

基于优化指数的玉米冠层含水量遥感估测

吴见^{1,2}, 谭靖³, 邓凯^{1,2}, 徐建辉^{1,2}

(1. 滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000; 2. 安徽省地理信息集成应用协同创新中心, 安徽 滁州 239000; 3. 北京航天泰坦科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 对北京怀柔县 EO-1 Hyperion 高光谱数据进行波段筛选和植被含水量指数计算, 采用耦合叶片与冠层辐射传输模型对水分指数(WI)、归一化差值水分指数(NDWI)、归一化植被指数(NDVI)、水应力指数(MSI)、归一化差值近红外指数(NDII)和冠层结构(CSI)的玉米冠层含水量估测能力进行分析, 在不同理化参数的敏感性分析的基础上, 将 MCARI 和 NDWI 进行整合, 以完成玉米冠层含水量估测。结果表明, NDVI 和 CSI 不能对玉米冠层含水量进行估测, NDII、WI、NDWI、MSI 对玉米冠层含水量估测的 R^2 值均大于 0.78, 但估测的 RMSE 值均在 0.015 附近, 造成估测结果具有很强的不确定性; 优化后的归一化水分指数(M-NDWI)能够有效地排除叶面积指数的干扰, 显著改善玉米冠层含水量的估测效果。

关键词: 玉米; 冠层含水量; 高光谱遥感; 植被指数; 北京怀柔

中图分类号: TP79 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2015)06-0685-06

Remote sensing monitoring of the corn canopy water content based on the optimized index

Wu Jian^{1,2}, Tan Jing³, Deng Kai^{1,2}, Xu Jianhui^{1,2}

(1. Geography Information and Tourism College, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China; 2. Anhui Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Integration and Application, Chuzhou, Anhui 239000, China; 3. Beijing Oriental TITAN Technology Co., Ltd., Beijing, 100083, China)

Abstract: The EO-1 Hyperion hyperspectral data of Beijing Huairou county was filtered by band filter and used to calculate the vegetation water content index. Corn canopy water content estimation ability of normalized difference infrared index(NDII), water index(WI), normalized difference water index(NDWI), moisture stress index (MSI), normalized difference vegetation index(NDVI) and canopy structure index(CSI) was analyzed based on the coupling of leaf and canopy radioactive transfer model in this study. On the basis of the sensitivity analysis of different physical and chemical parameters, the two indexes of MCARI and NDWI were integrated to complete the estimation of the corn canopy water content. The results showed that the NDVI and CSI could not to make an estimate of corn canopy water content, and the R^2 of corn canopy water content estimation by NDII, WI, NDWI, MSI were greater than 0.78, but the RMSE was 0.015, which led to a strong uncertainty for the estimation. The optimized index M-NDWI can effectively eliminate the interference of LAI, and significantly improve the estimating precision of corn canopy water content.

Keywords: corn; canopy water content; hyperspectral remote sensing; vegetation index; Huairou in Beijing

随着卫星遥感技术的迅速发展, 直接探测植被冠层含水量, 为作物干旱和森林火灾评估提供了新的途径^[1-2]。通常情况下, 植被覆盖率较高时, 土

壤信息被植被信息所掩盖, 而植被信息是光学遥感探测的主要信号来源, 因此光学传感器探测得到的植被信息能够对植被冠层含水量进行估测^[3-4]。卫

收稿日期: 2014-04-08

修回日期: 2015-09-29

基金项目: 北京市科技新星计划(Z131101000413086); 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A245, KJ2015A265); 滁州学院科研项目(2014PY07); 滁州学院校级科研启动基金项目(2012qd18)

作者简介: 吴见(1985—), 男, 安徽六安人, 博士, 讲师, 主要从事生态遥感研究, xiangfeidewujian@126.com

星与机载传感器能够用于区域与景观尺度的植被含水量探测,便携式地物光谱仪能够用于野外或室内冠层水分与植被叶片水分的观测^[5-6]。目前,基于光学遥感技术的植被冠层含水量估测方法已经取得很大进展,如辐射传输模型、光谱水分指数、光谱反射率等^[7-8]。

