

结合 HJ1A/B 卫星数据和生态因子的籽粒品质监测

王大成^{1,2}, 张东彦², 李宇飞¹, 秦其明¹, 王纪华², 范闻捷¹, 陈诗琳³

(1. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 新疆交通职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 该研究引入温度、降水、太阳辐射和土壤肥力等影响小麦籽粒蛋白质含量的重要生态因子, 结合遥感数据进行小麦籽粒蛋白质含量监测。以北京郊区的小麦种植区为实验区, 获取多时相的 HJ1A/B 卫星数据, 多个气象站点全生育期气象数据和土壤养分数据, 以及收获时小麦籽粒蛋白质含量。分别构建了遥感光谱蛋白质含量模型、生态因子籽粒蛋白质含量模型、光谱生态因子蛋白质含量模型。结果表明: 北京地区冬小麦以 5 月 11 日(开花期左右)NDVIgreen 值与籽粒蛋白质含量相关性最好, 达到极显著水平, 因此该时期为冬小麦籽粒蛋白质含量遥感监测的最佳时相, 并将利用该时期的 NDVIgreen 参与光谱蛋白质含量模型、光谱生态因子蛋白质含量模型的构建。对光谱蛋白质含量模型、生态因子籽粒蛋白质含量模型、光谱生态因子蛋白质含量模型进行 F 检验, 表明各模型均达到极显著水平, 3 种模型的决定系数分别为: 0.782, 0.635, 0.843, 相对误差分别为: 0.151, 0.123, 0.049。说明综合利用遥感数据和生态因子的监测结果比单独利用遥感数据或单独利用生态因子的精度高。引入生态因子的小麦籽粒蛋白质含量遥感监测有助于提高监测精度, 并增加监测模型的农业机理。

关键词: 小麦; 籽粒蛋白质含量; 遥感; 生态因子; 监测

中图分类号: P23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0780-07

Monitoring wheat quality based on HJ1A/B remote sensing data and ecological factors

Wang Dacheng^{1,2}, Zhang Dongyan², Li Yufei¹, Qin Qiming¹, Wang Jihua², Fan Wenjie¹, Chen Shilin³

(1. RS and GIS Institute of Peking University, Beijing 100871, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

3. Xinjiang Vocational and Technical College, Wulumuqi 830000, China)

Abstract: Temperature, precipitation, solar radiation and soil fertility are important ecological factors for wheat grain protein content (GPC), which are combined with remote sensing data to monitor GPC in this research. Experiments were carried out in suburban areas in Beijing. Multi-temporal HJ1A/B satellite data, meteorological data for the whole growing season from the corresponding meteorological stations, soil nutrient data and GPC obtained at maturity were acquired. Spectral GPC model, ecological factors GPC model and spectral ecological factors GPC model were constructed respectively. The results show that NDVIgreen corresponding to May 11 (around anthesis stage) has best correlation with GPC in the

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金项目(OFLRSS201213); 国家科技支撑计划课题(2012BAH29B003)

作者简介: 王大成(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事高光谱图像处理及遥感定量化的研究。Email: wangdacheng@pku.edu.cn

导师简介: 范闻捷(1972-), 女, 副教授, 主要从事精准农业的研究。Email: fwj@pku.edu.cn

research area. The correlation coefficient reaches significant level, thus May 11 was the best time for monitoring GPC by remote sensing. NDVIgreen values on May 11 were used for constructing spectral GPC model and spectral ecological factors GPC model. F-test shows that spectral GPC model, ecological factors GPC model, spectral ecological factors GPC model reach extremely significant levels with determination coefficients of 0.782, 0.635, 0.843, and relative error of 0.151, 0.123, 0.049 respectively. The results indicate that accuracy of spectral ecological factors GPC model combined with remote sensing data and ecological factor is higher than GPC model based on only spectral data or only ecological factors. Introduction of ecological factors into spectral protein GPC model helps to improve monitoring accuracy and agricultural mechanism of monitoring models.

