

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 **2011**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 31 卷 第 21 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例·····	史利莎,严力蛟,黄璐,等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律·····	游巍斌,何东进,巫丽芸,等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例·····	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究·····	赵景柱,宋瑜,石龙宇,等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例·····	曹铭昌,刘高焕,徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征·····	凡非得,王克林,熊鹰,等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例·····	高凡,闫正龙,黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配·····	王娟,张春雨,赵秀海,等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应·····	王晓明,赵秀海,高露双,等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局·····	赵成章,任珩,盛亚萍,等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征·····	杨永川,穆建平, TANG Cindy Q, 等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化·····	邵剑文,张文娟,张小平 (6410)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林的乔木叶片功能性状特征·····	罗璐,申国珍,谢宗强,等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征·····	王丽艳,韩有志,张成梁,等 (6429)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响·····	张喜,崔迎春,朱军,等 (6442)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性·····	马成仓,高玉葆,李清芳,等 (6451)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析·····	司朗明,刘彤,刘斌,等 (6460)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏·····	周永斌,殷有,殷鸣放,等 (6469)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势·····	张常智,张明海 (6481)
基于 GIS 的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例·····	李超,张智,郭文超,等 (6488)
2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析·····	蒋春先,齐会会,孙明阳,等 (6495)
B 型烟粉虱对寄主转换的适应性·····	周福才,李传明,顾爱祥,等 (6505)
利用 PCR-DGGE 方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化·····	李永洙, Yongquan Cui (6513)
鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响·····	张宏,沈章军,阳贵德,等 (6522)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应·····	汪燕,李珊珊,李建宏,等 (6532)
10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系·····	王燕,李瑞香,董双林,等 (6540)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度·····	李大命,孔繁翔,于洋,等 (6551)
城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应·····	蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等 (6561)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性·····	杨宇,刘毅,董雯,等 (6568)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源·····	徐春英,李玉中,李巧珍,等 (6579)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响·····	肖国举,张强,张峰举,等 (6588)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数·····	梁亮,杨敏华,邓凯东,等 (6594)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征·····	张惠,杨正礼,罗良国,等 (6606)
专论与综述	
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望·····	黄娟,莫江明,孔国辉,等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成·····	李宁,白冰,鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响·····	杜成凤,李潮海,刘天学,等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评·····	石海佳,梁赛,王震,等 (6641)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界 15 种鹤数量极小的一种,主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地,以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚺、软体动物为主,也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔,喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类,主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录,濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

梁亮, 杨敏华, 邓凯东, 张连蓬, 林卉, 刘志霄. 一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数. 生态学报, 2011, 31(21): 6594-6605.

Liang L, Yang M H, Deng K D, Zhang L P, Lin H, Liu Z X. A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6594-6605.

一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数

梁 亮^{1,2}, 杨敏华^{1,*}, 邓凯东³, 张连蓬², 林 卉², 刘志霄⁴

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 徐州师范大学测绘学院, 徐州 221116;

3. 金陵科技学院动物科学与技术学院, 南京 210038; 4. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 吉首 416000)

摘要:提出了一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数——微分归一化氮指数(FD-NDNI)。以 FieldSpec Pro FR 地物光谱仪采集拔节后至孕穗前小麦的冠层光谱 190 份, 随机抽取 142 份作为训练集, 其余 48 份作为预测集。将光谱以小波阈值去噪法去噪后, 利用其 525、570 与 730 nm 处的一阶导数值, 采用差值、比值以及归一化的方法构建了 12 种光谱指数以实现小麦冠层氮含量的估测, 并与 mNDVI705、mSR 以及 NDVI705 等 22 种常用指数进行了比较分析。发现指数 FD-NDNI 对小麦冠层氮含量的估测结果最佳, 其估测模型(指数形式)校正集决定系数($C-R^2$)与预测集决定系数($P-R^2$)分别达 0.818 与 0.811, 优于 mNDVI705 等常用指数。进一步分析表明, 在各指数中, FD-NDNI 对叶面积系数最不敏感, 可最有效地避免冠层郁闭度等因素对氮含量估测的影响。为优化结果, 采用最小二乘支持向量回归算法(LS-SVR)对模型进行了改进, 当模型惩罚系数 C 与 RBF 核函数参数 g 取得最优解 6.4 与 1.6 时, 其 $C-R^2$ 与 $P-R^2$ 分别提高至 0.846 与 0.838, 具有比指数模型更高的精度。结果表明: FD-NDNI 是小麦冠层氮含量估测的优选指数, LS-SVR 为建模的优选算法。