部分研究^[9]将光谱数据构造一些指数或者进行相对变换用以消除外界因子的影响,如对光谱反射率进行归一化、比值、导数等处理以消除光照条件差异或者土壤背景等因素的干扰,这些处理方式在一定程度上可以对光谱中隐含的特征进行揭示,从而提高植被含水量估测精度,但对于叶面积指数等因素的干扰,这一类光谱处理技术并不能完全去除^[10]。

鉴于此,SAIL模型^[11]和PROSPECT模型^[12]被相继提出,其中PROSPECT模型主要对400~2500 nm 植被叶片的光谱特性进行描述,输出参数为叶片反射率和透过率,属于叶片尺度的光学模型,SAIL模型则是建立在Suit模型基础之上,假设水平均匀的条件下主要反映了叶倾角分布和冠层垂直结构。

目前,在反演植被冠层含水量的研究中,被广泛应用的物理模型属于冠层辐射传输模型SAIL和叶片辐射传输模型PROSPECT的耦合模型,即PROSAIL模型^[12]。赵祥等^[6]研究了常见植被指数提取植被含水量的可行性,对植被光谱敏感因子进行分析,将冠层反射率SAIL模型和叶片辐射传输PROSPECT模型进行耦合,实现了植被含水量估算指数的优化,但该研究并未提及优化后的指数在林业或农作物植被含水量估算中是否均适用,以及具体某一种植被含水量估算是否可行。笔者在此基础上,通过PROSPECT和SAIL模型的耦合以及耦合模型对不同理化参数的敏感性分析,对北京怀柔玉米冠层含水量进行了估测。

1 研究区概况及数据的获取

1.1 研究区概况

北京怀柔县总面积2128.7 km²,位于北京东北部,是燕山山脉、内蒙古高原和华北平原的过渡区。该区地形包含平原、浅山、深山3种类型,南方为草原,北方环山,由南至北长达128 km。海拔为34~1661 m。该区夏季温热湿润,冬季寒冷干燥,

春秋季节干旱多风。年均降水量为470~850 mm,年均温为6~12℃。土壤类型主要包括风砂土、褐土、草垫土和棕壤等。怀柔县属于国家级玉米种植基地,面积达1.56×10³ hm²,年产量7.5×10³ t以上。

1.2 影像数据获取

选取北京怀柔2013年5月19日EO-1 Hyperion 高光谱数据,1~70波段为可见光近红外波段(VNIR),71~242波段为短波红外波段(SWIR),空间分辨率为30 m,光谱分辨率为10 nm,共有242波段。

删除44个未定标、20个严重受水汽影响和2个重复波段后,对剩余波段进行坏线修复、条纹去除和smile效应去除处理;再删除7个质量差的波段,得到169个剩余波段。被删除的波段是:1~7、58~78、121~129、166~180、185~186、224~242。通过FLAASH软件对筛选剩余的169个光谱波段执行大气纠正,获取反射率影像。根据1:50000地形图对反射率影像执行几何纠正,误差控制在0.35个像元以内。

1.3 地面数据获取

于2013年5月中下旬进行玉米冠层含水量和光谱测量。在影像覆盖区域内,选取20个试验点,每个试验点分别设置3个30 m×30 m的样地,样地间两两相距至少在1 km以上,对各样地的玉米冠层叶面积指数、叶片干重和鲜重、叶片含水量、叶绿素含量等数据^[13-15]进行测量。

2 研究方法

2.1 耦合模型的构建

PROSPECT模型能够对叶片400 nm至2500 nm的半球透过率和反射率进行计算,模型参数主要包括叶片干物质含量、含水量、叶肉结构参数、叶绿素,其中干物质又涵盖淀粉、蛋白质、木质素、半纤维素、纤维素等,由于这些干物质吸收作用不强或者含量较低,分别表示各种干物质的作用非常困难,因此以干物质总量对其综合作用进行表达^[12]。SAIL模型是应用最普遍的冠层二向性反射物理模型,对均匀水平植被冠层中的上行下行散射与直射光通量的辐射传输过程进行了描述。SAIL模型包含的输入参数有观测与光线入射几何参数、太阳辐