Key words: wheat; grain protein content; remote sensing; ecological factor; monitoring

0 引言

小麦籽粒蛋白质含量是小麦品质的关键指标。蛋白质含量的监测预报对于指导加工企业小麦收获、调优栽培等具有重要意义。随着定量遥感的发展,通过多源遥感数据不仅可以瞬时大面积地对小麦的生长状态和生长环境进行监测,而且可以周期性地获取数据以监测小麦生育进程,为大面积、低成本地预报小麦籽粒蛋白质含量提供了可能。小麦等作物的品质遥感监测预报成为遥感农业应用的新领域。

国内外基于氮素运转对小麦籽粒品质形成过程监测预报进行了探索性研究和初步应用。澳大利亚的 Badri 等研究发现,在小麦开花前两周的 Landsat 卫星影像提取的植被指数与籽粒蛋白间呈极显著的相关 ($r > 0.75$)^[1]。瑞典的 Petterson 等用播种期和 TCARI 指数联合预测籽粒蛋白质含量^[2]。国内进行小麦籽粒蛋白质含量遥感监测的研究与国际上基本上同步进行。王纪华等、黄文江等人的研究表明小麦生长后期叶片全氮与成熟期籽粒品质组分之间具有很强的相关性,用叶片全氮能较好地预测籽粒蛋白质和面筋含量,特别是在开花期通过地面高光谱对籽粒蛋白质等指标的提早预测^[3-4]。薛利红等研究表明抽穗后冠层光谱指数 R1500/R610 和 R1220/R560 与小麦籽粒蛋白质和淀粉积累量呈极显著的指数关系^[5]。Wang 等通过小区试验基于氮素运转规律,利用小麦生长中后期地面高光谱指数 PPR 对小麦籽粒蛋白质含量进行了监测^[6]。Zhao 等基于水分胁迫和氮素运转原理,利用开花期的 TM 影像 VI(green) 及水分指数可以预测冬小麦籽粒蛋白质含量^[7]。宋

晓宇等基于氮素运转原理,利用开花期的 Aster 影像与收获后籽粒蛋白质含量建立相关,初步实现了大面积小麦籽粒蛋白质含量监测。

这些研究为小麦籽粒蛋白质含量遥感监测和应用提供了思路,然而小麦品质的形成除了基因遗传因素外还受土壤、气象等生态因子的影响^[9],但是遥感不能完全准确监测这些生态因子对品质形成的影响。已有的研究中并没有充分将生态因子引入到作物籽粒蛋白质遥感监测的算法或模型中,从而影响了蛋白质含量遥感监测的精度以及监测模型的稳定性,有必要结合生态因子和遥感数据构建小麦品质监测综合模型进行尝试。

在结合生态因子与遥感数据进行农业监测方面,一些研究表明复合式估测模式比单遥感变量的估测模式具有更高的相关性和数据预测能力。如:Kalubarme 在印度针对大面积的小麦产量预测模型进行了研究发现,农学参数结合经大气校正的 NOAA AVHRR 数据计算得到的 NDVI,其结合的模型有较高的相关性;Rojas 将 SPOT-VEGETATION 提取的 NDVI 结合对大豆产量产生影响的生态气象因子构建的综合模型,预测结果的变异系数仅为 9%^[8]。王大成研究北京地区气象数据和 NDVI 构建了冬小麦光谱气象产量模型,与气象产量模型和光谱产量模型相比,光谱气象产量模型相对均方根误差 (RRMSE) 和相对误差 (RE) 降低幅度较大^[9]。

文中在前人研究基础上,并借鉴生态因子参与遥感估产的方法,尝试利用较高时间和较高空间分辨率的国产卫星 HJ1A/B 卫星构建综合生态因子和遥感的小麦籽粒蛋白质含量监测模型,并与遥感蛋白质含量监测模型、生态因子蛋白质含量监测模型

对比,选择最优的小麦蛋白质含量监测模型,以期增强冬小麦蛋白质含量监测的农学生态机理解释。

1 材料与方法

研究区域为北京郊区冬小麦种植区,位于 $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}30' E$, $39^{\circ}38' \sim 40^{\circ}51' N$, 地处黄土高原、内蒙古高原向华北平原过渡的边缘地带。气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。年平均气温为 $10 \sim 12^{\circ}C$, 降雨量大约为 600 mm, 降水季节分配很不均匀, 全年降水的 80% 集中在夏季 6、7、8 三个月。

