

基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价

马佳妮¹ 张超^{2,3} 吕雅慧¹ 高璐璐¹ 鄢文聚³ 朱德海^{2,3}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083;
3. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 为客观获得省域耕地质量分布状况,减少时间断点引起的评价误差,构建了一种基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价方法。首先,在耕地图斑约束下,采用时序 LSWI 和 EVI 数据识别水稻和玉米;然后,采用 2000—2010 年 MODIS 的 MOD09A1 数据,结合气象站点数据,利用 VPM 模型分别计算水稻和玉米的净初级生产力 (NPP),并得到多年 NPP 均值,可反映耕地种植作物的常年长势,使用距平分析法消除作物类型差异,得到表征耕地质量的评价结果;最后,以吉林省为研究区,对本文提出的方法进行了实证与分析。实验结果表明,长时间序列 NPP 耕地质量反演结果与耕地质量利用等别整体空间分布一致。其中,吉林省中部与北部由于耕地集中连片,反演结果准确。南部山区耕地斑块破碎,耕地与林地混合,导致反演结果偏高。本文构建的长时间序列 NPP 耕地质量评价方法对省域范围、集中连片耕地质量评价具有可行性,可为我国耕地质量评价提供科学依据。

关键词: 遥感; MODIS; 长时间序列; 净初级生产力; 耕地质量

中图分类号: S29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0202-07

Cultivated Land Quality Evaluation Based on Inversion of NPP
Based on Long-term Sequence Remote Sensing Data

MA Jiani¹ ZHANG Chao^{2,3} LÜ Yahui¹ GAO Lulu¹ YUN Wenju³ ZHU Deihai^{2,3}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The evaluation of cultivated land quality can provide support for the management of cultivated land quality. In order to objectively obtain the distribution of cultivated land quality in the province and reduce the evaluation error caused by time breakpoints, an evaluation method of cultivated land quality was constructed based on NPP inversion of long-term sequence remote sensing data. Firstly, rice and maize were identified by using time-series LSWI and EVI data under the constraints of ploughing maps. Then, the MODIS MOD09A1 data from 2000 to 2010 were used, combined with the meteorological site data, the VPM model was used to calculate the NPP of rice and corn respectively, and the average NPP value was obtained for many years, reflecting the long-term growth of cultivated crops. The anomaly analysis method was used to eliminate the differences in crop types, and the evaluation results of the quality of cultivated land were obtained. Finally, with Jilin Province as the research area, the method proposed was empirically analyzed. The experimental results showed that the long-term sequence NPP cultivated land quality inversion results were consistent with the overall spatial distribution of cultivated land quality utilization. Among them, the inversion results were accurate in the central and northern parts of Jilin Province due to the concentrated arable land. The plaques in the southern mountainous areas were broken, and the cultivated land was mixed with the forest land, resulting in high inversion results. Therefore, the long-term NPP cultivated land quality evaluation method constructed was feasible for the evaluation of provincial and central contiguous arable land quality, and can provide scientific support for the evaluation of cultivated land quality in China.

Key words: remote sensing; MODIS; long-term sequence; NPP; cultivated land quality

收稿日期: 2018-07-20 修回日期: 2018-08-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0206801)

作者简介: 马佳妮(1993—),女,博士生,主要从事 3S 在土地和农业领域的应用研究,E-mail: 2939016298@qq.com

通信作者: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感在土地和农业领域的应用研究,E-mail: zhangchaohj@cau.edu.cn

0 引言

耕地质量管护对耕地数量、质量、生态三位一体保护以及耕地占补平衡具有重要意义,而掌握耕地质量空间分布是耕地质量管护的重要前提。目前,耕地质量监测与评价技术方法仍以区划—布点—调查—评价为主^[1-2],但在样点布设科学性、数据与结果时效性、空间连续性等方面尚存在局限。遥感数据具有覆盖面积大、获取数据快、时空连续的特点,可有效弥补传统方式的不足,为耕地质量监测与评价提供有效手段。

基于遥感的耕地质量监测与评价研究主要包括耕地质量指标遥感监测和耕地质量遥感反演。在耕地质量指标监测中,黄健熙等^[3]利用多年蒸散发产品结合年度有效灌溉数据评价区域灌溉能力;吕雅慧等^[4]采用 0.5 m 的 GEO Eye-1 影像,构建归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)与二维熵的决策树,实现了耕地质量重要内容农田林网的自动识别;杨建峰等^[5]通过建立多光谱遥感影像波段与有机质含量、地形坡度、表层土壤质地的反演模型,获得了耕地质量自然等。以上通过遥感数据信息提取与波段信息反演解决了部分指标获取困难的问题。此外,还有通过遥感数据直接监测和评价耕地质量相关研究,林晨等^[6]建立了基于 MODIS 数据的耕地质量自然等反演模型。以上耕地质量监测与评价多以一个时间断点,忽略了时间断点数据不稳定性与评价结果的时效性。

