

玉米冠层 LAI 反演中 UAV 影像镜面反射去除方法

苏伟^{1,2} 谢芷萱^{1,2} 王伟^{1,2} 金添^{1,2} 王新盛^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对玉米叶片反射太阳光时因镜面反射导致获得的无人机影像反射率中存在与冠层结构无关的镜面反射部分, 从而影响玉米冠层 LAI 的反演精度问题, 本研究利用小波变换对无人机影像不同波段的阈值设置, 在不影响漫反射的前提下削弱镜面反射成分, 尽量只保留与冠层结构有关的反射率成分。以 2018 年 7 月 15 日和 7 月 26 日获取的河北农业大学辛集试验站多光谱无人机影像为数据源, 构建了 NDVI、GNDVI、SAVI 和 EVI 4 个植被指数, 并分别与 $\ln(LAI)$ 构建玉米冠层的单变量反演模型, 利用决定系数和均方根误差进行 LAI 反演精度评价。精度评价结果表明, 在 7 月 15 日玉米植株较稀疏时, 去除镜面反射后, 4 个植被指数反演 LAI 与实测 LAI 的决定系数分别从 0.719 0、0.559 8、0.624 1、0.598 5 上升至 0.763 3、0.694 0、0.649 7、0.619 4, 均方根误差分别从 0.224 4、0.252 6、0.221 4、0.224 5 下降到 0.188 0、0.195 8、0.191 8、0.198 7, 说明去除镜面反射可以提高 LAI 的反演精度。在 7 月 26 日玉米植株相对茂密时, 去除镜面反射后, 4 个指数构建模型对应的决定系数也同样提高, 但在这种情况下, NDVI 和 GNDVI 容易发生饱和, 用阈值法降低反射率反而会加剧饱和现象, 使这 2 个指数不能充分反映 LAI 的变化。SAVI 和 EVI 因为加入了冠层背景调整因子, 植被指数的变化得到放大, 二者在去除镜面反射后与 $\ln(LAI)$ 拟合模型的决定系数都达到 0.6 以上, 因此, 在植被覆盖较茂密时, SAVI 指数和 EVI 指数更适合用于 LAI 反演。

关键词: 无人机影像; 叶面积指数; 反演; 镜面反射去除; 小波变换

中图分类号: TP79; S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)05-0173-09

OSID:



Specular Reflection Removal of UAV Image in Corn Canopy LAI Inversion

SU Wei^{1,2} XIE Zixuan^{1,2} WANG Wei^{1,2} JIN Tian^{1,2} WANG Xinsheng^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of accuracy of inversion of corn canopy LAI, it is necessary to study the effect of specular reflection on the image reflectance of unmanned aerial vehicle (UAV), which is independent of canopy structure. The wavelet transform was used to set the threshold of different bands of UAV image, and the specular reflection was weakened without affecting the diffuse reflection. The vegetation indices: NDVI, GNDVI, SAVI and EVI were constructed by using multi-spectral UAV images of the Hebei Agricultural University Xinji Test Station acquired on July 15th and 26th, 2018. The single-variable inversion model of maize canopy LAI was constructed, and the accuracy of LAI inversion was evaluated by R^2 and RMSE. The results showed that when the maize plants were sparse on July 15th, the R^2 of vegetation indices and measured LAI after removing specular reflection were raised from 0.719 0, 0.559 8, 0.624 1 and 0.598 5 to 0.763 3, 0.694 0, 0.649 7 and 0.619 4, and the RMSE was also decreased from 0.224 4, 0.252 6, 0.221 4 and 0.224 5 to 0.188 0, 0.195 8, 0.191 8 and 0.198 7, which showed that removing specular reflection can improve the accuracy of LAI inversion. On July 26th, when the maize plants were relatively dense, the R^2 of the four indices were also increased after the removal of specular reflection, which proved that the removal of specular reflection could improve the correlation between vegetation indices and LAI. However, in this case, NDVI and GNDVI tended to be saturated, and reducing the reflectivity by threshold method would aggravate the saturation phenomenon, so the two indices could not fully reflect the change of LAI. Meanwhile, SAVI and EVI were amplified by

收稿日期: 2019-09-10 修回日期: 2019-11-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300903)、国家自然科学基金项目(41671433)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019TC117, 2019TC138)

作者简介: 苏伟(1979—), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业遥感和激光雷达农业应用研究, E-mail: suwei@cau.edu.cn

adding a canopy background adjustment factor, and their R^2 of fitting model with $\ln(LAI)$ were both over 0.6 after removing specular reflection. Thus SAVI and EVI were more suitable for LAI inversion when vegetation cover was dense.

Key words: unmanned aerial vehicle image; leaf area index; inversion; specular reflection removal; wavelet transform

0 引言

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)遥感以其机动灵活、快速高效、成本低等优势逐渐成为获取小范围农田高空间分辨率遥感影像的重要手段。相比传统卫星遥感影像,无人机遥感影像的作业周期较短,使用时间灵活,便于根据实际需要获取影像^[1]。另外,其影像空间分辨率较高,可用于反演作物冠层叶面积指数(Leaf area index, LAI)、叶绿素含量、株高等信息,对实现地块级别的农作物精准管理具有很大优势^[2-3]。LAI是单位地表面上植物叶面面积的总和^[4],可以反映作物长势,也可以为产量预测提供依据^[5-6]。目前,利用多光谱遥感影像反演叶面积指数的方法主要有两类:基于植被指数的统计方法和基于物理模型的辐射传输率模型法^[7]。前者优势在于简单、快速,但存在易受土壤干扰、植被指数易饱和等缺点^[8]。后者则是基于严格的物理和数学推导,其优势在于不受植被类型和空间范围的局限,但其本质是一个病态反演过程,存在解的不唯一性^[9],并且输入参数较多,不易操作。本文选择基于植被指数的统计回归方法进行玉米冠层 LAI 反演。