射散射分量、土壤反射率、叶倾角参数、叶面积指数、叶片透过率及反射率^[11]。

将 PROSPECT 和 SAIL 模型进行耦合，得到 PROSAIL 模型^[6]。

$$\rho_{\lambda} = f(LAI, Cab, Cw, Cm, SL, Rs, \theta, \varphi, \theta_v, \varphi_v)。$$

式中： ρ_{λ} 为 λ 波长位置的反射率(%)； LAI 为叶面积指数； Cab 为叶绿素 a 和 b 的含量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)； Cm 为叶片干物质含量(g/cm^2)； Cw 为单位叶面积积水质量(g/cm^2)； SL 为天空光比例； Rs 为土壤反射率； θ 为太阳天顶角($^{\circ}$)； φ 为太阳方位角($^{\circ}$)； θ_v 为观测天顶角($^{\circ}$)； φ_v 为观测方位角($^{\circ}$)。

2.2 耦合模型对不同理化参数的敏感性

PROSPECT 模型构建完成后，需要进一步分析各理化参数的变化对模型的影响。首先将所有参数设置为固定的常见数值，再对分析目标参数改变取值，其余参数不变，从而获取与目标参数取值变化相应的冠层反射率曲线，在曲线分析的基础上得到目标参数对 PROSPECT 模型的敏感性^[6]。

分别将叶面积指数、干物质、植被含水量和叶绿素取一系列不同的数值在 PROSPECT 模型中进行模拟，模型中的其他参数依据载荷与卫星成像条件，如实测天空光比例和土壤反射率、地理参数、影像成像几何等进行设置。各参数分析的模拟数值如表 1 所示。

表 1 PROSPECT 模型中不同分析参数的取值

Table 1 Different analysis parameters value in the PROSPECT model

参数	取值									
Cw	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.040	0.050	0.060	
Cab	10	25	35	45	55	60	70	85	90	
Cm	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	
LAI	0.6	1.0	1.6	2.2	2.6	3.0	3.5	4.5	5.5	

对模拟结果进行分析可知， Cw 对近红外范围的光谱反射率影响较大； Cab 仅对可见光范围的光谱反射率影响较大，在大于 750 nm 的光谱范围影响很小； Cm 在近红外光谱范围内对反射率有较大的影响，而在可见光范围内的影响很小； LAI 在所有光谱范围内均有一定的影响作用，随着 LAI 的逐渐增大，短波红外与可见光光谱反射率逐步降低，而近红外光谱反射率逐步增加，当 LAI 取值在 4.5 附近时，近红外光谱反射率达到最大值，这种现象的产生主要是因为叶绿素对可见光光谱范围的影响以及水分对短波红外光谱范围的影响造成的。

3 结果与分析

3.1 6 种常见指数冠层含水量估测能力

常见的估算植被含水量的指数有 6 种，即水分指数(water index, WI)、归一化差值水分指数(normalized difference water index, $NDWI$)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, $NDVI$)、水应力指数(moisture stress index, MSI)、归一化差值

近红外指数(normalized difference infrared index, $NDII$)、冠层结构指数(canopy structure index, CSI)。各指数可用 R_n (光谱反射率)与 n (波长位置(nm))的关系来表达。