关键词: 高光谱指数; 小麦; 氮; 叶面积指数; 遥感; 支持向量回归

A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy

LIANG Liang^{1,2}, YANG Minhua^{1,*}, DENG Kaidong³, ZHANG Lianpeng², LIN Hui², LIU Zhixiao⁴

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China

3 College of Animal Science and Technology, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China

4 College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China

Abstract: The nitrogen content of canopy leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important indices for monitoring wheat growth and yield. The Kjeldahl procedure as the common method for N assays is time-consuming, labor intensive and invasive. As a modern technique, hyperspectral remote sensing is an effective and non-invasive method for rapid estimation of plant nitrogen contents. In this study, a novel hyperspectral index, first derivative normalized difference nitrogen index (FD-NDNI), was developed to estimate the nitrogen content of wheat canopy by hyperspectral remote sensing technology. A total of 190 canopy samples of wheat ranging from jointing to booting stage were scanned by a FieldSpec Pro FR spectrometer, and the spectral data were then assigned randomly to calibration (142 data) and prediction (48 data), respectively. The data were pretreated by wavelet threshold denoising before analysis. Using the first derivative spectra at 525, 570 and 730 nm and the methods of difference, ratio and normalization, 12 new hyperspectral indices were developed to quantify the nitrogen content of wheat canopy. These indices were then compared with 22 commonly used hyperspectral

基金项目:国家自然科学基金项目(30570279); 中南大学优秀博士论文扶持项目(2008yb024); 江西省数字国土重点实验室开放基金资助项目(DLLJ201009); 河南理工大学矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(KLM201011); 江苏省“青蓝工程”资助项目

收稿日期: 2010-08-11; 修订日期: 2011-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangmhua@163.com

indices including mNDVI705, mSR and NDVI705. The accuracy of the index FD-NDNI developed was higher than that by the hyperspectral indices commonly used, as indicated by a calibration coefficient of determination ($C-R^2$) of 0.818 and a predicted coefficient of determination ($P-R^2$) of 0.811 of the estimation predicted by FD-NDNI. A further analysis showed that the FD-NDNI index described an exponential equation, therefore the FD-NDNI prediction was concise and unaffected by passivation. The sensitivity analysis of the susceptibility of FD-NDNI to interference of canopy density showed that the R^2 of the correlation between FD-NDNI and the leaf area index (LAI) was 0.536, which was lower than that between the commonly used hyperspectral indices and LAI. FD-NDNI was least sensitive to LAI among the hyperspectral indices and therefore least affected by canopy density when used to estimate the nitrogen content of wheat canopy. FD-NDNI was therefore an ideal spectral index sensitive to prediction, but insensitive to interference. An algorithm of the least squares support vector regression (LS-SVR) was finally used to optimize the FD-NDNI model. A step-search procedure in which a long step size was set first to determine the range of values and then followed by a short step size to determine the specific values, was carried out for rapid optimization of the penalty coefficient C and the RBF kernel function parameter g of LS-SVR models. When the parameters C and g reached the optimal values of 6.4 and 1.6, respectively, the $C-R^2$ and $P-R^2$ of the model reached 0.846 and 0.838, respectively, which were higher than those of the exponential model, and indicated that the LS-SVR model was more accurate. The results suggested that FD-NDNI was an optimal hyperspectral index for estimation of the nitrogen content of wheat canopy, and LS-SVR algorithm was a preferred modeling method.