试验于 2009~2010 年小麦生长季进行, 在京郊选择冬小麦地块 73 块, 较均匀地分布在北京郊区的小麦主要种植区, 由北京农业技术推广站提供, 属于北京优质小麦生产基地。所选地块平坦, 作物长势均匀。冬小麦一般 9 月底至 10 月初播种, 翌年 6 月中旬收获。为了避免基因品种对蛋白质的影响, 试验选取的小麦地块种植品种全部为“中优 206”, 由北京农业技术推广站提供种源, 当地农民耕作。冬小麦采用常规的肥水管理, 未进行特殊处理, 能够反映本区域小麦的生长及品质特点。

1.1 小麦蛋白质含量测定

在小麦成熟时, 每个地块选择有代表性的 $30 \times 30 m^2$ 地块, 从四角和中心收割 5 个 1 平方米小麦混合, 并记录 GPS 位置。脱粒经一个月后熟后, 利用 FOSS 公司产的 InfratecTM 1241 近红外谷物分析仪测定小麦蛋白质含量。

1.2 遥感数据及预处理

考虑小麦的生育期并根据天气状况, 共获取环境小卫星数据(HJ-1A、HJ-1B)影像共 4 景, 分别为 4 月 23 日、5 月 1 日、5 月 11 日和 5 月 20 日, 对应于小麦的拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期等关键生育期。

利用 1:50000 地形图对卫星影像进行几何粗校正, 然后再利用地面实测的 GPS 控制点对该影像进行了几何精纠正, 确保几何纠正精度优于 1 个像元。

选择常用的 9 个植被指数, 另据植被指数结构特征和蛋白质与波长反射率之间的关系建立比值短波指数和归一化差值短波红外指数, 共 14 个植被指数(表 1)。参考 HJ-1A、HJ-1B 传感器设定蓝、红、

近红外、短波红外波段分别对应 459~479、620~670、841~876 和 1 628~1 652 nm, 将波段内各波长反射率取平均作为该波段的反射率值。将 HJ-1A、HJ-1B 的 DN 值转换为辐亮度, 采用 ENVI 中的 FLAASH 校正进行大气校正。得到冠层反射率。并计算了多种候选植被指数(见表 1)。

表 1 候选植被指数
Tab.1 Information of Vis

Vegetation index	Reference	Vegetation index expression
MNLI	Gong, 2003	$MNLI = \frac{(NIR^2 - Red)(1+0.5)}{(NIR^2 + Red + 0.5)}$
NDVIgreen	Gitelson, 1996	$(R_{NIR} - R_{green}) / (R_{NIR} + R_{green})$
NDVI	Rouse, 1974	$NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$
SAVI	Huete, 1988	$SAVI = (1+L)(NIR - Red) / (NIR + Red + L)$
OSAVI	Huete, 1988	$OSAVI = (NIR - Red) / (NIR + Red + 0.16)$
MSAVI	Qi, 1994	$MSAVI = (1/2)[2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - Red)}]$
RDVI	Rougean, 1995	$RDVI = (NIR - Red) / \sqrt{NIR + Red}$
DVI	Jordan, 1969	$DVI = NIR - Red$
TVI	Broge, 2000	$TVI = 0.5 [120(NIR - Green) - 200(Red - Green)]$
NLI	Goel, 1994	$NLI = (NIR^2 - Red) / (NIR^2 + Red)$
RDVI1	Gitelson, 1996a	$RDVI_1 = \sqrt{NDVI * (NIR - Red)}$
MSR	Chen, 1996	$MSR = (NIR/Red - 1) / \sqrt{NIR/Red + 1}$