$$WI = R_{900} / R_{970} \tag{1}$$

$$NDWI = (R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240}) \tag{2}$$

$$NDVI = (R_{895} - R_{675}) / (R_{895} + R_{675}) \tag{3}$$

$$MSI = R_{1599} / R_{819} \tag{4}$$

$$NDII = (R_{819} - R_{1649}) / (R_{819} + R_{1649}) \tag{5}$$

$$CSI = 2SR_S - SR_S^2 + WI_S^2 \tag{6}$$

其中：

$$SR_S = (SR_{680} - 1) / (SR_{680} - 1)_{\max} \tag{7}$$

$$WI_S = (WI_{1180} - 1) / (WI_{1180} - 1)_{\max} \tag{8}$$

$$SR_{680} = R_{800} / R_{680} \tag{9}$$

$$WI_{1180} = R_{900} / R_{1180} \tag{10}$$

采用实测玉米冠层含水量数据与以上 6 种常见指数构建回归关系模型，分析常见指数与实测玉米冠层含水量之间的相关性，结果如图 1 所示。

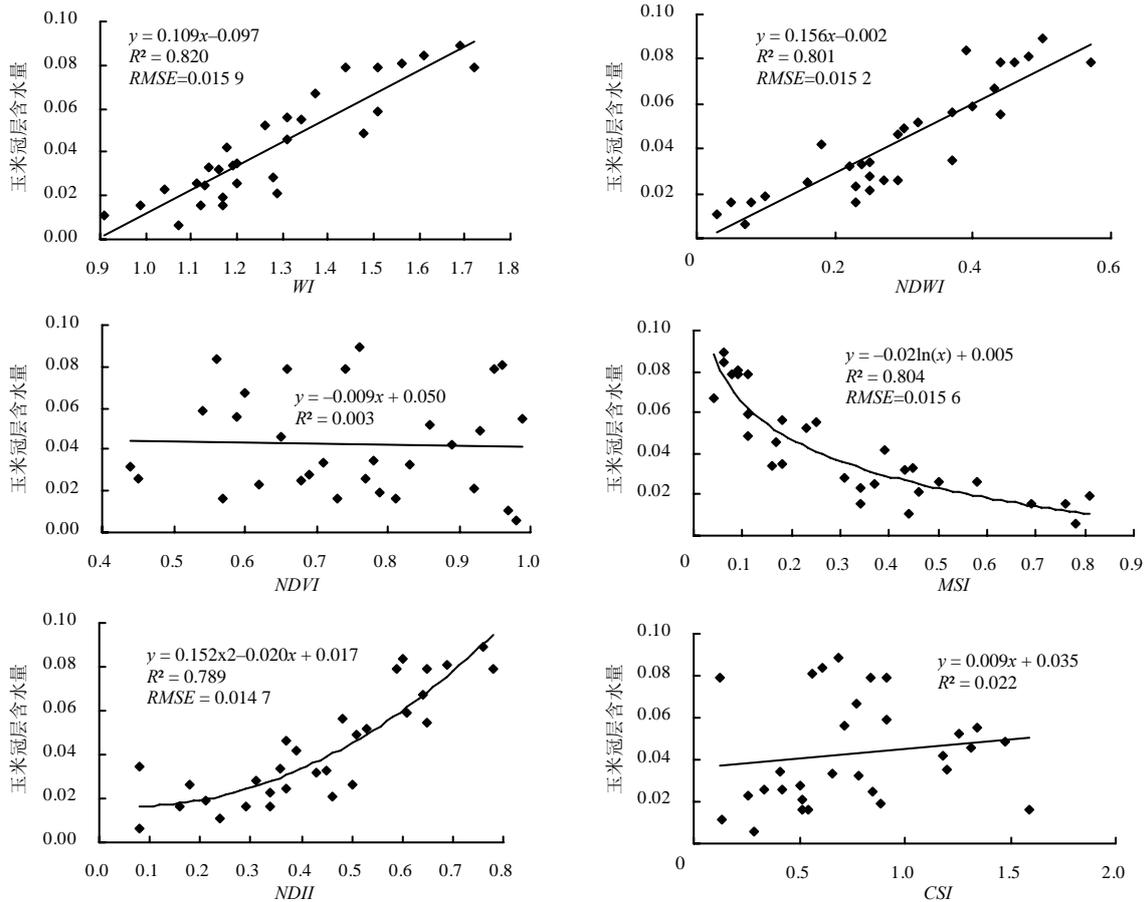


图 1 玉米冠层含水量随不同指数值增加的变化

Fig. 1 Change trend of corn canopy water content along with the change of different index value

采用均方根误差 $RMSE$ 和相关系数 R^2 值,对各指数的估测能力进行评判。由图 1 可知, $NDVI$ 和 CSI 与玉米冠层含水量变化的相关性较低, WI 、 $NDWI$ 、 MSI 对玉米冠层含水量估测的 R^2 值均大于 0.80, $NDII$ 对玉米冠层含水量估测的 R^2 值为 0.789, 4 种指数的估测 $RMSE$ 值约在 0.015 附近, 而常见作物如玉米、小麦等的冠层含水量为 0.01~0.02, 若估测 $RMSE$ 值为 0.015, 则估测结果会具有较大的不确定性, 因而玉米冠层含水量指数估测法需要进一步改善。