Key Words: hyperspectral index; wheat; nitrogen; leaf area index; remote sensing; support vector regression

氮含量是反映作物营养状况的重要指标。实时、快速地获取氮含量信息是进行作物长势监测以及施肥调控的前提。目前,作物氮含量常采用凯氏定氮等化学分析方法测定。但这一方法存在耗时长、耗费大以及需采样测试等缺陷,且只能获取点源信息,难以在宏观尺度上展开,极大地影响了农业决策的全面性、时效性与客观性^[1]。遥感技术,尤其是高光谱遥感技术的出现,使大范围地进行作物氮含量的快速、无损监测成为可能^[2-5]。小麦作为一种重要的经济作物与科学研究的模式植物,其氮素的遥感监测更受到了广泛的关注。杨敏华等^[6]曾以高斯红边宽度实现了小麦冠层全氮的反演。Hansen 等^[7]则利用近绿光与蓝光波段构建归一化指数估测小麦植株的生物量与氮含量。Xue 等^[8]发现近红外波段与绿峰的比值可较敏感地反映小麦冠层的氮素状况。李映雪^[9]与 Zhu^[10]等则以近红外与红边波段构建了一系列的比值指数,且都可较好地表征小麦叶片氮含量信息。Zhao 等^[11]则利用 2000—2300 nm 波段范围的反射光谱构建了可敏感反映小麦氮含量的指数,并探讨了叶片含水状况对氮含量估测的影响。冯伟等^[12]通过对各种指数的比较分析后进一步指出,叶片氮含量的敏感波段主要存在于近红外平台和可见光波段,且红边区域尤为重要。

但目前用于估测作物氮含量的指数绝大部分系直接利用光谱的反射率值所构建。而在进行田间光谱采集的过程中,由于作物的郁闭度难以达到 100%,所采集的反射光谱往往是作物冠层与土壤的综合信息^[13]。因此,直接以光谱反射率所构建的指数通常包含了土壤等背景信息,其模型精度也会因此而受到影响。Demetiades-Shah 等^[1,13-14]的研究表明,导数处理可有效去除植被光谱中的土壤背景值,使估计出的作物理化参量更为可靠。故如能利用导数光谱构建指数,应能更精确反映出小麦冠层氮含量信息。本文将尝试利用导数光谱构建新的指数,使小麦氮含量的遥感估测获得更理想的结果。

1 材料与方法

1.1 田间胁迫试验

实验区位于 40°10'31"—40°11'18"N, 116°26'10"—116°27'05"E, 总占地 167 hm², 地势平坦, 海拔高度 30—100 m。地处暖温带大陆性季风气候区, 年平均日照时数 2684 h, 年平均气温 13 ℃, 年平均降水量 507 mm。表层土壤(0—30cm)有机质含量在 1.42%—1.48% 之间, 全氮含量在 0.80%—1.15% 之间。试验对象为冬小麦中优 9507, 为保证其含氮水平有较大的变化范围以便于建立估测模型, 于 2007 年进行了从不施氮到施

氮过剩的胁迫试验:将实验田 12 个小区(60 m × 60 m)内的小麦分为 6 个梯度(每梯度设置 2 个重复小区)进行施肥,其氮肥施用量依次为 0(N1)、75(N2)、150(N3)、225(N4)、300(N5)与 375 kg/hm²(N6)。

1.2 田间光谱采集与预处理

以 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR 地物光谱仪采集拔节后至孕穗前小麦的冠层光谱。仪器光谱范围为 350—2500 nm,在 350—1000 nm 波段的光谱分辨率为 3 nm,采样间隔为 1.4 nm;在 1000—2500 nm 波段的光谱分辨率为 10 nm,采样间隔为 2 nm。光谱采集在风力小于 3 级,无卷云与浓积云的晴朗天气下进行。为保证光谱采集时有较高的太阳高度角,时间范围规定为地方时 10:00—15:00。为避免作业人员造成干扰,光谱采集时着深色服装,面向太阳立于目标区后方。传感器探头(25°视场角)垂直向下,高度保持在冠层上方 1.3 m 附近,每一样本重复测量 10 次取均值。每半小时用参考板对光谱仪进行一次校正,以消除环境变化所带来的影响。共采集样本 190 份,随机抽取 142 份作为训练集,其余 48 份作为预测集。

光谱以小波阈值去噪法进行去噪。即先对光谱进行多尺度分解,使其中的高频信号与低频信号分离,然后去除其中的高频信号(随机噪声),再重构便可得到去除随机噪声的光谱。小波各参数选择方案经正交试验确定,其中小波类型取 haar,分解层数为 5,阈值方案选择 Fixed form threshold,噪声结构定为 Unscaled white noise^[1]。

