]</sup>消除量纲差异,使用 ArcGIS 的 Band Collection Statistics 模块对各指标进行相关性分析,并采用 Principal Components 模块进行主成分分析,利用 Isodata 模块进行聚类分析,得到基于土壤理化测定指标的土壤肥力质量评价结果。

因综合指数法评价结果的准确性较为可靠<sup>[21]</sup>,采用该方法进行评价:以测定的土壤有机质、碱解氮含量等作为评价指标,以 SPSS 统计软件为分析平台,通过计算各个公因子方差占公因子方差总和的百分数得到权重值,使用综合肥力指数评价模型 IFI(Integrated soil fertility indices)对棉田土壤肥力质量进行评分,并将仅使用 NDVI 数据、使用 NDVI 和少量土壤理化测定数据进行评价的结果与综合指数法评价结果相比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区土壤肥力质量综合指数评价

土壤肥力指数法是常用的一种定量化评价土壤肥力的方法,能综合有效地反映土壤质量的变异信息<sup>[22]</sup>,使评价结果更直观,易于比较,土壤肥力指数的高低代表土壤质量的优良程度。IFI 模型对 489 个土壤测定样点进行指数计算及评价,其数学表达为:

$$IFI = \prod_{i=1}^n (F_i)^{W_i}$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个因子的权重;  $F_i$  为第  $i$  个因子的隶属度;  $\Pi$  表示连乘,可体现各评价因素间的交

互作用,  $(F_i)^{W_i}$  是各评价因素的贡献率。权重由主成分分析得到,隶属度使用 S 型隶属度函数计算。由此得到研究区不同田块的土壤肥力指数,并按照等距法<sup>[23]</sup>将这些田块的土壤肥力指数分为 5 个等级(表 1),其中指数较高和较低的地块分布相对较少,分别占总面积的 17% 和 11%,指数分布呈现中间值分布面积大,高、低两端值分布面积较小的格局;土壤肥力状况与相关研究分析的结果基本吻合<sup>[24]</sup>。

表 1 土壤肥力质量综合指数法评价结果等级划分表  
Table 1 The grades of soil fertility assessment by composite index appraisal method

等级	综合指数	地块单元数	占总地块百分比
Grades of the soil fertility	Composite index number	Number of farmland	Percentage of total plot /%
1	0.31	83	17
2	0.45	191	39
3	0.58	162	33
4	0.71	53	11

### 2.2 基于不同生长期 NDVI 的棉田土壤肥力质量评价

单一时相 NDVI 对棉花长势监测具有实时性,但存在偶然因素影响,而多个时相数据的综合可消除偶然因素影响。将棉花蕾期、初花期和盛花期的 NDVI 数据进行波段运算(表达式为  $\text{float}(\text{NDVI}_{\text{蕾期}} + \text{NDVI}_{\text{初花期}} + \text{NDVI}_{\text{盛花期}})/3$ ),得到棉花自蕾期至盛花期整体 NDVI 值的大小;再按照实地调查的棉田长势数据设定阈值,对处理后的 NDVI 数据进行密度分割,制作棉田土壤肥力质量分级专题图(图 1)。将研究区棉田肥力质量按照等距法分为 5 级,级数越高,表明质量越高。

### 2.3 基于 NDVI 与少量土壤样点数据相结合的棉田土壤肥力质量评价

为了减少土壤肥力评价中对土样处理的工作量,并提高评价的精度和可靠性,本研究采用系统分层采样法对已有的 489 个有效土壤理化测定数据进行筛选。系统分层采样法是规则采样和随机采样相结合的方法,即单个点随机分布于规则的格网内<sup>[25]</sup>;该采样方法所采的样点代表性强,可实现用更少的采样点反映土壤肥力指标的实际情况。最终得到 109 个均匀分布的样点。并以此样点数据进行插值得到栅格数据与 NDVI

栅格数据共同作为棉田土壤肥力质量的评价指标进行评价。

**2.3.1 评价指标空间插值运算。**统计分析各指标含量均属于中等变异性,利用 ArcGIS 地统计模块对土壤测定数据进行直方图和正态分布检验,选取球状模型进行克里金插值分析,变异函数模拟模型及其拟合参数见表 2。根据区域化变量空间相关性程度的分级标准<sup>[26]</sup>,各指标的块金效应均属中等强度的空间自相关性。使用地统计软件得到研究区土壤肥力的空间分布图,并转换为与 NDVI 空间分辨率一致的栅格形式。