3.2 冠层含水量估测指数的优化

在估算植被含水量的指数中, $NDWI$ 的应用最为广泛。采用波长 860 nm 和 1 240 nm 处反射率的归一化表达形式, 但在植被含水量估测过程中, 该指数是否能够有效地避免干扰因素, 需要进一步的深入分析。通过耦合模型对不同理化参数的敏感性分析可知, 叶片干物质含量 C_m 和叶面积指数 LAI 对波长 860 nm 和 1 240 nm 处的光谱都会产生影响, 因此在采用 $NDWI$ 对植被含水量进行估测时, 必然

会受到叶片干物质含量和叶面积指数 2 个因素的干扰。采用实测数据, 分析这 2 个因素发生改变时 $NDWI$ 与玉米冠层含水量的关系。

从图 2 可以看出, C_m 的变化会对 $NDWI$ 估测玉米冠层含水量有影响, 当 LAI 取值不变时(本研究取值为 2.2), 在同样的玉米冠层含水量条件下, C_m 增加会导致 $NDWI$ 减小。由此可知, 随着 C_m 的增加, $NDWI$ 的估算值将会使玉米冠层含水量被低估。

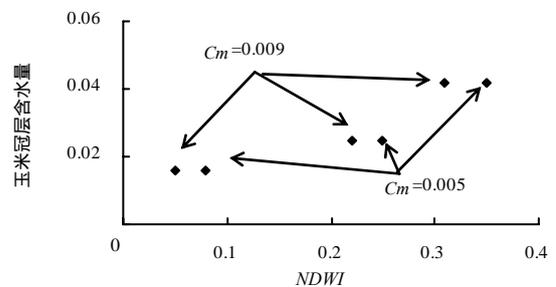


图 2 LAI 相同 C_m 不同时玉米冠层含水量随 $NDWI$ 值增加的变化

Fig.2 Change trend of corn canopy water content along with the change of $NDWI$ under the condition of the same LAI and different C_m

从图 3 可以看出，当叶片干物质含量 C_m 取值不变时(本研究取值为 0.008)，在同样的玉米冠层含水量条件下， LAI 的取值逐渐增大(从 0.6 变化至 5.5)，结果发现 $NDWI$ 会随着 LAI 的增加而增加。由此可知，随着 LAI 的增加， $NDWI$ 的估算值将会使玉米冠层含水量被高估。

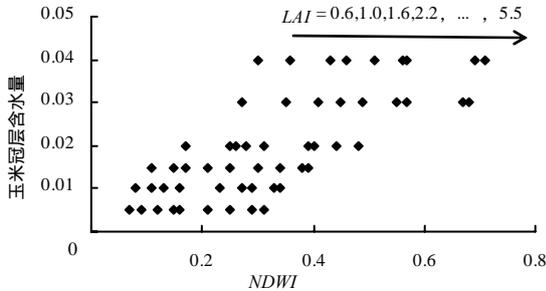


图 3 不同 LAI 时玉米冠层含水量随 $NDWI$ 值增加的变化
Fig.3 Change trend of corn canopy water content along with the change of $NDWI$ under the condition of the same LAI

由叶片干物质含量 C_m 的变化造成的 $NDWI$ 产生的变化不明显，且叶片干物质含量的变化通常不大； LAI 的变化造成 $NDWI$ 产生的变化比较明显，且 LAI 的变化范围也较大，综合考虑，若能够有效去除 LAI 产生的影响，则 $NDWI$ 对玉米冠层含水量的估测能力将会得到较大提升。

有研究表明， LAI 与 $MCARII$ 的相关性很强^[6]，通过实测数据模拟，对 $MCARII$ 和 $NDWI$ 之间的相互关系进行分析，结果如图 4 所示。