基于植被指数的 LAI 的反演精度受很多因素影响,如土壤背景的干扰、传感器的光谱响应函数等。为提高反演精度,有学者提出了各种改进方法。文献[10]将植被指数与 LAI 用 BP 神经网络模型进行训练,结果显示,此次方法对玉米冠层 LAI 具有较好的反演结果,但遥感影像反射率存在镜面反射。文献[11]测量了玉米叶片的散射分布,发现叶片表面反射是非朗伯的,玉米叶片的镜面反射在可见光波段可达 50%。还有学者提出,叶片上的蜡质层会影响 PROSPECT 5 模型的模拟精度^[12],并认为蜡质层的存在是按树叶片中色素浓度估计误差的主要来源^[13]。文献[14]分别对构树、银杏和常春油麻藤进行了实验,证明不同表面粗糙度的叶片都存在一定程度的镜面反射。并认为,镜面反射的存在会影响叶绿素反演的精度,当通过偏振消除镜面反射后,各方向上的叶绿素反演精度都得到提升。

因此,为提高玉米冠层 LAI 反演精度,预处理后的无人机影像需要进一步去除镜面反射成分。有研

究通过识别高亮区域,将高亮区域去除,并利用周围信息补全来去除镜面反射^[15],也有研究通过偏振的方法去除镜面反射^[14],二者都取得了较好的效果。但是这两种方法对于星下点成像的无人机影像均不适用。小波变换是通过对空间(时间)频率的局部化分析,分离影像中的主要特征和次要特征,因此有学者提出使用小波变换法去除遥感影像的镜面反射成分^[16-17],且都已证明小波变换对于去除镜面反射的确有效。基于此,本文利用小波变换去除部分无人机影像上玉米冠层的镜面反射成分,以期提高玉米冠层 LAI 反演精度。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

研究区位于河北省辛集市河北农业大学辛集试验站,地理范围为 $115^{\circ}17'58'' \sim 115^{\circ}18'4''E$, $37^{\circ}47'50'' \sim 37^{\circ}47'55''N$,地理位置如图 1 所示。该试验站位于华北平原,地势平坦,气候四季分明,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年平均气温约 $12.5^{\circ}C$,属于暖温带半湿润大陆性气候。该区域的主要耕作方式是冬小麦和夏玉米轮作,无人机影像获取时研究区内的作物全部为玉米。

1.2 数据源

1.2.1 无人机影像

课题组分别在 2018 年 7 月 15 日和 7 月 26 日获取了研究区的无人机影像。获取影像时天气晴朗无云,飞行时间均为 12:00 左右,时间跨度为 20 min,飞行高度为 50 m。研究区面积约为 6.67 hm^2 ,所使用的无人机影像由一个架次影像拼接而成。无人机所搭载的传感器为 Parrot Sequoia+,其获取的多光谱数据包含 4 个波段,分别为绿、红、红边和近红外波段,其波段信息如表 1 所示。采集的原始影像的空间分辨率为 $0.055 \text{ m} \times 0.055 \text{ m}$,但由于 GPS 定位精度限制以及背景土壤的干扰,为解决尺度差异问题将无人机影像的空间分辨率转换为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 。

1.2.2 野外测量数据

在获取无人机影像的同时,进行玉米冠层参数的野外实地测量,测量参数包括 LAI、玉米叶片光谱、冠层光谱等,测量位置利用差分 GPS 进行精准

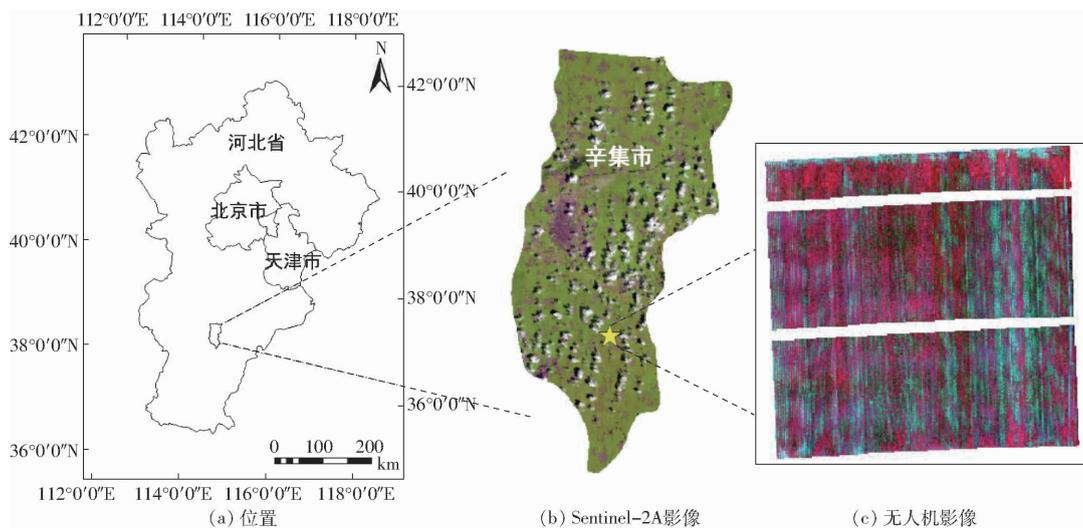


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of study area

表1 UAV 影像波段光谱参数

Tab. 1 Bands of UAV remote sensing image nm

波段	中心波长	波段宽度
绿 (Green)	550	40
红 (Red)	660	40
红边 (Red-edge)	735	10
近红外 (NIR)	790	40

定位。将研究区按照田埂和种植间隔划分成小格,每格内的种植品种、种植密度和灌溉情况等基本相同,故尽量在每一格中都选取样本点。LAI 测量采用美国 Li-cor 公司生产的 LAI2000 型植物冠层分析仪,测量时选取 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小样方,分别在样方的4个角和中心位置测量 LAI,取均值作为中心点的 LAI。LAI 测量的同时,利用华测 i80 型差分 GPS 接收机准确记录中心位置的地理坐标。数据预处理过程中剔除误差过大的噪声点,最终得到7月15日的54个样本点数据和7月26日的72个样本点数据,取其中 $1/4$ 样本点用于反演精度评价,另外 $3/4$ 用于与 $\ln(LAI)$ 构建模型。取验证点时也尽量保持均匀分布,随机选取。