1.3 小麦叶面积系数与氮含量测定

光谱采集时进行同步采样,编号带回实验室测定叶面积系数(LAI)与氮含量。其中 LAI 采用干重法测定,即同一处理取 50—100 片叶子(在植株不同部位随机选取)进行面积测量并烘干称重,再根据被测对象的干重反推出叶面积,并以激光叶面积仪(CI-203 型)校正。叶片氮含量采用凯氏定氮法(GB 7173-87)测定,即取当时已全展的最顶部以及邻位下叶 70—100 片,烘干后粉碎混匀后用浓硫酸高温硝煮,使其中含氮有机化合物转化为氨态氮,再以酸标准溶液滴定,然后根据标准液的消耗量求出氮含量。

1.4 氮含量估测的常用光谱指数

为明确新光谱指数是否能更精确地反映作物的氮含量信息,必须将其与已有指数进行比较。本文参考相关文献,选出物理意义明确、认可度较高的 22 个指数进行比较分析。各指数具体计算方法与文献来源见表 1。

1.5 新光谱指数的构建

目前虽已有多种光谱指数可用于作物氮含量估测,但绝大部分系直接以光谱反射率值所构建,易受土壤等背景因素的影响。为消除这一影响,对小麦光谱进行一阶导数处理^[13],再选用可敏感反映氮含量的光谱区域进行分析以构建新指数。由图 1 可知,小麦一阶导数光谱在 525、570、730 nm 处为波峰或波谷的形态。综合植物生理学与光谱学的相关知识可知:525 nm 处的峰值系蓝边(蓝光吸收带向绿峰过渡部分)的拐点所产生;570 nm 处的波谷系黄边(绿峰向红光吸收带过渡部分)的拐点所产生;730 nm 处的峰值则系植红边(红光吸收带向近红外高台阶过渡部分)的拐点所产生。而蓝边、黄边与红边系 3 处可表征植物长势的敏感区域,通常认为包含了植物理化参数的特征信息^[33]。因此,利用 525、570、730 nm 处的导数光谱,以差值、比值以及归一化等方法构建新指数(表 2),然后与表 1 中各指数进行比较分析以实现其选优。

1.6 模型的建立与优化

利用校正集的 142 份样本,以各光谱指数为自变量 x ,小麦冠层氮含量为因变量 y 建立估测模型。建模时应根据样本散点图的特点,在直线、指数、对数以及二次多项式等函数形式中择取最佳类型。模型建立后,利用预测集的 48 份样本对其预测能力进行检验,并根据模型的拟合精度与预测能力筛选出最佳光谱指数。

上述建模方法需预先判定函数类型,若散点图并未表现出较规则的函数形态时,其类型只能通过反复尝试确定。而基于结构风险最小化原理的支持向量机(Support vector machine, SVM)算法建模时无需预先判定函数类型,并能在保证训练精度的同时降低学习机器的复杂度以获得良好的推广能力,使模型具备较高的预测精度^[34]。故本文筛选出最佳指数后,将尝试以 SVM 中的最小二乘支持向量回归(Least squares support