已有学者将多期遥感数据应用于土地监测与评价^[7-11]。研究表明,净初级生产力(NPP)较 NDVI 更能全面反映作物长势,已广泛应用于农田生产力评价^[12-13]。以上研究采用时序数据弥补了时间断点数据的不稳定性,但利用植被指数表征全域各类土地质量状况,忽略了不同作物监测指标的差异,造成结果的不可比性。耕地质量各构成要素的特点和相互间的影响,决定了耕地质量的外在表现^[14]。耕地质量包含自然质量、利用质量与经济质量等^[15]。而作物长势是耕地质量利用的外在表现,产量与产能是反映耕地质量的重要指标。依据吉林省气象站点物候统计,吉林省玉米与水稻生长期为 5—9 月。农田 NPP 在作物生长期变化明显^[16],耕地质量影响因素如田间施肥、灌溉等人为因素和土壤理化性质在作物生长期变化明显。多年作物生长期的 NPP 体现了多年影响耕地质量的各因素对作物的贡献程度,间接评价了耕地质量。因此,本文选择吉林省为研究区,采用 2000—2010 年 5—9 月 500 m 的

MODIS MOD09A1 遥感数据,结合气象站点数据,构建省域耕地质量利用等评价方法,考虑不同作物植被指数差异,分别计算反映不同作物长势的指标,经距平分析法消除量纲,利用反映多年作物长势的 NPP 评价耕地质量。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

选择吉林省为研究区,地理位置为东经 121°38′~131°19′,北纬 40°50′~46°19′,如图 1 所示。吉林省属于温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季。多年平均气温 2~6℃,降水量 400~900 mm。以中部大黑山为界分为东部山区与西部平原。全省耕地共 553.5 万 hm²,占吉林省面积 28.98%。70% 耕地分布在中、西部平原地区。全省耕地主要为旱地和水田。耕作制度为一年一熟制,种植结构稳定,主要农作物有玉米和水稻等,粮食单产地区间差异大,粮食平均单产在全国处于中等偏下水平。耕地质量利用等别分布在 8~13 等别。耕地后备资源相对充足,有 31 万 hm²耕地后备资源。

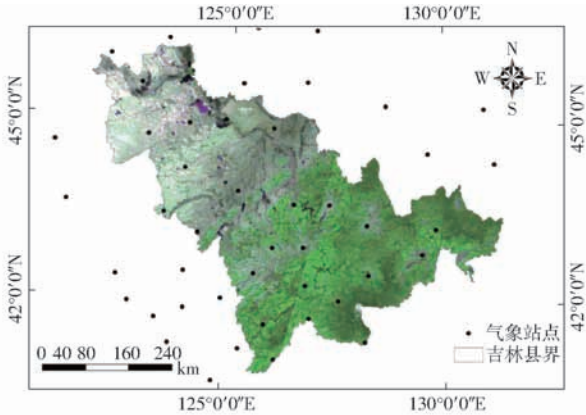


图 1 研究区位示意图

Fig. 1 Geographical distribution map of study area

1.2 数据源

1.2.1 遥感数据

采用 2000—2010 年玉米与水稻生长期 5—9 月的 8 d 合成 500 m 分辨率 MODIS 地表反射率产品 MOD09A1(www.gscloud.cn),共 215 景。经投影转换、镶嵌、重采样预处理后,形成 2000—2010 年长时间序列遥感数据集。

1.2.2 气象数据

气象数据来源于中国气象科学数据共享网,包括吉林省内与周边共 51 个国家气象站点,包括 2000—2010 年间逐日最大温度、最小温度、总辐射量、日照时数等数据。

1.2.3 光合有效辐射数据等

光合有效辐射数据(Photosynthetically active

radiation, PAR)是利用晴空指数、太阳高度角与日照时数建立的估算模型而得^[17]。其他数据包括2013年吉林省农用地等别成果中的国家利用等别数据以及吉林省行政边界数据。