**2.3.2 棉田土壤肥力质量评价。**采用栅格数据主

成分分析法对研究区棉田 NDVI 数据和土壤理化指标插值得到的栅格数据进行分析。结果表明,基于各生育时期棉花 NDVI 与土壤理化指标得到的前 2 个主分量的累计贡献率达到 89%。将主成分分析得到的第 1、第 2 主分量作为土壤肥力质量评价的基础数据,分别采用 Isodata 算法进行聚类分析,对聚类分析后的数据进行叠加运算得到最终土壤肥力质量等级分布图(图 2),将研究区棉田土壤肥力质量分为 5 个等级,等级越高表明质量越好。由图表可知肥力较好的棉田主要分布在研究区北部及东南部。

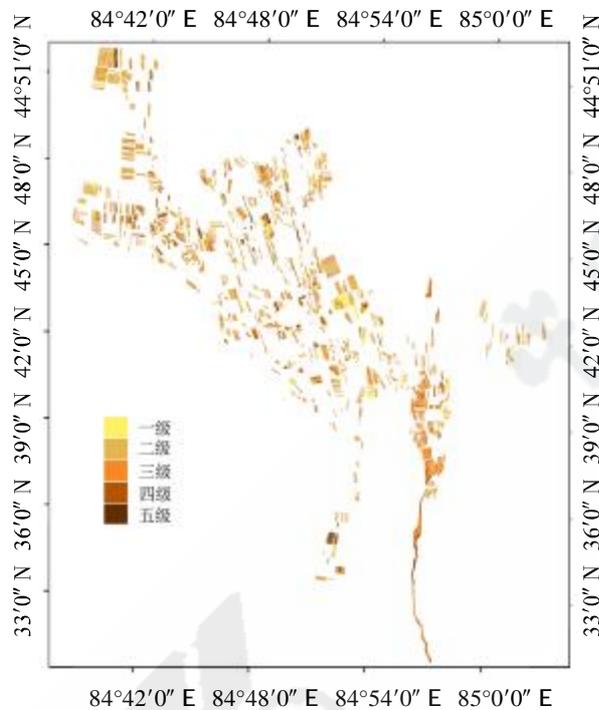


图 1 基于蕾期至盛花期 NDVI 的棉田土壤肥力质量分级专题图(比例尺 1:300000)

Fig. 1 Assessment of soil fertility based on NDVI during different growth stages (plotting scale 1:300000)

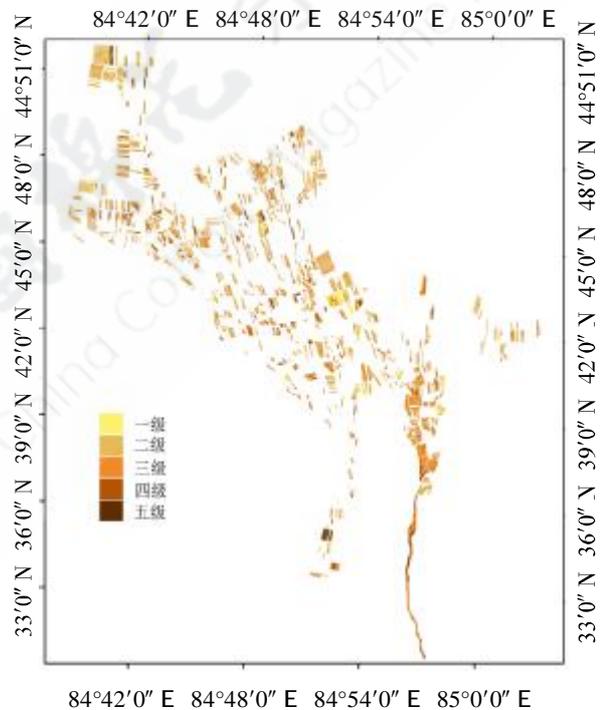


图 2 基于 NDVI 及少量土壤样点数据的评价结果(比例尺 1:300000)

Fig. 2 Assessment of soil fertility based on NDVI and small amount of soil samples (plotting scale 1:300000)

表 2 研究区土壤半方差函数及拟合参数

Table 2 Semi-variogram and the fitting parameters of soil in region

项目 Items	数据转换 Transformation	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value	基台值 Sill value	块金效应 Nugget variance /%	变程 Range /m	标准均方根预测误差 RMSSE
有机质 Soil organic matter	None	球状	0.078	0.135	57.78	731	0.997
碱解氮 Available nitrogen	Box-cox	球状	6.330	9.920	63.81	3436	0.998
速效磷 Available phosphorus	Box-cox	球状	513.440	761.850	67.39	2295	1.023
速效钾 Available potassium	Log	球状	0.064	0.095	67.37	5537	0.956
总盐 Total salt	None	球状	0.034	0.048	70.83	408	0.997