1.3 生态数据及预处理

生态数据包括气象数据、土壤数据。气象数据由北京市气象局提供, 包括 8 个气象台站(顺义、密云、怀柔、平谷、通县、大兴、房山和昌平) 2009 年 9 月 20 日~2010 年 6 月 30 日的逐日平均气温 ($^{\circ}C$)、逐日降水量(mm)、逐日平均日照时数、逐日相对湿度(%)和逐日风速(m/s)等。考虑到不同生长期特别是关键生长期的气象因子对小麦籽粒蛋白质含量形成具有重要影响, 如: 小麦籽粒中积累的干物质, 约有 80% 以上来源于后期的光合产物, 为了找到关键生态影响因素, 结合前人研究的一些观点, 该研究通过数据整合运算, 将温度、降雨和日照时间与蛋白质形成相关

性高的因子进行2种处理:(1)按照一定的时间段(旬或侯)进行整合运算,特别是在小麦品质形成的最关键的灌浆中后期至乳熟期按照每5d(侯)、10d(旬)细化。(2)求和或求差处理,如:积温($\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温)、温差、日均温、日均最高温、日均最低温、大于 32°C 的天数等。

养分数据包括土壤速效磷、有机质含量、碱解氮含量和速效钾等指标,由北京农业技术推广站在2009年小麦种植前于北京郊区测定的7405个土壤样点化验所得。

上述数据利用ARCGIS进行空间插值获得实验区的空间分布图。

1.4 小麦蛋白质含量模型

利用小麦籽粒蛋白质含量实测数据、遥感数据和生态因子数据,采用多元线性回归的方法建立蛋白质含量与各因子间的的关系。

光谱蛋白质含量模型为:

$$Y = a \cdot x + b \quad (1)$$

式中:Y代表冬小麦表征品质高低的蛋白质含量;x为最佳预测时相的植被指数;a、b为特征常量。

生态因子蛋白质含量模型为:

$$Y = L \cdot (R_i, T_{ii}, S_{iii}, O_{iv}) \quad (2)$$

式中:Y代表冬小麦表征品质高低的蛋白质含量;L为线性函数的参数;R、T、S、O分别为品质形成关键生育期的降雨量、平均温度、日照时间与土壤养分等生态因子;下标i、ii、iii和iv分别表示品质形成关键期时间段。

光谱生态因子蛋白质含量模型为:

$$Y = L \cdot (R_i, T_{ii}, S_{iii}, O_{iv}, V_i) \quad (3)$$

1.5 数据分析与计算方法

利用MATLAB软件中二次开发的相关统计程序以及SPSS相关分析模块对数据进行统计分析、回归分析、方差分析等统计。通过对不同时期的不同植被指数与成熟收获期冬小麦品质实验室化验数据(粗蛋白含量)进行相关分析,选择显著相关的植被指数及其关键的生育期,来确定品质形成的最佳时相与最优植被指数,通过回归分析建立冬小麦籽粒蛋白质含量估算模型,利用F检验对模型进行验证,利用多元决定系数(R²)、相对均方根误差(RRMSE)和相对误差(RE)对模型的预测准确性进行分析。籽

粒蛋白质含量监测模型构建流程如图1所示。

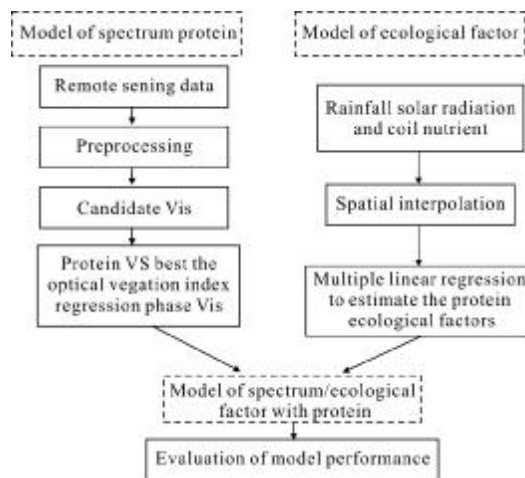


图1 小麦籽粒蛋白质含量监测模型构建流程图

Fig.1 Schematic diagram of wheat protein content monitoring model

2 结果与分析

2.1 多时相植被指数与小麦蛋白质含量关系

小麦蛋白质含量估算必须选择植被指数中冬小麦叶绿素信息贡献最大,且对后期籽粒形成起决定性作用的时期为最佳时相。利用不同生育时期冬小麦与品质相关的植被指数与品质进行相关性分析。小麦各植被指数与籽粒蛋白质的相关决定系数结果如表2所示。