2 研究方法

NPP 是植物光合作用所固定的有机物总量扣除植物自养呼吸后的剩余部分。单年 NPP 值易受气候等因素影响,用于评价长期稳定的耕地质量误差较大。计算 2000—2010 年的 NPP 均值评价耕地质量可减少气候等因素引起的不确定性。基于影像计算每 8 d 的 NPP 值,经累加求得年 NPP 值,通过计算多年 NPP 均值,评价耕地质量。由于 NPP 受作物类型的影响^[18-20],需对研究区主要作物水稻(C3)与玉米(C4)进行分类,利用不同作物生长期对指数响应程度不同,构建基于时序指数的分类特征,并采用决策树主要区分水稻与玉米,剩余少量大豆与水稻均为 C3 作物。不同作物类型(主要分 C3 和 C4)分别利用植被光合作用模型(Vegetation photosynthesis model,VPM)计算 NPP,并经累加计算 2000—2010 年 NPP 年累积量。后经距平分析法去除作物类型间差异,结果用于评价耕地质量利用等别。相应的技术路线如图 2 所示。

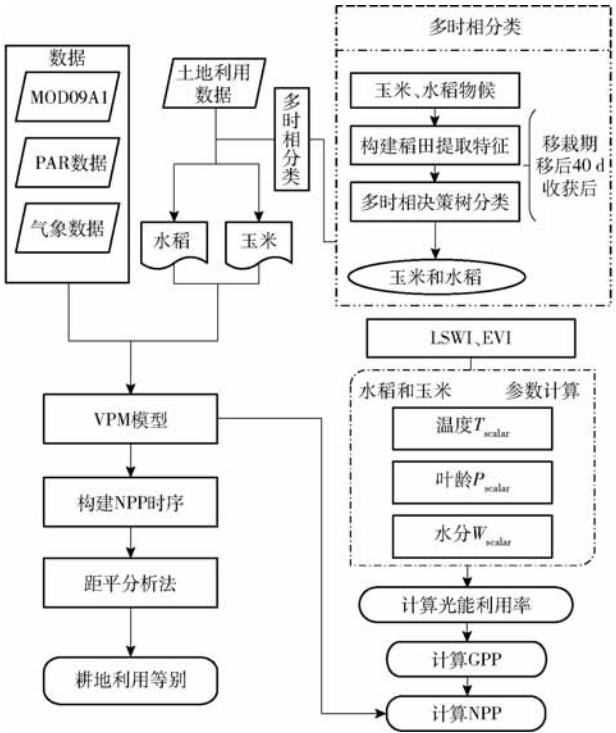


图2 技术路线图
Fig.2 Flow chart of method

2.1 基于时序遥感数据的水稻与玉米识别

由于水稻、玉米的光合作用过程、光能利用率、积温等差异,导致两种作物类型计算 NPP 不同,所

以首先利用多时相进行农作物分类。通过构建增强植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)、地表水指数(Land surface water index, LSWI)与 NDVI 时序数据集,选取水稻移栽期、移栽期后 40 d 及收获后为关键时期,采用决策树分类区分水稻和玉米。

2.1.1 遥感指数计算

利用 MODIS 数据计算 NDVI、EVI 和 LSWI,计算公式为

NDVI = (R_NIR - R_R) / (R_NIR + R_R) (1)

EVI = (2.5(R_NIR - R_R) / (R_NIR + 6R_R - 7.5R_B + 1)) (2)

LSWI = (R_NIR - R_SWIR) / (R_NIR + R_SWIR) (3)

式中 R_B——蓝波段波长(459~479 nm)
R_R——红波段波长(620~670 nm)
R_{NIR}——近红外波段波长(841~876 nm)
R_{SWIR}——短波红外波段波长(1 628~1 652 nm)

尽管 8 d 合成 MODIS 数据最大限度削弱低云、云阴影、气溶胶等对图像质量的影响,然而 6、7 月存在长时间云覆盖情况,故利用 S-G 滤波消除云的影响^[21]。

2.1.2 基于时序指数的水稻玉米分类

依据水稻与玉米物候期时序变化差异(图 3),采用关键生育期 LSWI 和 EVI 进行作物分类。选择水稻移栽期、移栽期后 40 d 及收获后作为分类关键期。移栽期水稻田因灌水存有 2~15 cm 积水^[22],LSWI 时序曲线出现突增,EVI 出现突降。采用 EVI-LSWI≤0.05 作为特征参量。移栽 40 d 后,水稻进入返青期,分蘖数逐渐增加,EVI 迅速增大,该时段利用 EVI>0.5EVI_{max} 作为分类特征。在收获后期,利用 NDVI<0.6,采用决策树实现作物分类。