## 2.4 土壤肥力质量综合指数评价结果比较

将 3 种土壤肥力质量评价结果进行比较(表 3)发现,仅使用 NDVI 数据和使用 NDVI 与少量土壤样点数据相结合的评价结果与综合指数法的评价结果大致相同,尤其在肥力质量良好和中等 2 个等级具有较高的一致性;且基于 NDVI 与

少量土壤样点数据相结合的评价结果与综合指数法得到的结果更为接近,只在等级较低的区域略有差异。该结果表明将 NDVI 加入评价指标体系中是可行的,但由于综合指数法采样时间与 NDVI 获取时间略有不同,使土壤肥力等级相对较低的地块评价结果有一定的差异。

表 3 土壤肥力质量评价结果比较

Table 3 Comparison results of soil fertility quality evaluation

评价等级 Grades of the soil fertility	基于不同生长期 NDVI 的棉田 土壤肥力质量评价结果 Assessment of soil fertility based on NDVI during different growth stages		基于 NDVI 及少量土壤样点 数据的评价结果 Assessment of soil fertility based on NDVI and small amount of soil samples		综合指数评价结果 Assessment of the composite index appraisal method	
	像元数 Pixel	占总面积百分比 Total area of percentage /%	像元数 Pixel	占总面积百分比 Total area of percentage /%	像元数 Pixel	占总面积百分比 Total area of percentage /%
	较差(1级)Poor	18774	6.93	29083	10.74	83
中(2级)Average	84118	31.05	90175	33.29	162	33.13
良(3级)Good	119150	43.99	110407	40.76	191	39.06
优(4级、5级)Excellent	48838	18.03	41215	15.22	53	10.84

参考文献:

## 3 讨论

研究表明土壤理化特性与反映棉花生长状态的 NDVI 都具有时间和空间上连续变化的特征<sup>[8]</sup>。与土壤理化不同的是作物的 NDVI 变化程度更强,遥感影像获取的时间、作物种类、长势都会使其发生显著变化。因此本研究探讨将土壤理化数据与棉花不同生育期 NDVI 数据相结合对棉田土壤肥力进行评价的方法。该方法借助遥感数据快速、高效、大尺度的优势,弥补了传统方法在土壤肥力评价中理化指标数据获取耗时、费力等不足;有效提高评价的时效性,可作为快速评价土壤肥力质量的方法。同时该方法也为小麦、玉米等作物农田肥力质量快速评价提供理论参考,为及时、快速监测农田土壤质量变化以及实施变量作业与田间管理提供了技术支撑。

利用 NDVI 与少量采样数据相结合进行评价不仅考虑了与土壤肥力直接相关的理化指标,而且将作物长势状况以及造成棉田长势差异的地形条件等因素也考虑在内,具有一定的科学性。但是土壤是一个复杂而多相的物质系统,河流分布状况、病虫害发生、种植年限等因素都对土壤质量评价产生影响,而这些因子影响土壤质量评价的程度以及如何将这些因子融入评价指标体系还有待进一步研究。

- [1] 赵其国. 土壤与环境问题国际研究概况及其发展趋向[J]. 土壤, 1998(6): 281-290, 310.  
ZHAO Qi-guo. Soil and environmental problems international research situation and development trend [J]. Soil, 1998 (6): 281-290, 310.
- [2] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006(1): 137-143.  
LIU Shi-liang, Fu Bo-jie, Liu Guo-hua, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006(1): 137-143.
- [3] 周勇, 李学垣, 贺纪正, 等. ARC/INFO 信息系统在农地分等定级中的应用[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 450-460.  
ZHOU Yong, Li Xue-yuan, He Ji-zheng, et al. Application of ARC/INFO GIS in grading of agricultural lands [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 450-460.
- [4] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2012, 29(1): 173-180.  
WU Yu-hong, Tian Xiao-hong, Tong Yan-an, et al. Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 29(1): 173-180.
- [5] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 265-269.  
CHEN Yu-Fu, Dong Ming. Spatial pattern and correlation of vegetation characteristics and soil properties in the MU US sandy desert [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(3): 265-269.
- [6] 李欣宇, 宇万太, 李秀珍. 遥感与地统计方法在表层土壤有机碳空间格局研究中的应用比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 148-152.  
LI Xin-yu, Yu Wan-tai, Li Xiu-zhen. Comparison and application of remote sensing and geostatistics methods to spatial distri-