各个植被指数与籽粒蛋白质含量都具有较高的决定系数,其中NDVIgreen与籽粒蛋白质含量的相关性最大(0.782);这是因为NDVIgreen和植物的叶绿素、氮素等密切相关,基于氮素运转原理,叶绿素、氮素与籽粒蛋白质含量联系密切,所以在该研究中利用与目标因子相关性最高的植被指数—NDVIgreen。

从表2中可以看出,在冬小麦全生育期内不同时相的遥感图像中,植被指数与籽粒蛋白质含量关系的显著性有很大的差别。通过相关分析蛋白质含量与各个时期(4月17日、5月1日、5月11日和5月20日)的NDVIgreen均达到显著或极显著水平。在5月11日左右相关性达到最大,此时,冬小麦处于开花末期至灌浆初期。所以利用NDVIgreen植被指数进行品质预测效果较好且北京地区冬小麦品质预测的可选时相为5月11日。

表 2 小麦各植被指数与籽粒蛋白质的相关决定系数(R^2) ($n=73$)Tab.2 Coefficients (R^2) of regress between Vis and protein concentration of wheat ($n=73$)

Vegetation index	RVI	NDVI	NDVIgreen	SAVI	OSAVI	MSAVI	MCACI
4.17	0.518	0.511	0.616	0.450	0.444	0.393	0.335
Time of extracting the image spectrum	5.1	0.458	0.691	0.761	0.720	0.598	0.481
5.11	0.641	0.716	0.782	0.716	0.725	0.694	0.625
5..20	0.445	0.413	0.4645	0.512	0.416	0.405	0.390
Vegetation index	TCARI	RDVI	SR	DVI	TVI	SIPI	RDVI1
4.17	0.145	0.172	0.421	0.518	0.376	0.424	0.321
Time of extracting the image spectrum	5.1	0.097	0.270	0.639	0.478	0.542	0.413
5.11	0.080	0.332	0.711	0.780	0.622	0.368	0.605
5.20	0.137	0.197	0.408	0.549	0.442	0.201	0.419

2.2 光谱蛋白质含量模型

利用 5 月 11 日遥感影像得到的 NDVIgreen 值与冬小麦品质建立回归模型, 得到北京地区冬小麦光谱品质预测模型, 如表 3 所示, 其中在模型中 Y 代表蛋白质含量(%).

从表 3 中可以看出, 光谱参数模型的 F 值大于 F-crit 值 (查表值), 说明该冬小麦光谱品质模型通过 0.01 的显著性水平检验。

表 3 北京地区冬小麦品质光谱监测模型 ($n=73$)Tab.3 Model of spectral protein estimation of winter wheat in Beijing area ($n=73$)

Model of spectral protein estimation	R^2	F-text	F-crit	RRMSE	RE
$Y=5.903$ $NDVIgreen+0.19$	0.782	46.5	3.66	0.214	0.151

2.3 生态因子蛋白质含量模型

利用研究区冬小麦生育期生态环境数据建立生态环境品质模型。依据先前研究, 小麦品质在不同生育时期对蛋白质含量的影响是不同的, 综合文献及先验知识, 选择气象及组合、土壤肥力等多个生态因子参与蛋白质含量多元线性回归建模, 得到北京地区冬小麦生态环境品质预测模型, 如表 4 所示, 其中在模型中 Y 代表蛋白质含量(%).