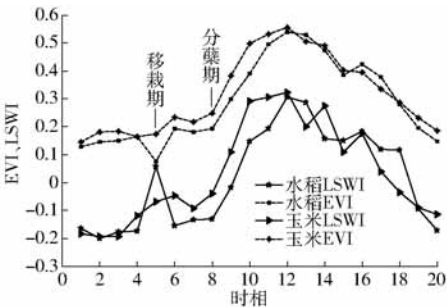


图3 水稻与玉米时序图
Fig.3 Rice and corn timing chart

2.2 NPP 计算

VPM 是基于遥感数据进行 NPP 估算的光能利用率模型^[23]。首先计算

GPP = ε_g FPAR_{chl} PAR (4)

其中 FPAR_{chl} = aEVI (5)

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 W_{\text{scalar}} T_{\text{scalar}} P_{\text{scalar}} \quad (6)$$
$$P_{\text{scalar}} = \begin{cases} \frac{1 + LSWI}{2} & (t < t_{lswimax}) \\ 1 & (t \geq t_{lswimax}) \end{cases}$$
$$W_{\text{scalar}} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{\text{max}}}$$
$$T_{\text{scalar}} = \frac{(T - T_{\text{min}})(T - T_{\text{max}})}{(T - T_{\text{min}})(T - T_{\text{max}}) - (T - T_{\text{opt}})^2} \quad (7)$$

式中 ε_g ——光能利用率, g/MJ, 受温度、叶龄与水分的影响
 $FPAR_{\text{chl}}$ ——植被光合的部分吸收光合有效辐射比例
 a ——系数, 取 1
 ε_0 ——植被最大光能利用率, g/MJ, C4 植物最大光能利用率高于 C3 植物^[24], 玉米与水稻的 ε_0 分别为 3.65 g/MJ 和 1.15 g/MJ^[25-26]
 T_{scalar} ——温度系数
 W_{scalar} ——水分系数
 P_{scalar} ——叶龄系数
 $t_{lswimax}$ ——叶面完全伸展时期
 $T_{\text{min}}、T_{\text{max}}、T_{\text{opt}}$ ——作物的最低温、最高温、最适温^[27], 玉米、水稻的最低温分别为 0、-3℃, 最高温为 45、42℃, 最适温为 23、16℃

2.3 耕地质量利用等别评价

计算水稻与玉米年 NPP 累积量后,通过距平分析法消除作物类型间的量纲,即

$$D = \frac{NPP - \overline{NPP}}{\overline{NPP}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 $\overline{NPP}$ ——11 年 NPP 均值
 $\overline{NPP}$ ——相同作物类型图层 NPP 均值
 D ——像元距平百分率

最终根据 D 值参照农用地等别的分级标准得到耕地质量的评价结果。

3 实验结果与分析

3.1 多时相遥感作物分类

由于水稻和玉米是吉林省主要作物,多年种植结构稳定,故采用 2006 年分类结果作为 11 年后续研究的基础数据。分类样本来源于实地采样结合现有耕地图斑,分类结果如图 4 所示,总体分类精度为 80.56%,Kappa 系数为 0.7。吉林省玉米面积为 70.75 万 hm^2 ,水稻面积 32.82 万 hm^2 。玉米种植区

集中在北部白城市、中部松原市。水稻种植区位于中东部通榆市、德惠市与中西部四平市,处于松花江与东辽河两侧。

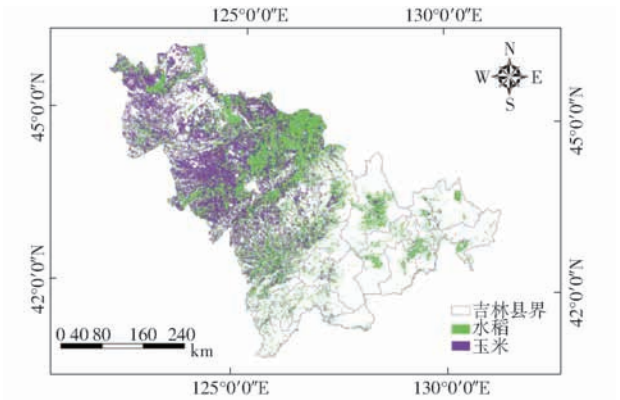


图 4 2006 年吉林省水稻玉米分布图
Fig. 4 Rice and maize distribution map of Jilin Province in 2006