2 模型与方法

2.1 镜面反射去除方法

镜面反射指的是在强光源入射时,在其与法线对称的方向上形成强烈反射,这种情况多出现于光滑的表面^[18],如水面和蜡质层覆盖明显的叶片。叶片引起的镜面反射只携带了叶片表面的信息,此部分反射没有与细胞、叶绿素和水等作用,与叶片的结构无关^[19],无法反映叶片内部情况,因而在 LAI 等参数反演时,镜面反射的存在会影响反演精度。现有的大部分研究中镜面反射的去除多是针对水面的

情况,然而水面出现镜面反射的情况多会出现水体高光,在部分区域达到反射率饱和^[20]。与此相比,无人机影像获取影像中出现的镜面反射并不会形成如此强烈的高光。一方面是由于研究区种植的作物是玉米,而玉米叶片为革质叶片,并带有细小的绒毛,表面不如水面光滑;另一方面是因为玉米拥有多片叶,叶片的倾斜方向不相同,且不同植株之间的叶片相互交叠,反射情况复杂,发生镜面反射的方向也不相同,导致在玉米冠层中各个方向的镜面反射会混合在一起。所以,实际获得的无人机影像将包含两部分的反射,一部分是不含有效信息的镜面反射,另一部分为包含玉米冠层有效信息的漫反射。

2.2 PROSAIL 辐射传输模型

PROSAIL 模型是一个由 PROSPECT 模型和 SAIL 模型耦合而适用于模拟植被冠层反射率的模型^[9],它综合考虑了叶片的生化参数、植被冠层结构和二向散射特性等条件,可以通过输入 LAI、太阳天顶角、观测天顶角、叶绿素含量等参数反演出样本点的反射率。该模型根据辐射传输理论,模拟了光在植被冠层中的传播^[21],其反演的反射率与叶片结构有关,能够反映叶片的生长情况。因此,本文将实测的 LAI 和其他生理生化参数的经验值作为模型的输入值,对样本点进行反射率的反演,得到的结果可近似于漫反射部分,作为镜面反射去除后精度验证的依据。

2.3 植被指数构建

已有大量研究表明,植被指数与 LAI 有较好的相关性^[4, 8, 22],考虑到无人机影像只有绿波段、红波段、近红外波段和红边波段,所以选取由这4个波段构成的且与 LAI 有较好相关性的归一化植被指数 (NDVI)^[18]、增强型植被指数 (EVI)^[4]、土壤调节植

被指数(SAVI)^[8]和绿通道植被指数(GNDVI)^[18]进行相关性研究。

2.4 小波变换

由于实测光谱中包含部分土壤背景的反射率,可能会引起测量的冠层反射率增加。另外模型模拟时对叶片光学特性的假设必然与实际情况有所不同,也可能导致实测反射率与模拟的反射率有偏差。另外玉米叶片并非理想的漫反射体,而是表面带有毛刺等结构,这使得叶片反射率有明显的镜面反射或者后向散射等非朗伯体特征。而本实验所采用的PROSAIL模型反演中存在描述土壤背景的参数,对于土壤的影响已进行了模拟,而镜面反射部分没有考虑。所以本文对影像进行小波变换,通过设置阈值来去除这部分镜面反射成分。

本文基于离散小波变换,将原始影像进行分解,分别得到了低频分量、水平高频分量、垂直高频分量和对角线高频分量。对低频分量采用阈值法去除影像中包含的镜面反射,即去除分量中小于阈值的部分。而阈值法通常可分为软阈值法和硬阈值法^[22],本文选择软阈值法对低频分量进行处理,即将低于阈值的分量置零,高于阈值分量的绝对值减去阈值。最后将去除部分信号后的低频分量重新与高频分量组合,通过小波反变换重建变换为空间域影像。

2.5 模型的评价标准

文献[23]指出比值型植被指数和归一化植被指数与LAI及其自然对数 $\ln(LAI)$ 的相关性存在差异,比值型植被指数应与LAI建立线性回归关系,而归一化类植被指数应与 $\ln(LAI)$ 建立回归关系。本文选择的4个植被指数都可以认为是归一化类的植被指数,所以都将与 $\ln(LAI)$ 进行线性回归拟合。

本文选用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)2个指标来反映植被指数与 $\ln(LAI)$ 的相关性水平。其中RMSE可以反映数据集的离散程度,其值越小,说明模型的精度越高。而 R^2 表示了相关的密切程度,当 R^2 越接近1时,表示相关的方程式参考价值越高;相反,越接近0时,表示参考价值越低。

3 结果与分析

3.1 小波变换阈值设置

将提取的无人机影像样本点的反射率与同一样本点上PROSAIL模型反演的反射率进行对比,如图2所示。从图2可以看出,原始影像的反射率明显高于模型反演的反射率,说明镜面反射的确存在于无人机影像中。其中红波段和绿波段的模型反演值和影像提取的值相差较小,而近红外波段和红边波段的差相对较大。