从表 3 中可以看出, 光谱参数模型的 F 值大于 F-crit 值 (查表值), 说明该冬小麦光谱品质模型通过 0.01 的显著性水平检验。

本模型中, Y 代表冬小麦表征品质高低的蛋白

表 4 北京地区冬小麦品质生态因子监测模型 ($n=73$)Tab.4 Model of ecological factors protein estimation of winter wheat in Beijing area ($n=73$)

Model of ecological factors protein estimation	R^2	F-text	F-crit	RRMSE	RE
$Y=8.789+0.015X_1-$ $0.012X_2-0.009X_3+$ $0.021X_4$	0.635	19.6	2.61	0.184	0.123

质质量分数 (%), X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表 5 月上旬到 5 月下旬的降雨量、5 月下旬的光照时间、土壤含氮量、整个五月的积温。

从本模型可以得出, 北京地区冬小麦品质与 5 月上旬到 5 月下旬的降雨量和整个五月的积温呈正相关, 而与 5 月下旬的光照时间和土壤含氮量呈负相关, 模型决定系数为 0.635。从模型的变量系数绝对值大小可知 5 月上旬到 5 月下旬的降雨量对品质的影响是最大的, 该阶段为小麦的孕穗末期—抽穗期, 适当的温度有利于冬小麦抽穗生长, 而此时期的降水也是作物形态和籽粒形成的关键成分, 从而影响冬小麦的生长。

2.4 光谱生态因子蛋白质含量模型

以影响品质的 4 个关键生态环境数据和冬小麦最佳时相遥感数据得到的 NDVIgreen 值为自变量, 与蛋白质含量建立回归模型, 得到冬小麦光谱生态环境品质预测模型。用 F 检验对相关系数进行显著性检验结果表明, 冬小麦光谱生态环境品质预测模

型通过 0.01 的显著性水平检验。如表 5 所示,在模型中 Y 代表蛋白质含量(%)。

表 5 北京地区冬小麦品质光谱与生态因子监测模型(n=73)

Tab.5 Model of ecological factors and spectrum protein estimation of winter wheat in Beijing area (n=73)

Model of ecological factors and spectrum protein estimation	R ²	F-text	F-crit	RRMSE	RE
Y=12.789+0.053X ₁ -0.753X ₂ -0.551X ₃ +5.024X ₄ +4.481*NDVIgreen	0.843	7.8	12.43	0.082	0.049

在该研究中,通过考虑结合遥感影像得到的植被指数数据作为一个因子与形成品质最关键的生态环境因子结合构建模型可以利用 R² 进行模型的检测。与该光谱生态环境品质模型决定系数和其它两种模型相比有明显的提高。R² 分别从 0.782 和 0.635 增加到 0.843。与生态环境品质模型和光谱品质模型相比,生态环境因子与光谱品质模型相对均方根误差(RRMSE)和相对误差(RE)降低,且降低幅度较大,说明生态环境光谱品质综合模型比生态环境品质模型和光谱品质模型有较强的预测效果。总体上,光谱生态环境品质模型的检验结果均优于生态环境品质模型和光谱品质模型,因而利用冬小麦生育期光谱生态环境参数进行本地区冬小麦品质预测会更准确更可靠。

3 结论与讨论

冬小麦蛋白质含量与 NDVIgreen 的相关系数随生育时期不同而不同;北京地区监测冬小麦蛋白质含量的最佳时相则为 5 月 11 日。但是在不同的年份,由于每年的气候条件差异性,其变化也会引起冬小麦发育期的变化,所以在今后的研究中要充分利用遥感周期覆盖的优势,在上述研究的基础上,每年根据具体的气候条件变化做出适当的调整。

该研究结果是通过分析一年数据所得,由于分区域大量均匀地收集小麦品质数据成本极高且费时费力,缺乏多年观测数据则无法进行多年情况综合分析。但对比历史气象资料得知,2010 年小麦关键生长期的气象因子基本上代表了北京多年的平均水