3.2 VPM 模型计算 NPP

利用 VPM 模型计算 8 d NPP。后经累加得到年 NPP 值。并生成 2000—2010 年吉林省 NPP 空间分布图,如图 5 所示,全域 NPP 累积量在 [0,507.249] 之间。

3.3 耕地质量评价

利用距平分析法将归一化后的 D 值作为表征耕地质量。并与 2013 年农用地分等中吉林省耕地质量利用等对比验证。为与吉林省国家利用等别等级一致,按照吉林省国家利用等别各等别面积占比,将耕地质量反演结果分为 9 个等别,分别对应吉林省国家利用等的 6~14 等别,6 为最高等别,按序等别降低。从图 6b 可见,全域耕地质量呈阶梯状分布。北部白城市与松原市耕地质量处于 11~14 等别。中部长春市、四平市耕地质量处于 9~10 等别,少量分布 8、12 等别。南部地区在 9~14 等别都有分布,主要集中在 10~13 等别。北部与南部质量低,中部质量高。由图 6 可得,反演结果与国家利用等别在整体空间分布较为一致,北部反演结果集中在 9~12 等别,说明南部整体反演等级偏高,主要是由于南部耕地零碎分散并存在于耕地与林地混合的像元导致反演结果偏高。对比发现,两种结果在吉林省北部均处于 9~12 等别,但 2013 年吉林省农用地分等国家利用等别的结果位于北部的乾安县整体处 13~14 等别,与周边县等级差异较大。图 6a 中北部的评价结果空间连续,符合耕地质量实际分布。图 6b 中县域存在异常值的原因是现有耕地质量评价是以县域为评价单元,各县在指标获取与计算的差异造成县域结果整体偏高或偏低。本文方法可检验县域评价结果异常。