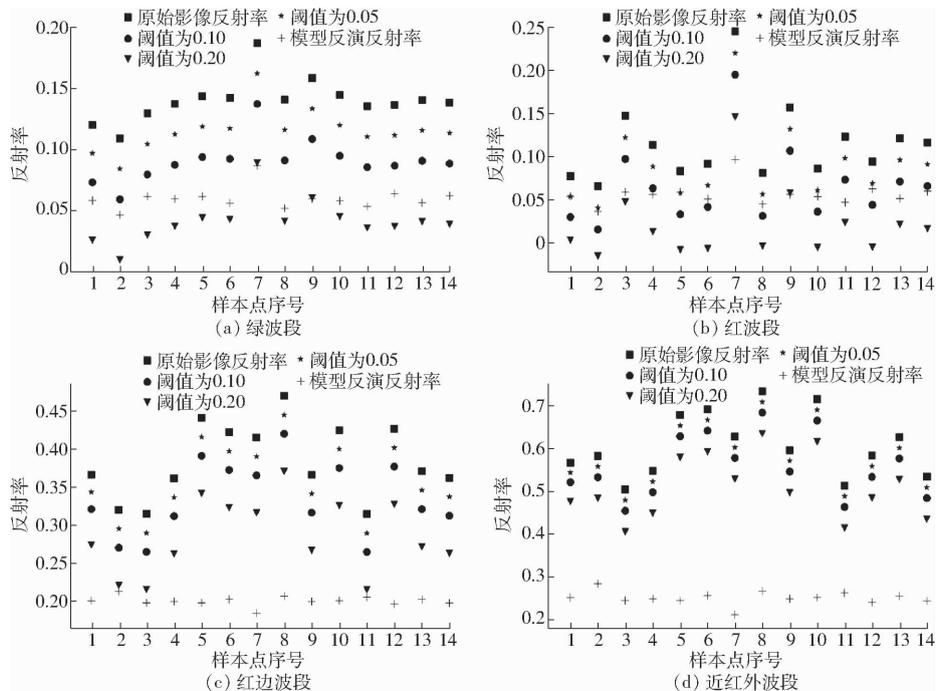


图2 小波变换后样本点上反射率对比

Fig. 2 Comparison of reflectivity after wavelet at sample points

本文共设置了3个阈值:0.05、0.1和0.2,将重建后影像的样本点反射率分别与原始影像和PROSAIL模型反演的反射率进行对比,得到的结果如图2所示。可以发现小波变换可以有效地降低反

射率,使其更接近于模型反演的结果,从而削弱镜面反射带来的影响。从图2可以看出,当阈值为0.2时,绿波段和红波段原始影像的反射率与PROSAIL模型反演的反射率接近。而对于近红外波段和红边

波段来说,当阈值为 0.2 时,其反射率仍然整体高于模型反演结果。从提取结果来考虑,本文选择 0.2 为去除镜面反射最佳的阈值。

3.2 基于不同植被指数的 LAI 反演结果分析

基于 7 月 15 日无人机影像得到的 4 个植被指数与实测 LAI 的自然对数 $\ln(LAI)$ 建立的回归模型如表 2 所示,散点图如图 3 所示。4 个指数与 $\ln(LAI)$ 都呈正相关关系,说明随着植被指数的增长, $\ln(LAI)$ 也随之线性增长,则 LAI 也呈指数型增长。从决定系数来看,4 个线性拟合方程的决定系数都超过了 0.5,说明这 4 个植被指数与 LAI 的拟合程度较好,植被指数与 LAI 的相关性较大。其中 NDVI 的决定系数最高,达到了 0.719 0,说明 NDVI 与 LAI 的相关性最好,而决定系数最低的是

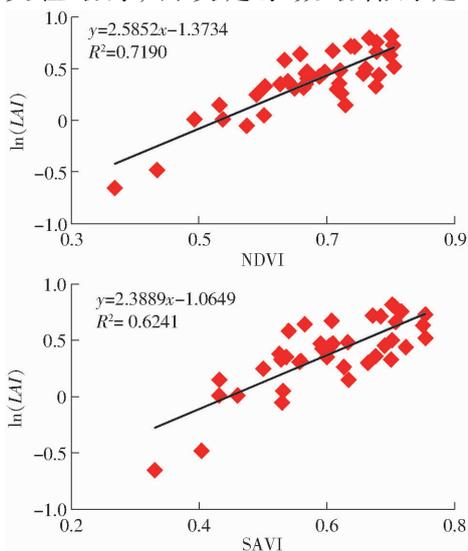


图 3 7 月 15 日植被指数与 $\ln(LAI)$ 相关性 & 精度验证散点图

Fig. 3 Correlation of vegetation indices with $\ln(LAI)$ on July 15th

基于 7 月 26 日获取的无人机影像计算的植被指数与 $\ln(LAI)$ 之间的回归关系如表 3 所示,样本的散点图如图 4 所示。同样,对于该无人机影像来说,4 个指数同样与 $\ln(LAI)$ 呈正相关。从决定系数来看,相比于 7 月 15 日,由 26 日影像得到的拟合方程的决定系数都明显偏低,说明随着 LAI 的增大,这 4 个植被指数与 LAI 的拟合程度下降。NDVI、EVI 和 SAVI 拟合的模型决定系数都为 0.46 左右,而

表 3 7 月 26 日植被指数与 $\ln(LAI)$ 的相关关系与 LAI 反演精度评价结果

Tab.3 Correlation of four vegetation indexes with in-situ measured LAI and estimation accuracy on July 26th

植被指数	线性拟合方程	决定系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)
NDVI	$y = 5.8119x - 4.0492$	0.4677	0.2508
EVI	$y = 2.0968x - 0.6459$	0.4647	0.2111
SAVI	$y = 2.9477x - 1.0846$	0.4604	0.2097
GNDVI	$y = 5.2481x - 2.7395$	0.4802	0.2438

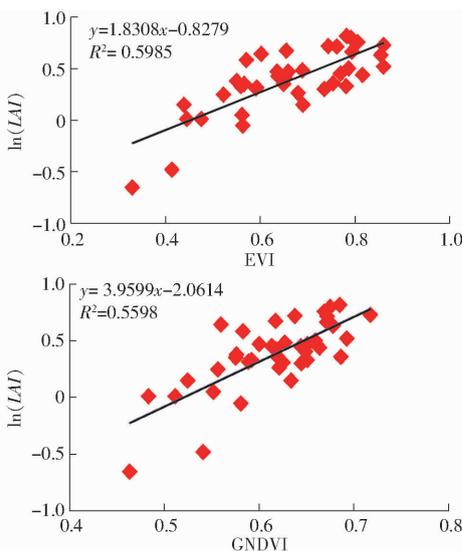
GNDVI,决定系数为 0.559 8。从均方根误差来看,4 个拟合方程的均方根误差都为 0.22 左右,说明这 4 个回归模型对 LAI 的解释能力都较好。