平,2010 年气象因子与北京 20 年(1990-2009 年)平均气象数据比较见作者以前的相关研究^[10]。

该研究结合生态环境数据和 NDVIgreen 构建了冬小麦光谱生态环境品质模型,冬小麦光谱生态环境品质预测模型均通过 0.01 的显著性水平检验。与生态环境品质模型和光谱品质模型相比,光谱生态环境品质模型相对均方根误差(RRMSE)和相对误差(RE)降低幅度较大。总体上,光谱生态环境蛋白质含量模型的检验结果均优于生态环境蛋白质含量模型和光谱蛋白质含量模型,因而利用冬小麦光谱和生态环境参数进行冬小麦品质预测会更准确。利用分辨率为 30m×30m 的 HJ-A 和 HJ-B 卫星遥感数据和生态环境数据构建的光谱生态环境蛋白质含量模型进行大面积的冬小麦遥感品质监测是可行的。同时,构建的模型精度也与采样点的布设有着密切的关系,由于时间、交通工具等原因,该试验在采样点布设的合理性和科学性上还存在一定的问题,也可能导致模型精度的降低。文中虽然得出了明显的结论,由于研究时间的限制,数据资料还比较缺乏,所有分布于北京地区的研究点的生态因子数据都是在 ARCGIS 软件支持下利用反距离权重插值法得到的,在一定程度上精度需要进一步提高;该研究只考虑了均温、降水、日照时数,但是影响冬小麦品质构成因素的生态环境因子还有不少,比如最低、最高温度、气温日较差以及其它各种生态环境灾害等的影响,使得模型的构建与生产实践还存在着一定程度的差距。今后仍需不断完善模型并与其它模型结合,从而增强系统性和综合性,提高模型的应用性。

参考文献:

- [1] Badri B B, Apan A A, Kelly R M, et al. Relating satellite imagery with grain protein content [J]. Proceedings of the Spatial Sciences Conference, 2003. (9): 22-27.
- [2] Petterson C G, Eckersten H. Prediction of grain protein in spring malting barley growth in northern Europe [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(2): 205-214.
- [3] Wang Jihua, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(4): 277-284.
- [4] Huang Wenjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun. Study on grain quality effecting factors and monitoring methods by using

- hyperspectral data in winter wheat [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 3: 143-148.
- [5] Tarpley L, Raja Reddy K, Gretchen F, et al. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration[J]. Crop Science, 2000, 40(2): 1814-1819.
- [6] Wang Z J, Wang J H, Liu L Y, et al. Prediction of grain protein content in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using plant pigment ratio (PPR)[J]. Field Crops Research, 2004, 90(2-3): 311-321.
- [7] Zhao C J, Liu L Y, Wang J H, et al. Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress [J]. International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation, 2005, 7(1): 1-9.
- [8] Kalubarme M H, Potdar M B, Manjunath K R, et al. Growth profile based crop yield models: A case study of large area wheat yield modelling and its extendibility using atmospheric corrected NOAA AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(10): 2037-2054.
- [9] Wang Dacheng, Li Cunjun, Song Xiaoyu, et al. Analysis of identifying important ecological factors influencing winter wheat protein content based on artificial neural networks[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26 (7): 220-226. (in Chinese)

下期预览

脉冲 γ 射线对光纤的辐射感生损耗

刘福华^{1,2}, 安毓英¹, 王平², 陈绍武², 谢红刚², 刘卫平², 邵碧波²

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 研究了光纤受 γ 射线辐照响应机制, 计算了光纤对 γ 射线吸收率、效应截面、Compton 电子的能通量及角度分布; 提出了瞬态辐射感生损耗的测量方法, 采用波长分别为 405、660、850、1 310、1 550 nm 的模拟宽带光纤传输系统, 设计了瞬态辐射感生损耗的实验测量系统。在平均光子能量 0.3 MeV、剂量率 2.03×10^7 Gy/s, 和平均光子能量 1.0 MeV、剂量率 5.32×10^9 Gy/s 的两种脉冲 γ 射线辐照条件下, 获得了 4 种光纤瞬态辐射感生损耗与剂量的关系、永久性感生损耗的谱分布和折射率变化结果: (1) 脉冲 γ 射线对光纤的瞬态辐射感生损耗随探测波长在近红外到可见光范围内的减小而增大; (2) 在相同辐照条件下, 多模光纤的瞬态辐射感生损耗稍大于单模光纤; (3) 辐射致光纤折射率降低; (4) 在一定剂量范围内, 多模光纤瞬态辐射感生损耗和剂量呈近似线性关系。研究表明: γ 射线导致光纤基质原子产生新的色心和光纤折射率降低, 色心对传输光子的共振吸收导致光纤吸收损耗增加, 折射率降低导致光纤波导损耗增加, 感生损耗是两种机制共同作用的结果。