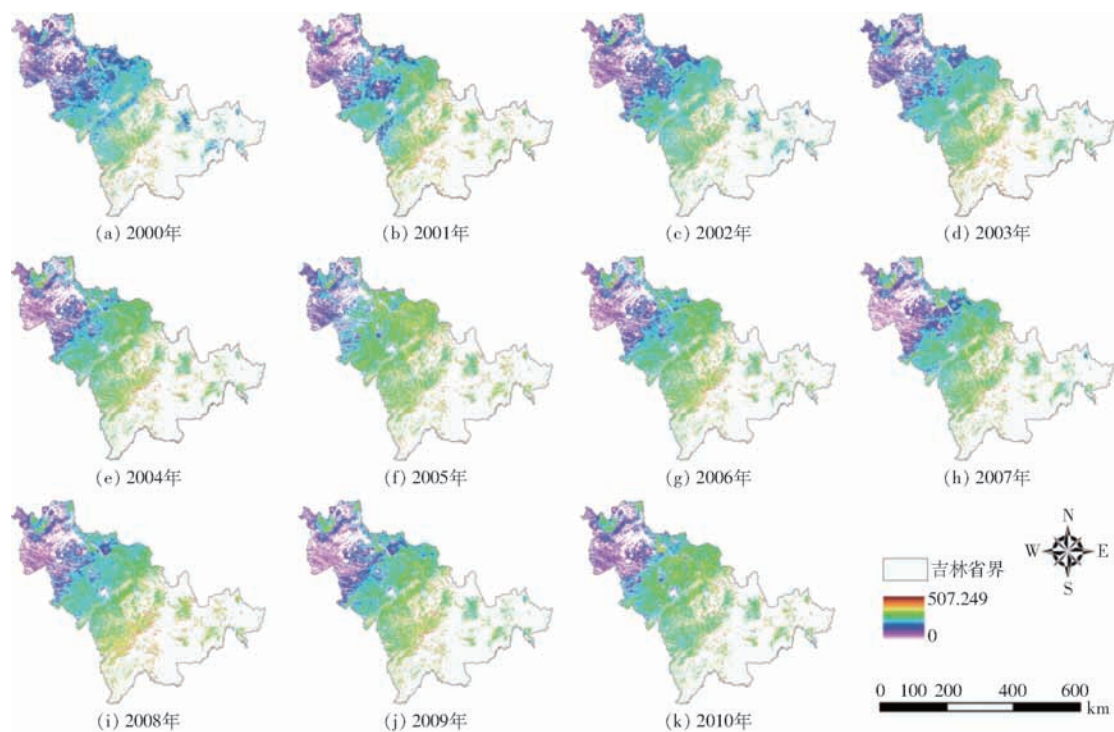


图5 2000—2010年吉林省累积NPP空间分布

Fig. 5 Cumulative NPP spatial distribution during 2000—2010 in Jilin Province

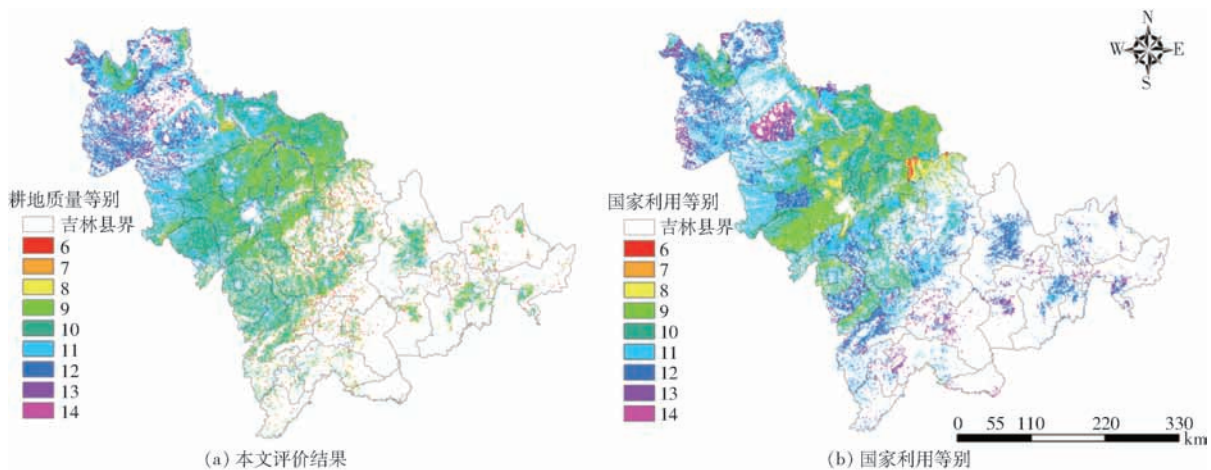


图6 本文评价结果与2013年吉林省农用地分等国家利用等别对比

Fig. 6 Comparison of evaluation results with utilization of agricultural land in Jilin Province in 2013

采用反演结果等级与农用地分等成果等别之差,评价构建方法的可靠性。空间分布如图7所示,级差大于2的区域主要集中在南部的敦化市、汪清县、柳河县、桦甸市,中部的公主岭市及北部镇赉县。说明本文的评价结果高于农用地分等结果,主要因为耕地零散破碎,林地NPP高于耕地NPP,耕地与林地混合像元造成反演结果较高。级差小于-2的区域在中部的蛟河市与北部的洮南市。

如图8所示,级差在-1~1级有73.72%耕地,级差-2~2级的耕地面积有17.01%,级差在3级及以上的耕地占9.27%,说明本文提出方法的评价结果与农用地分等中的分级结果具有较好的吻合度。

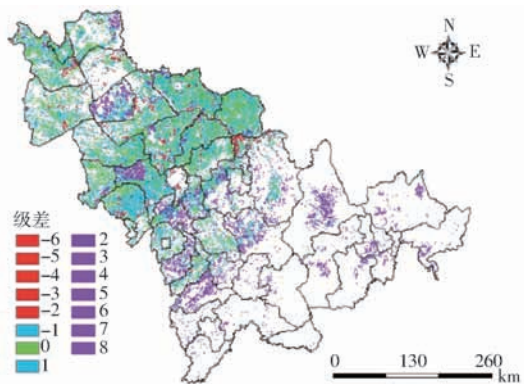


图7 本文评价结果与2013年吉林省农用地分等国家利用等级级差分布

Fig. 7 Inversion results and spatial distribution of difference in utilization of agricultural land in Jilin Province in 2013

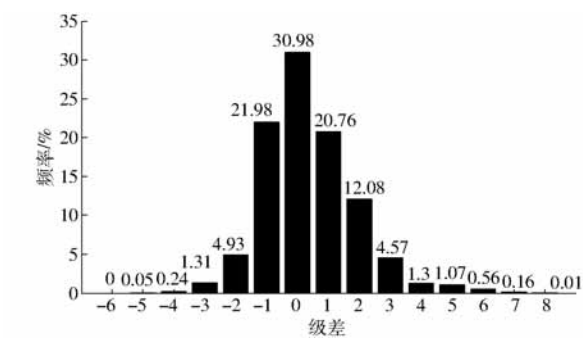


图 8 级差概率分布

Fig. 8 Level difference probability distribution

4 结论

(1)构建了利用长时间影像数据集耕地质量评价方法,通过监测多年反映作物长势的 NPP 表征耕地质量。在耕地集中连片的平原地区评价结果与现有数据结果一致,同时表明,500 m 的遥感数据可用于平原耕地集中连片区域的耕地质量监测与评价。