- bution of surface soil organic carbon [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 148-152.
- [7] NUMATA I, Soares J V, Roberts D A, et al. Relationships among soil fertility dynamics and remotely sensed measures across pasture chronosequences in Rondonia, Brazil[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(4): 446-455.
- [8] 张素梅, 王宗明, 张 柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194.  
ZHANG Su-mei, Wang Zong-ming, Zhang Bai, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 188-194.
- [9] 潘文超, 李少昆, 王克如, 等. 基于棉花冠层光谱的土壤氮素监测研究[J]. 棉花学报, 2010, 22(1): 70-76.  
PAN Wen-Chao, Li Shao-kun, Wang Ke-ru, et al. Monitoring soil nitrogen and plant nitrogen based on hyperspectral of cotton canopy [J]. Cotton Science, 2010, 22(1): 70-76.
- [10] 陈 兵, 李少昆, 王克如, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展 [J]. 棉花学报, 2007, 19(1): 57-63.  
CHEN Bing, Li Shao-kun, Wang Ke-ru, et al. Studies of remote sensing on monitoring crop diseases and pests[J]. Cotton Science, 2007, 19(1): 57-63.
- [11] CHEN F, Kissel D E, West L T, et al. Mapping surface soil organic carbon for crop fields with remote sensing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60(1): 51-57.
- [12] SULLIVAN D G, Shaw J N, Rickman D. IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies soil [J]. Science Society of America Journal, 2005, 69(6): 1789-1798.
- [13] 徐 超, 蒋平安, 盛建东, 等. 基于 GIS 的新疆新和县耕地地力等级评价研究[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(4): 343-348.  
XU Chao, Jiang Ping-an, Sheng Jian-dong, et al. A Study on the evaluation of grade of soil fertility of cultivated land based on GIS in Xinhe County of Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(4): 343-348.
- [14] 王 玲. 基于 GIS 和 RS 的干旱区绿洲耕地质量评价方法及应用研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2011: 6.  
WANG Ling. Study on evaluation methods on quality of cultivated land and application in arid oasis based on GIS and RS [D]. Shihezi: Shihezi University, 2011: 6.
- [15] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
DENG Shu-bin. Remote image process based on ENVI[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [16] 陈江鲁, 王克如, 李少昆, 等. 基于宽范围动态植被指数的棉花冠层覆盖度监测[J]. 棉花学报, 2011, 23(3): 265-271.  
CHEN Jiang-lu, Wang Ke-ru, Li Shao-kun, et al. Monitoring of the cotton vegetation fraction based on wide dynamic range vegetation index[J]. Cotton Science, 2011, 23(3): 265-271.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[D]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 62-136.  
Institute of Soil Science, China Academy of Sciences. Soil physical and chemical property analysis[D]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishers, 1987: 62-136.
- [18] 柏军华, 李少昆, 李 静, 等. 基于多时相棉花长势遥感的棉田质量诊断[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1003-1011.  
BAI Jun-hua, Li Shao-kun, Li Jing, et al. Diagnosing cotton field quality with multi-temporal remote sensing data of cotton growth [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41 (4): 1003-1011.
- [19] 王瑞燕, 赵庚星, 陈丽丽. 基于 ANN- 产量的耕地地力定量评价模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 113-118.  
WANG Rui-yan, Zhao Geng-xing, Chen Li-li. Evaluation model of cultivated land fertility using artificial neural network and productivity and its application [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 113-118.
- [20] RICHARD A J. Applied multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Peking University Press, 2008.
- [21] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
XU Jian-ming, Zhang Gan-lin, Xie Zheng-miao, et al. The soil quality indicators and evaluation [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [22] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.  
WU Yu-hong, Tian Xiao-hong, Tong Yan-an, et al. Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29 (1): 173-180.
- [23] 李 梅, 张学雷, 武继承. GIS 支持下豫东地区土壤野外采样布点方法探索[J]. 土壤, 2011, 43(3): 459-465.  
LI Mei, Zhang Xue-lei, Wu Ji-cheng. Sampling point arrangement based on GIS in eastern Henan Province [J]. Soils, 2011, 43(3): 459-465.
- [24] 范君华, 刘 明. 新疆绿洲棉田土壤质量演变规律分析[J]. 中国棉花, 2011, 38(7): 31-34.  
FAN Jun-hua, Liu Ming. Analysis of soil quality evolution of cotton field in the oases of Xinjiang [J]. China Cotton, 2011, 38(7): 31-34.
- [25] 苗 军. 基于 GIS 的最佳选点区域研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009: 4.  
MIAO Jun. The best setpoint area studies based on GIS[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009: 4.
- [26] COMBARDELLA C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501-1511. ●