表 2 7 月 15 日植被指数与 $\ln(LAI)$ 的相关关系与 LAI 反演精度评价结果

Tab.2 Correlation of four vegetation indexes with in-situ measured LAI and estimation accuracy on July 15th

植被指数	线性拟合方程	决定系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)
NDVI	$y = 2.5852x - 1.3734$	0.7190	0.2244
EVI	$y = 1.8308x - 0.8279$	0.5985	0.2245
SAVI	$y = 2.3889x - 1.0649$	0.6241	0.2214
GNDVI	$y = 3.9599x - 2.0614$	0.5598	0.2526

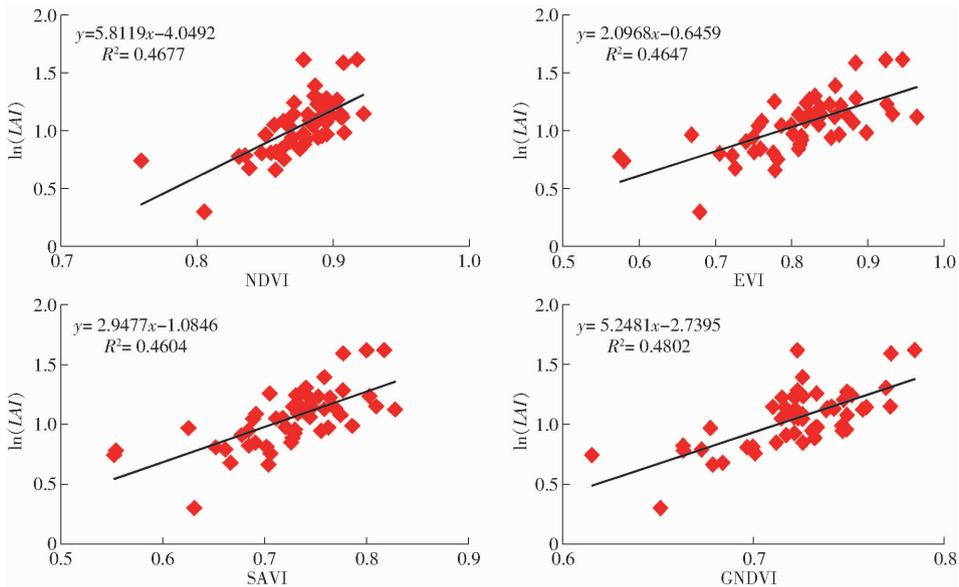
注: x 为相应的植被指数, y 为 $\ln(LAI)$, 下同。



GNDVI 最高,为 0.480 2。另一方面,4 个指数拟合模型的均方根误差为 0.209 7 ~ 0.250 8,其中最低的是 SAVI,说明 4 个回归模型对 LAI 的解释能力相对较好。从以上 2 幅影像模型模拟结果来看,在植株覆盖较稀疏时 NDVI 在反演 LAI 上更具优势,而当植株覆盖相对茂密时,4 个指数中,GNDVI 和 SAVI 更为适合。

3.3 去除镜面反射后与实测 LAI 的比较分析

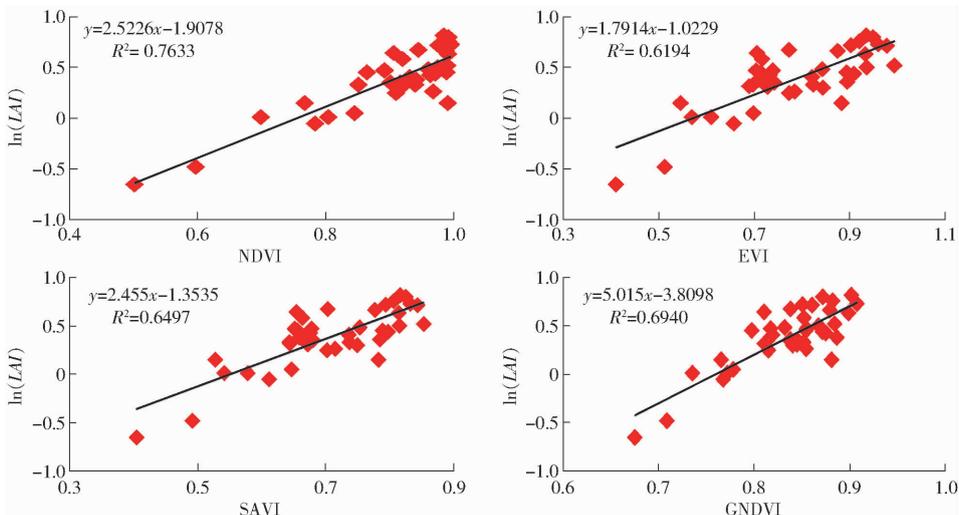
用去除部分镜面反射后的 4 个波段构建植被指数,将样本点的植被指数与 $\ln(LAI)$ 进行相关性分析,得到的结果如表 4 所示。4 个指数的线性拟合方程中,决定系数最高的仍然是 NDVI,但是经过小波变换处理后的影像拟合的方程决定系数由 0.719 0 提高至 0.763 3,说明相关性增大,同时均方根误差也降低到了 0.188 0,反演的精度得到提高。另外 3 个植被指数的决定系数也有一定程度的提升,GNDVI 拟合方程的决定系数提高较多,由 0.559 8

图4 7月26日植被指数与 $\ln(LAI)$ 相关性及其精度验证散点图Fig. 4 Correlation of vegetation indices with $\ln(LAI)$ on July 26th表4 7月15日小波变换后植被指数与 $\ln(LAI)$ 的模型反演结果与精度检验结果

Tab. 4 Estimation models after wavelet of corn LAI and accuracy assessment result on July 15th

植被指数	线性拟合方程	决定系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)
NDVI	$y = 2.5226x - 1.9078$	0.7633	0.188
EVI	$y = 1.7914x - 1.0229$	0.6194	0.1987
SAVI	$y = 2.455x - 1.3535$	0.6497	0.1918
GNDVI	$y = 5.015x - 3.8098$	0.6940	0.1958