(2)利用多时序植被指数作物分类,选择水稻

移栽期、移栽期后 40 d 及收获后作为关键生育期,移栽期未被稻苗遮挡的田间积水,在影像上可作为区别水稻田与旱地的特征。移栽期后 40 d,水稻处于急速生长的分蘖期。收获后田间使用 LSWI、EVI、NDVI 指数特征参与分类,最终的分类精度达 80.56%。

(3)采用 2000—2010 年 MOD09A1 影像数据,结合气象站点数据,经 VPM 模型计算水稻和玉米 NPP 值,并得到多年 NPP 累积量。使用距平分析法消除作物类型差异,以此表征耕地质量,并对其结果的合理性进行验证,结果表明,该方法适合评价吉林省中部与北部等平原地区,在耕地质量评价方面具有可行性。

(4)基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价,利用多年作物长势间接反映耕地质量,避免单年评价的偶然性,提高了准确性。同时利用覆盖全域的 MODIS 影像,有效解决了省域耕地质量不可比、评价由点及面与评价周期长等问题。在获取耕地质量空间分布的同时,可以获得耕地质量时空演变过程。

参 考 文 献

[1] 张玉臻,刘树明,孔祥斌,等. 基于监测单元划分方法的耕地质量监测效率研究——以内蒙古自治区开鲁县为例[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9):154-163.
ZHANG Yuzhen, LIU Shuming, KONG Xiangbin, et al. Monitoring efficient study of arable land quality based on the monitoring unit division method: a case study of Kailu County in Inner Mongolia[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9):154-163. (in Chinese)

[2] 赵小娟,叶云,周晋皓,等. 珠三角丘陵区耕地质量综合评价及指标权重敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):226-235.
ZHAO Xiaojuan, YE Yun, ZHOU Jinhao, et al. Comprehensive evaluation of cultivated land quality and sensitivity analysis of index weight in hilly region of Pearl River Delta[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(8):226-235. (in Chinese)

[3] 黄健熙,李荔,张超,等. 基于遥感蒸散发数据的耕地灌溉保证能力评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):100-106.
HUANG Jianxi, LI Li, ZHANG Chao, et al. Evaluation of cultivated land irrigation guarantee capability based on remote sensing evapotranspiration data[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(5):100-106. (in Chinese)

[4] 吕雅慧,张超,郑文聚,等. 高分辨率遥感影像农田林网自动识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(1):157-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.020.
LÜ Yahui, ZHANG Chao, YUN Wenju, et al. Automatic recognition of farmland shelterbelts in high spatial resolution remote sensing data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):157-163. (in Chinese)

[5] 杨建锋,马军成,王令超. 基于多光谱遥感的耕地等别识别评价因素研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17):230-236.
YANG Jianfeng, MA Juncheng, WANG Lingchao. Evaluation factors for cultivated land grade identification based on multi-spectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(17):230-236. (in Chinese)

[6] 林晨,周生路,吴绍华. 基于 MODIS 影像的农用地自然质量动态快速监测研究[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(1):116-121.
LIN Chen, ZHOU Shenglu, WU Shaohua. Application research of MODIS data in monitoring agricultural land resources dynamically[J]. Areal Research and Development, 2011, 30(1):116-121. (in Chinese)

[7] 杜心栋. 中国农用地整理对耕地产能提升影响研究[D]. 南京:南京大学, 2016.
DU Xindong. Research on the effectiveness of cropland consolidation for improving productivity in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. (in Chinese)

[8] 花锦溪,臧淑英,那晓东. 基于 MODIS 时间序列的松嫩平原盐渍地提取[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(2):67-71.
HUA Jinxi, ZANG Shuying, NA Xiaodong. Saline soil extraction using MODIS NDVI time series data in Songnen plain[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(2): 67-71. (in Chinese)

[9] 王蕊,李红军,雷玉平. 基于多年 MODIS-NDVI 分级的河北平原农田生产力评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5):1175-1181.