vector regression, LS-SVR) 算法实现模型的优化。上述数据处理与建模分析均在 MATLAB7.0 中完成。

表 1 各源自参考文献的高光谱指数列表

Table 1 The hyperspectral indices from references

指数 Index	计算公式或定义 Formula or definition	文献出处 references
NDVI705	$(\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705})$	[15-16]
mNDVI705	$(\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{445})$	[16-17]
mSR705	$(\rho_{750} - \rho_{445}) / (\rho_{705} - \rho_{445})$	[16-17]
REP	$700 + 40 [(\rho_{670} + \rho_{780}) / 2 - \rho_{700}] / (\rho_{740} - \rho_{700})$	[18]
VOG1	ρ_{740} / ρ_{720}	[19]
VOG2	$(\rho_{734} - \rho_{747}) / (\rho_{715} + \rho_{726})$	[19]
VOG3	$(\rho_{734} - \rho_{747}) / (\rho_{715} + \rho_{720})$	[19]
NDNI	$[\log(1/\rho_{1510}) - \log(1/\rho_{1680})] / [\log(1/\rho_{1510}) + \log(1/\rho_{1680})]$	[20-21]
PRI	$(\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$	[22-23]
OSAVI	$(1 + 0.16)(\rho_{800} - \rho_{670}) / (\rho_{800} + \rho_{670} + 0.16)$	[24]
NVI	$(\rho_{777} - \rho_{747}) / \rho_{673}$	[25]
NDCI	$(\rho_{762} - \rho_{527}) / (\rho_{762} + \rho_{527})$	[26]
RI _{1dB}	ρ_{735} / ρ_{720}	[27]
MCARI ₁	$1.2 [2.5(\rho_{800} - \rho_{670}) - 1.3(\rho_{800} - \rho_{500})]$	[28]
DVI	$\rho_{810} - \rho_{680}$	[29]
TVI _{BL}	$0.5 [120(\rho_{750} - \rho_{500}) - 200(\rho_{670} - \rho_{550})]$	[30]
GREEN-NDVI	$(\rho_{750} - \rho_{550}) / (\rho_{750} + \rho_{550})$	[31]
V _i _{opt}	$(1 + 0.45)((\rho_{800})^2 + 1) / (\rho_{670} + 0.45)$	[32]
RVI(810, 560)	ρ_{810} / ρ_{560}	[8]
RVI(950, 660)	ρ_{950} / ρ_{660}	[10]
RVI(810, 660)	ρ_{810} / ρ_{660}	[10]
NDVI(573, 440)	$(\rho_{573} - \rho_{440}) / (\rho_{573} + \rho_{440})$	[6]

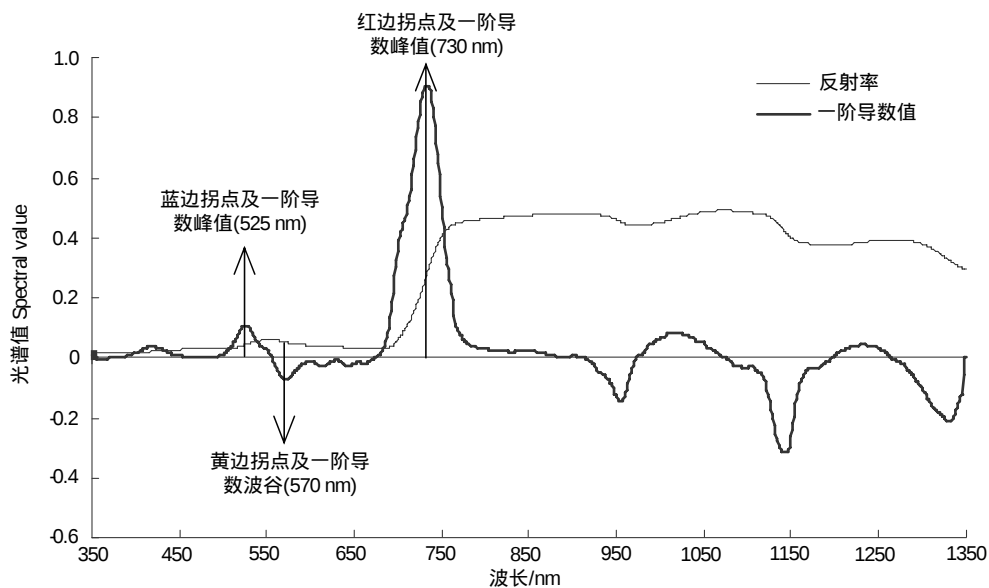


图 1 表征小麦理化性质的特征波段在光谱中的位点

Fig. 1 The spectra locus of the characteristic band of wheat chemophysical properties