提高到0.6940,而SAVI和EVI拟合方程的决定系数也分别提高到了0.6497和0.6194。4个决定系数都超过了0.6,说明去除镜面反射的确可以提高植被指数与LAI的相关性,且相关性较高。从均方根误差的角度来看,4个植被指数对应的均方根误

图5 7月15日小波变换后植被指数与 $\ln(LAI)$ 相关性及其精度验证散点图Fig. 5 Correlation of vegetation indices after wavelet transform with $\ln(LAI)$ on July 15th

差也都一定程度地下降,说明处理后植被指数的反演精度得到提升。从图5来看,样本点上的NDVI和GNDVI相比未处理影像更接近饱和,其中NDVI已存在饱和现象,但是其反演精度依然得到提升。从决定系数和均方根误差来看,在玉米植株较稀疏时,在4个指数中NDVI最适合用于反演LAI。

同样对7月26日影像和野外实测LAI也进行了相关性分析,得到的结果如表5所示。从结果可以看出,4个指数对应的决定系数都有所增加,再次证明了去除镜面反射可以提高植被指数与LAI的相关性。EVI对应的决定系数由0.4647提高到了0.6007,SAVI对应的决定系数也由0.4604提高到了0.6040,这2个指数的提升幅度较大,而相对的,NDVI和GNDVI对应的决定系数提升不明显。从图6可以看出,GNDVI和NDVI均方根

误差大,并且相比上一时段饱和现象更为严重,NDVI的平均值达到0.94,GNDVI的平均值也达到了0.82。文献[24]指出在LAI较大,即植被较茂密的区域,NDVI容易达到饱和,对LAI的变化反映不灵敏。因为在植被茂密的区域,近红外波段的反射率远高于红波段的反射率,归一化植被指数对红波段的变化不敏感。同理对GNDVI来说,近红外的反射率仍远高于绿波段,使得GNDVI的值虽然小于NDVI但是对绿波段的变化也不敏感。从图2可以看到,在去除镜面反射后,红波段和绿波段的反射率较低,接近0,而近红外波段的反射率仍然较高,这加剧了NDVI和GNDVI的饱和,其相关性反而降低。而SAVI和EVI考虑了土壤背景因素,植被指

表5 7月26日小波变换后植被指数与ln(LAI)的模型反演结果与精度检验结果

Tab.5 Estimation models after wavelet of corn LAI and accuracy assessment result on July 26th

植被指数	线性拟合方程	决定系数 (R ²)	均方根误差 (RMSE)
NDVI	$y = 5.6065x - 4.2415$	0.4760	0.2615
EVI	$y = 2.4532x - 0.7205$	0.6007	0.2019
SAVI	$y = 3.3125x - 1.1578$	0.6040	0.2018
GNDVI	$y = 5.5155x - 3.4771$	0.4292	0.2470

数的变化得到调节,在植株茂密区域不易达到饱和,相关性提高。所以在玉米植株覆盖较茂密时,选用EVI和SAVI来反演LAI更为合适。

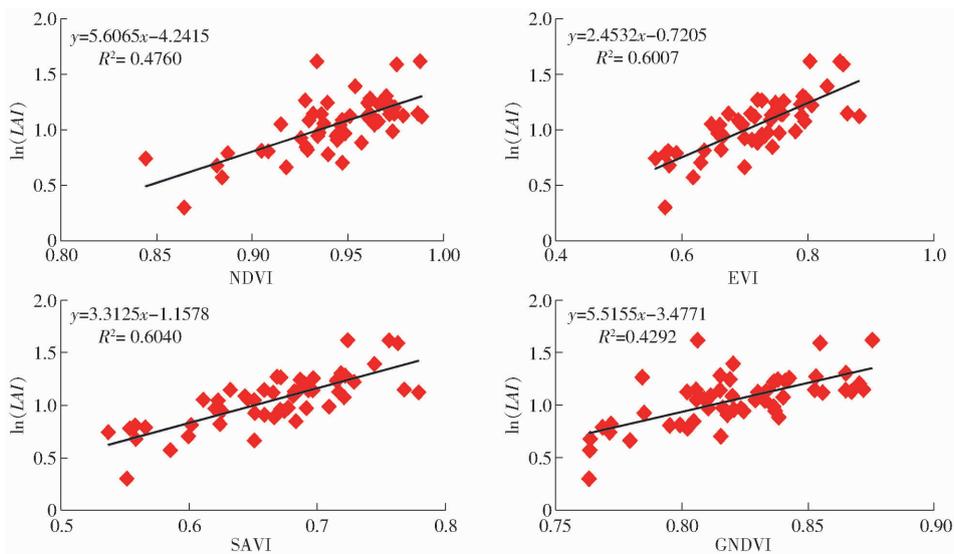


图6 7月26日小波变换后植被指数与ln(LAI)相关性及其精度验证散点图

Fig.6 Correlation of vegetation indices after wavelet transform with ln(LAI) on July 26th

3.4 LAI反演结果分析

通过以上分析,证明了小波变换可以去除影像中的部分镜面反射,从而提高LAI的反演精度。所以本文分别选择由NDVI构建的模型 $y = 2.5226x -$

1.9078对7月15日影像进行LAI反演,和由SAVI构建的模型 $y = 3.3125x - 1.1578$ 对7月26日影像进行LAI反演,得到的结果见图7。7月15日影像反演的LAI取值在0.012~1.85之间,大部分区