- WANG Rui, LI Hongjun, LEI Yuping. Evaluation of cropland productivity in the Hebei Plain via graded multi-year MODIS - NDVI data[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1175 - 1181. (in Chinese)
- [10] 康婷婷, 居为民, 张春华. 2001—2011 年中国农田最大光能利用率参数时空变化特征[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 663 - 671.
- KANG Tingting, JU Weimin, ZHANG Chunhua. Study on the spatial and temporal variations of china's cropland maximum light use efficiency in 2001—2011[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 663 - 671. (in Chinese)
- [11] TURNER D P, RITTS W D, COHEN W B, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3): 282 - 292.
- [12] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄玫, 等. 基于 MODIS - OLI 遥感数据融合技术的农田生产力估算[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875 - 885.
- NIU Zhongen, YAN Huimin, HUANG Mei, et al. Agricultural productivity estimation with MODIS - OLI fusion data[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 875 - 885. (in Chinese)
- [13] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 等. 2001—2010 年中国农田生态系统 NPP 的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 319 - 330.
- WANG Yihong, SHI Xuezheng, WANG Meiyang, et al. Spatio-temporal variation of NPP in cropland ecosystem China during the years from 2001 to 2010[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 54(2): 319 - 330. (in Chinese)
- [14] 张晓沛, 彭茹燕, 朱德海, 等. 耕地质量构成要素间的影响分析——以吉林省前郭县为例[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 269 - 273.
- ZHANG Xiaopei, PENG Ruyan, ZHU Dehai, et al. Analysis of correlative influence of component factors of cultural land quality—taking Qianguo County of Jilin Province as an example[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(2): 269 - 273. (in Chinese)
- [15] 相慧, 孔祥斌, 陈培雄, 等. 县域耕地质量等别监测样点布控研究——以内蒙古自治区达拉特旗为例[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1203 - 1210.
- XIANG Hui, KONG Xiangbin, CHEN Peixiong, et al. Establishing monitoring samples of arable land at the county level: a case study of Dalate district in Inner Mongolia[J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1203 - 1210. (in Chinese)
- [16] WAGLE P, XIAO X, TORN M S, et al. Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 1 - 14.
- [17] 唐利琴, 刘慧, 胡波, 等. 1961—2014 年中国光合有效辐射重构数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2017, 2(3): 1 - 12. DOI: 10.11922/csdata.170.2017.0135.
- TANG Liqin, LIU Hui, HU Bo, et al. Reconstructed data of photosynthetically active radiation in China (1961—2014) [J/OL]. Chinese Science Data, 2017, 2(3): 1 - 12. (in Chinese)
- [18] 白洁. 干旱区绿洲扩张对农田生态系统碳收支的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- BAI Jie. The effects of oasis extension on carbon budgets of oasis field ecosystem in arid regions dissertation submitted [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [19] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 等. 河南农田生产力时空变化的遥感分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(11): 67 - 71.
- WEI Hejie, ZHANG Yanfang, ZHU Ni, et al. Temporal-spatial changes of farmland productivity in Henan Province using MODIS data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(11): 67 - 71. (in Chinese)
- [20] PAN Y, LI L, ZHANG J, et al. Winter wheat area estimation from MODIS - EVI time series data using the crop proportion phenology index[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119(3): 232 - 242.
- [21] QUAN W T, ZHOU H, HONGNEI L I, et al. Remote recognition and growth monitoring of winter wheat in key stages based on S G filter in Guanzhong region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 93 - 99.
- [22] 邬明权, 王长耀, 牛铮. 利用多源时序遥感数据提取大范围水稻种植面积[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 240 - 244.
- WU Mingquan, WANG Changyao, NIU Zheng. Mapping paddy fields in large areas, based on time series multi-sensors data [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 240 - 244. (in Chinese)
- [23] XIAO X, BOLES S, FROLKING S, et al. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 95 - 113.
- [24] YAN H, FU Y, XIAO X, et al. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂, eddy flux tower data[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 391 - 400.
- [25] 欧阳旭, 张亚茹, 李跃林. 基于生物质能的芒属植物碳动态和收支研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1633 - 1638.
- OUYANG Xu, ZHANG Yaru, LI Yuelin. A review on carbon dynamics and budget of biomass energy species of *Miscanthus* spp. [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(9): 1633 - 1638. (in Chinese)
- [26] ZHU W, PAN Y, HE H, et al. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 457 - 463.
- [27] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 等. 中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732 - 742.
- CHEN Jingqing, YAN Huimin, WANG Shaoqiang, et al. Estimation of gross primary productivity in Chinese terrestrial ecosystems by using VPM model[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 732 - 742. (in Chinese)