图中反射率值与一阶导数值均处理到-1—1

表 2 一阶导数光谱所构建的光谱指数
Table 2 Hyperspectral indices using first derivative spectra

指数 Index	计算公式或定义 Formula or definition	命名与简写 Naming and abbreviated
FD ₇₃₀	光谱 730 nm 处一阶导数值	—
FD ₅₇₀	光谱 570 nm 处一阶导数值	—
FD ₅₂₅	光谱 525 nm 处一阶导数值	—
FD ₇₃₀₋₅₂₅	光谱 730 nm 与 525 nm 处一阶导数的差值	—
FD _{730/525}	光谱 730 nm 与 525 nm 处一阶导数的比值	—
FD _{(730-5725)/(730+525)}	光谱 730 nm 与 525 nm 处一阶导数的归一化值	微分归一化氮指数 (FD-NDNI)
FD ₇₃₀₋₅₇₀	光谱 730 nm 与 570 nm 处一阶导数的差值	—
FD _{730/570}	光谱 730 nm 与 570 nm 处一阶导数的比值	—
FD _{(730-570)/(730+570)}	光谱 730 nm 与 570nm 处一阶导数的归一化值	—
FD ₅₂₅₋₅₇₀	光谱 525 nm 与 570 nm 处一阶导数的差值	—
FD _{525/570}	光谱 525 nm 与 570 nm 处一阶导数的比值	微分比值氮指数 (FD-SR)
FD _{(525-570)/(525+570)}	光谱 525 nm 与 570nm 处一阶导数的归一化值	—

2 结果与分析
2.1 各光谱指数估测模型比较分析

各光谱指数所建立的小麦冠层氮含量估测模型见表 3。以模型校正集决定系数 (Calibration R^2 , $C-R^2$)、调整决定系数 (Adjusted R^2 , Adj. R^2) 以及校正集均方根误差 (Root mean square error of calibration set, $RMSEC$) 为指标进行比较分析。可知在全部指数中, 估测精度较高的 6 个指数依次为 FD-NDNI、FD-SR、mNDVI705、mSR705、NDVI705 以及 GREEN-NDVI705, 其模型表达式的直观形状如图 2 所示。其中 FD-NDNI 为指数模型, FD-SR 与 mSR705 为对数模型, 其余的均为线性模型。由图可知, mNDVI705、mSR705、NDVI705 与 GREEN-NDVI705 等常用指数所建立的模型 R^2 与 Adj. R^2 分别在 0.771 与 0.748 以及 0.770 与 0.746 之间, $RMSEC$ 则在 0.424 与 0.445 之间, 均具有较高的精度。但比较分析表明, 本文所提出的指数 FD-NDNI 与 FD-SR 具有更好的估测结果。其中 FD-NDNI 所建立的模型 R^2 与 Adj. R^2 分别达 0.818 与 0.817, $RMSEC$ 仅为 0.378, 估测精度最高; 其散点图中各样本点在曲线附近最集中, 与曲线的走向也最为吻合, 取得了最佳结果。说明与 mNDVI705 等指数相比, FD-NDNI 能更好地实现小麦冠层氮含量的估测。

除了估测精度, 表达形式是否简洁, 意义是否明确也是进行模型评价的重要指标。指数 FD-NDNI 系 730 nm 与 525 nm 两个波段一阶导数值归一化计算结果, 其取值在 -1—1 之间。一般而言, 归一化指数在取值较大时会出现钝化现象, 即当取值接近 1 (或 -1) 时, 随着所表征的理化参数 (如氮含量) 的增加, 其指数值的增幅将逐渐减小而使其灵敏性下降^[33,35]。因此, 若指数所建立的最佳模型系直线方程, 由于自变量与因变量呈直线变化关系, 则模型也会相应地出现钝化现象, 即当指数取值接近 1 (或 -1) 时, 将无法进行准确估测。而如果所建模型为指数方程, 由于自变量与因变量呈指数变化关系 (即通常所称的指数增长), 则可避免这一现象, 使指数取值接近 1 (或 -1) 时, 模型仍有较准确的估测能力。mNDVI705、NDVI705 与 GREEN-NDVI 均属于归一化指数 (表 1), 所建模型虽也具有形式简洁的特点, 但其表达形式系直线方程, 无法避免模型随指数的钝化而钝化的现象。而 FD-NDNI 所建模型系指数方程, 则可有效避免这一现象, 使模型具备较好的推广性。故比较而言, 指数 FD-NDNI 模型的实际表达形式 (即估测精度最高时模型的表达形式) 与理论上应具备的表达形式存在良好的一致性, 具有形式简洁, 理论意义明确的优点, 进一步表明 FD-NDNI 是氮含量估测的适宜指数。

表 3 各光谱指数氮含量估测模型及其评价指标

Table 3 The nitrogen content estimation models and its evaluation indicators of the spectral indices ($n=142$)