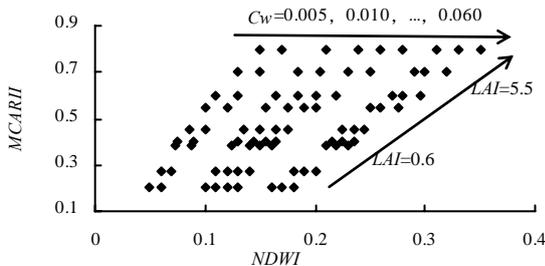


图 4 不同 LAI 和 C_w 时 $MCARII$ 随 $NDWI$ 值增加的变化
Fig.4 Change trend of $MCARII$ along with the change of $NDWI$ under the condition of different LAI and C_w

从图 4 可以看出，在玉米冠层含水量不变的情况下，随着 LAI 的不断增大， $MCARII$ 和 $NDWI$ 都呈增加趋势；随着玉米冠层含水量的逐渐增加， $MCARII$ 和 $NDWI$ 具有相同的变化趋势。如果保持 LAI 取值固定，则玉米冠层含水量与 $MCARII$ 和 $NDWI$ 的斜率具有近乎完全一致的变化关系。在此基础上，提出将 $MCARII$ 和 $NDWI$ 两种窄波段指数进行整合，从而获取一个新的植被含水量估测指数，命名为改进的归一化水分指数(modified-normalized difference

water index, $M-NDWI$)。

$$M-NDWI = (NDWI + 0.1) / MCARII$$

$$MCARII = 1.2[2.5(R_{800} - R_{550})] - 1.3(R_{800} - R_{670})$$

利用 PROSAIL 模型模拟的数据对 $M-NDWI$ 与玉米冠层含水量的相关关系进行分析 结果如图 5 所示。

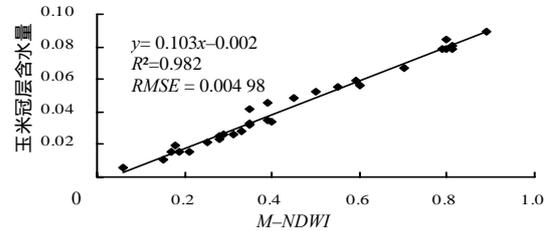


图 5 玉米冠层含水量随 $M-NDWI$ 值增加的变化
Fig.5 Change trend of corn canopy water content along with the change of $M-NDWI$

从图 5 可以看出， $M-NDWI$ 与玉米冠层含水量之间存在非常一致的线性相关关系，能够有效地排除 LAI 的干扰，较大程度地提高玉米冠层含水量的估测精度。 $M-NDWI$ 与玉米冠层含水量间的 R^2 值达 0.982， $RMSE$ 值达 0.004 98，而直接采用 $NDWI$ 对玉米冠层含水量进行估测时的 R^2 值为 0.801， $RMSE$ 值为 0.015 2， $NDWI$ 的估测残差是 $M-NDWI$ 的 3 倍之多。表明 $M-NDWI$ 与改进之前相比，较好地提升了玉米冠层含水量的估测能力。

3.3 玉米冠层含水量的估测精度

采用 Hyperion 高光谱影像数据 运用 $M-NDWI$ 对研究区的玉米冠层含水量进行估测，并且将估测结果与地面实测玉米冠层含水量进行精度分析。作为对比，同时采用 $NDWI$ 对研究区的玉米冠层含水量进行估测，结果如图 6 所示。

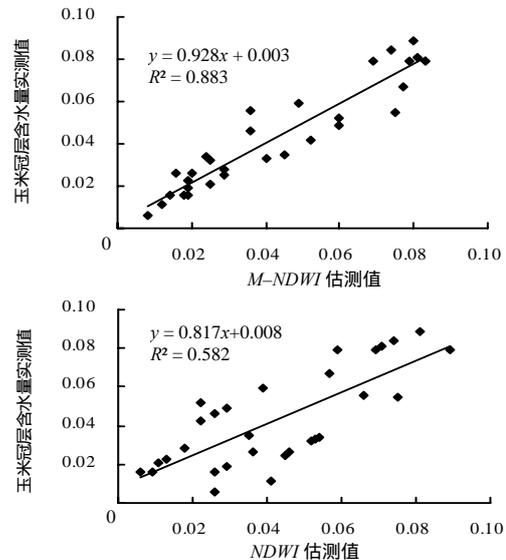


图 6 $NDWI$ 优化前后的估测值与实测值
Fig.6 The measured values and the estimated values of $NDWI$ and $M-NDWI$