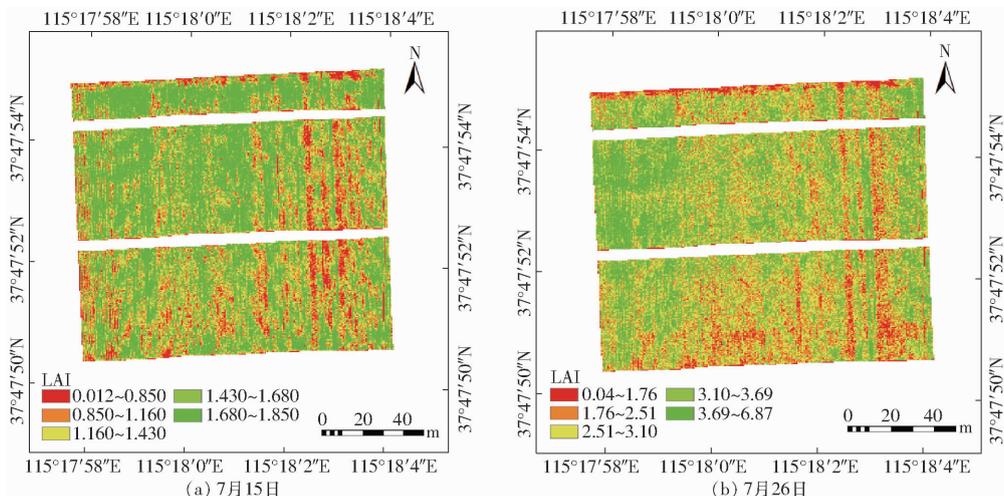


图7 基于NDVI,SAVI植被指数的玉米冠层LAI反演结果

Fig.7 Retrieved maize canopy LAI using NDVI and SAVI

域的 LAI 都集中在 1.68 ~ 1.85 区间内。而 7 月 26 日影像反演的 LAI 取值在 0.04 ~ 6.87 之间,多数区域的取值范围为 0.51 ~ 0.67。

4 结论

(1) 对于原始影像而言,在玉米植株较稀疏时,4 个植被指数与 $\ln(LAI)$ 的决定系数均较高,在反演 LAI 时具有一定的可信度。其中 NDVI 与 $\ln(LAI)$ 呈现良好的相关关系,而 GNDVI 与 $\ln(LAI)$ 的相关性相对较小。在玉米植株相对茂密时,4 个植被指数与 $\ln(LAI)$ 的相关性减小,对应的决定系数相差不大,其中 GNDVI 的决定系数相对较高。

(2) 对 7 月 15 日的无人机影像去除镜面反射后,4 个植被指数与 $\ln(LAI)$ 拟合模型的决定系数均提高,说明去除镜面反射的确能提高植被指数与 LAI 的相关性。其中,NDVI 与 $\ln(LAI)$ 拟合的模型决定系数达到了 0.763 3,在 4 个指数中决定系数最高,此外其他 3 个指数拟合模型的决定系数也都提

高到 0.6 以上。而对 7 月 26 日的无人机影像去除镜面反射后,4 个指数与 $\ln(LAI)$ 拟合模型的决定系数同样提高,再次证明了去除镜面反射可以提高与 LAI 相关性。在玉米植株较茂密的区域使用小波变换方法会加剧 NDVI 和 GNDVI 的饱和现象,而 SAVI 和 EVI 由于考虑了土壤等背景因素的影响,通过系数将植被指数的变化放大,饱和现象不如 NDVI 和 GNDVI 严重。因此,在植被相对茂密的情况下 SAVI 和 EVI 更适合反演 LAI。

(3) 用小波变换结合阈值法能够去除镜面反射,从而提高了植被指数 LAI 的反演精度。这种方法在玉米植株较稀疏的情况下效果较好,且使用 NDVI 反演 LAI 能得到较好效果;而在植株茂密的情况下易出现植被指数饱和,使用 EVI 和 SAVI 反演 LAI 效果更好。由于未进行物理实验验证,故无法对小波变换去除镜面反射的效果定量描述,后续工作将对实验进行补充。

参 考 文 献

- [1] 高林,杨贵军,于海洋,等. 基于无人机高光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 113 - 120. GAO Lin, YANG Guijun, YU Haiyang, et al. Retrieving winter wheat leaf area index based on unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 113 - 120. (in Chinese)
- [2] 韩文霆,李广,苑梦婷,等. 基于无人机遥感技术的玉米种植信息提取方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 139 - 147. HAN Wenting, LI Guang, YUAN Mengchan, et al. Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 139 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.018. (in Chinese)
- [3] 刘建刚,赵春江,杨贵军,等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98 - 106. LIU Jian'gang, ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 98 - 106. (in Chinese)
- [4] 贺佳,刘冰锋,李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 141 - 150. HE Jia, LIU Bingfeng, LI Jun. Monitoring model of leaf area index of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 141 - 150. (in Chinese)
- [5] 李凤秀,张柏,宋开山,等. 基于垂直植被指数的东北黑土区玉米 LAI 反演模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008(3): 33 - 38, 54. LI Xiufeng, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Retrieval model for estimating corn LAI in black soil region of Northeast China based on perpendicular vegetation index[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008(3): 33 - 38, 54. (in Chinese)
- [6] 唐怡,黄文江,刘良云,等. 株型对冬小麦冠层叶面积指数与植被指数关系的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006(5): 130 - 136. TANG Yi, HUANG Wenjiang, LIU Liangyun, et al. Influence of plant geometry on relationships between LAI and VIs in wheat canopy[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006(5): 130 - 136. (in Chinese)
- [7] 贾玉秋,李冰,程永政,等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 173 - 179. JIA Yuqiu, LI Bing, CHENG Yongzheng, et al. Comparison between GF-1 images and Landsat-8 images in monitoring maize LAI[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 173 - 179. (in Chinese)
- [8] 束美艳,顾晓鹤,孙林,等. 基于新型植被指数的冬小麦 LAI 高光谱反演[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3486 - 3496. SHU Meiyang, GU Xiaohu, SUN Lin, et al. High spectral inversion of winter wheat LAI based on new vegetation index[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(18): 3486 - 3496. (in Chinese)
- [9] 李亚妮,鲁蕾,刘勇. 基于 PROSAIL 模型的水稻田埂帽三角-叶面积指数模型及其应用[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3976 - 3984. LI Yani, LU Lei, LIU Yong. Tasseled cap triangle (TCT) leaf area index (LAI) model of rice fields based on PROSAIL model and its application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3976 - 3984. (in Chinese)
- [10] 张琪. 基于无人机遥感的玉米表型信息提取技术研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2017. ZHANG Qi, The research on extraction of maize phenotypic information based on unmanned aerial vehicle [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 谢东辉,王培娟,覃文汉,等. 叶片非朗伯特特性影响冠层辐射分布的辐射度模型模拟与分析[J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 868 - 874. XIE Donghui, WANG Peijuan, QIN Wenhan, et al. A study on the radiance distribution in the canopy affected by non-lambert

- characteristics of leaf based on RGM[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(6): 868 – 874. (in Chinese)
- [12] JACQUEMOU D, STEPHAN E, VEHOE F, et al. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: S56 – S66.
- [13] BARRY K, NEWNHAM G. Quantification of chlorophyll and carotenoid pigments in eucalyptus foliage with the radiative transfer model PROSPECT 5 is affected by anthocyanin and epicuticular waxes[C] // *Proceedings of the Geospatial Science Research Symposium-GSR_2*, 2012.
- [14] LI Y, CHEN Y, HUANG J. An approach to improve leaf pigment content retrieval by removing specular reflectance through polarization measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 99: 1 – 14.
- [15] WANG S, YU C, SUN Y, et al. Specular reflection removal of ocean surface remote sensing images from UAVs[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2018, 77(3): 11363 – 11379.
- [16] LI Y, HUANG J. Remote sensing of pigment content at a leaf scale: comparison among some specular removal and specular reflection methods[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 983.
- [17] LI D, CHENG T, JIA M, et al. PROCWT: Coupling PROSPECT with continuous wavelet transform to improve the retrieval of foliar chemistry from leaf bidirectional reflectance spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 1 – 14.
- [18] 陈玉泉, 季耿善, 杨静, 等. 水体遥感的镜面反射特性研究[J]. *环境遥感*, 1994(3): 195 – 202.
CHEN Yuquan, JI Gengshan, YANG Jing, et al. A study of remote sensing on water body mirror reflection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994(3): 195 – 202. (in Chinese)
- [19] 邓钧元. 蜡质层覆盖明显叶片的镜面反射特性研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
DENG Junyuan. The study of specular reflection from waxy layer covered leaf[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012. (in Chinese)
- [20] 周建彤. 无人机影像水体高光去除方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
ZHOU Jiantong. Study on the removal method of water highlight in unmanned-aerial-vehicle image[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [21] FERET J B, FRANÇOIS C, ASNER G P, et al. PROSPECT – 4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 112(6): 3030 – 3043.
- [22] 丁妍, 程明霄, 朱倩, 等. 基于在线拉曼光谱仪预测石脑油组成的方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(12): 69 – 72.
DING Yan, CHENG Mingxiao, ZHU Qian, et al. Research on method of composition prediction of naphtha based on online Raman spectrometer[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(12): 69 – 72. (in Chinese)
- [23] 陈拉, 黄敬峰, 王秀珍. 不同传感器的模拟植被指数对水稻叶面积指数的估测精度和敏感性分析[J]. *遥感学报*, 2008, 12(1): 143 – 151.
CHEN La, HUANG Jinfeng, WANG Xiuzhen. Estimating accuracies and sensitivity analysis of regression models fitted by simulated vegetation indices of different sensors to rice LAI[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1): 143 – 151. (in Chinese)
- [24] 杨嘉, 郭锐, 黄蕾诺, 等. 西北地区 MODIS – NDVI 指数饱和问题分析[J]. *高原气象*, 2008(4): 896 – 903.
YANG Jia, GUO Ni, HUANG Leinu, et al. An analyses on MODIS – NDVI index saturation in Northwest China[J]. *Plateau Meteorology*, 2008(4): 896 – 903. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 231 页)

- [15] 乌云娜, 李政海. 锡林郭勒草原景观多样性的时间变化[J]. *植物生态学报*, 2000, 4(1): 58 – 63.  
WU Yunna, LI Zhenghai. Temporal change of grassland landscape diversity in Xilinguole [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 4(1): 58 – 63. (in Chinese)
- [16] 刘学录. 盐化草地景观中的斑块形状指数及其生态学意义[J]. *草业科学*, 2000, 17(2): 50 – 56.  
LIU Xuelu. Patch shape index and its ecological significance in salinized grassland landscape [J]. *Grassland Science*, 2000, 17(2): 50 – 56. (in Chinese)
- [17] 杨欢, 刘学录. 基于分形理论的云南红河县景观斑块尺度效应[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2636 – 2644.  
YANG Huan, LIU Xuelu. Scale effect of landscape patches in Honghe County, Yunnan Province based on fractal theory [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2636 – 2644. (in Chinese)
- [18] WU Jianguo. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations[J]. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2): 125 – 138.
- [19] 杨莎莎, 汤萃文, 刘丽娟, 等. 流域尺度上河流水质与土地利用的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1953 – 1961.  
YANG Shasha, TANG Cuiwen, LIU Lijuan, et al. The relationship between river water quality and land use on a watershed scale [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1953 – 1961. (in Chinese)
- [20] SANTIAGO S, MARTÍNEZ-MILLÁN J. Landscape patterns simulation with a modified random clusters method [J]. *Landscape Ecology*, 2000, 15(7): 661 – 667.
- [21] 常学礼, 张安定, 杨华, 等. 科尔沁沙地景观研究中的尺度效应[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 635 – 641.  
CHANG Xueli, ZHANG Anding, YANG Hua, et al. Scale effect in landscape research of Horqin sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 635 – 641. (in Chinese)
- [22] 于兴修, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 典型流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应——以浙江省西苕溪流域为例[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 13 – 19.  
YU Xingxiu, YANG Guishan, LI Hengpeng, et al. Land use/cover change and its landscape ecological effect in typical watershed: a case study of Xitiaoxi watershed in Zhejiang Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 13 – 19. (in Chinese)