从图6可以看出, $M-NDWI$ 估测值与玉米冠层含水量实测值之间的 R^2 值达 0.883, 较 $NDWI$ 提高了 0.301, 说明 $M-NDWI$ 的估测结果更加接近玉米冠层含水量的真实状况。

4 结论与讨论

对大面积植被水分含量进行正确估测, 不仅能够有效评估植被的生长状况, 而且也能为其他生态系统模型在不同尺度的应用提供关键的参数输入, 对干旱监测和生态环境改善等具有现实意义。本研究通过 PROSPECT 和 SAIL 模型的耦合以及耦合模型对不同理化参数的敏感性分析, 对 $NDWI$ 进行了优化, 改善了玉米冠层含水量的估测效果。

通过耦合模型分析, $NDII$ 、 WI 、 $NDWI$ 、 MSI 对玉米冠层含水量的拟合关系较好, 但估测的 $RMSE$ 值均在 0.015 附近, 造成估测结果具有较大的不确定性。这一研究结果与赵祥等^[6]研究结果类似。经过实测数据的验证, 优化后的 $M-NDWI$ 对玉米冠层含水量的估测值与实测值之间的 R^2 达 0.883, 较 $NDWI$ 提高了 0.301。同样, 赵祥等以植被为研究对象, 计算出的 R^2 值为 0.780, 较优化前的 $NDWI$ 也有明显提高, 因此, 笔者认为 $M-NDWI$ 能够有效地排除 LAI 的干扰, 比较真实地反映了植被含水状况。

另外, 优化后的 $M-NDWI$ 对玉米冠层含水量的估测效果略优于赵祥等的研究结果。这有可能是本研究对象单一, 仅为玉米, 而赵祥等的研究对象为植被造成的。不同的研究对象对研究结果造成的差异, 可作进一步探讨。

参考文献:

- [1] 张佳华, 许云, 姚凤梅, 等. 植被含水量光学遥感估算方法研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(10): 1121-1129.
- [2] 沈艳, 牛铮, 王汶, 等. 基于导数光谱变量叶片含水量模型的建立[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(4):

16-19.

- [3] 阿布都瓦斯提吾拉木, 李召良, 秦其明, 等. 全覆盖植被冠层水分遥感监测的一种方法: 短波红外垂直失水指数[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(7): 957-965.
- [4] 沈艳, 牛铮, 颜春燕. 植被叶片及冠层层含水量估算模型的建立[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1218-1223.
- [5] 董晶晶, 牛铮, 沈艳, 等. 利用反射光谱信息提取叶片水分含量的方法比较[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(4): 587-591.
- [6] 赵祥, 王锦地, 刘素红. 耦合辐射传输模型的植被含水量遥感改进监测[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(3): 185-189, 240.
- [7] 刘晓臣, 范闻捷, 田庆久, 等. 不同叶面积指数反演方法比较研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 827-834.
- [8] 李存军, 王纪华, 王娴, 等. 遥感数据和作物模型集成方法与应用前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 295-301.
- [9] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003, 14(3): 58-62.
- [10] 李云梅, 倪绍祥, 王秀珍, 等. 水稻冠层垂直反射率模拟[J]. 作物学报, 2003, 29(3): 397-401.
- [11] 靳华安, 王锦地, 柏延臣, 等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 162-173.
- [12] 杨曦光, 范文义, 于颖. 基于 PROSPECT + SAIL 模型的森林冠层叶绿素含量反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3022-3026.
- [13] 刘咏梅, 汪步惟, 李京忠, 等. 黄土丘陵沟壑区枯枝落叶层和土壤的光谱差异特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 147-154.
- [14] 张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1050-1056.
- [15] 程志庆, 张劲松, 孟平, 等. 植被参数高光谱遥感反演最佳波段提取算法的改进[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 179-185.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立