指数名称 Index name	模型函数 Model function	评价指标 Evaluating indicator		
		$C-R^2$	RMSEC	Adj. R^2
NDVI705	$y=5.641x+0.866$	0.750	0.443	0.748
mNDVI 705	$y=5.366x+0.560$	0.771	0.424	0.770
mSR705	$y=1.800\ln(x)+1.186$	0.754	0.439	0.752
REP	$y=0.298x-211.975$	0.732	0.458	0.706
VOG1	$y=4.677\ln(x)+1.314$	0.641	0.517	0.639
VOG2	$y=-51.585x^2-27.193x+0.628$	0.684	0.499	0.682
VOG3	$y=-39.151x^2-23.81x+0.790$	0.687	0.496	0.682
NDNI	$y=-322.09x^2+104.38x-3.897$	0.685	0.494	0.680
PRI	$y=22.673x+4.875$	0.654	0.517	0.649
OSAVI	$y=2.939\ln(x)+5.478$	0.702	0.480	0.697
NVI	$y=0.914x+2.721$	0.504	0.620	0.451
NDCI	$y=9.329x-2.884$	0.738	0.450	0.733
RI _{dB}	$y=3.862x-2.184$	0.725	0.461	0.721
MCARI _a	$y=-0.380x+0.128$	0.532	0.602	0.530
DVI	$y=0.060x+2.285$	0.519	0.610	0.514
TVI _{BL}	$y=-0.001x+2.357$	0.521	0.609	0.518
GREEN-NDVI	$y=8.767x-1.867$	0.748	0.445	0.746
$V_{i_{opt}}$	$y=-6.344x^2+44.730x-74.270$	0.737	0.456	0.733
RVI(810,560)	$y=2.374\ln(x)-0.208$	0.723	0.466	0.721
RVI(950,660)	$y=1.385\ln(x)+0.933$	0.680	0.501	0.678
RVI(810,660)	$y=1.305\ln(x)+1.114$	0.665	0.513	0.662
NDVI(573,440)	$y=-13.917x+8.828$	0.733	0.452	0.731
FD ₇₃₀	$y=1.348\ln(x)+4.909$	0.692	0.488	0.689
FD ₅₇₀	$y=-24.446x+2.799$	0.552	0.589	0.549
FD ₅₂₅	$y=16.441x+2.508$	0.172	0.800	0.169
FD ₇₃₀₋₅₂₅	$y=1.1618\ln(x)+5.006$	0.740	0.449	0.736
FD-SR	$y=2.063\ln(x)+0.173$	0.815	0.381	0.813
FD-NDNI	$y=0.799\exp(2.211x)$	0.818	0.378	0.817
FD ₇₃₀₋₅₇₀	$y=2.436x+2.473$	0.583	0.568	0.579
FD _{730/570}	$y=-0.009x+3.731$	0.065	0.850	0.061
FD _{(730-570)/(730+570)}	$y=-4.983x+8.143$	0.280	0.746	0.276
FD ₅₂₅₋₅₇₀	$y=11.650x+2.407$	0.385	0.690	0.381
FD _{525/570}	$y=-0.024x+3.786$	0.049	0.858	0.044
FD _{(525-570)/(525+570)}	$y=-2.079x+4.629$	0.597	0.558	0.591

2.2 各光谱指数估测模型适应性检验

为进一步比较各指数所建模型对未知样本的适应性,利用各模型分别对预测集的 48 个未知样进行预测。将预测结果与实测值进行回归拟合,以模型预测集决定系数(Prediction R^2 , $P-R^2$)与预测集均方根误差(Root mean square error of prediction set, $RMSEP$)为主要依据,并结合拟合方程的斜率与偏移两项指标对模型进行评价。所有指数中,预测结果最好的 6 个指数分析结果见图 3。可知 mNDVI705 与 mSR705 等常用指数都能较好地实现小麦冠层氮含量的预测。但比较而言,本文所提出的指数 FD-NDNI 与 FD-SR 具有更高的预测精度。其中又以指数 FD-NDNI 预测效果最佳,其 $P-R^2$ 值达 0.811,在各模型中最高;其拟合方程斜率达 0.773,在各模型中最接近 1;偏移与 $RMSEP$ 分别为 0.853 与 0.327,在各模型中最小。结合上文对校正集的分析可知,指数 FD-NDNI 同时具有最高的准确率与最佳的稳健性,是进行小麦氮含量估测的优选指数。

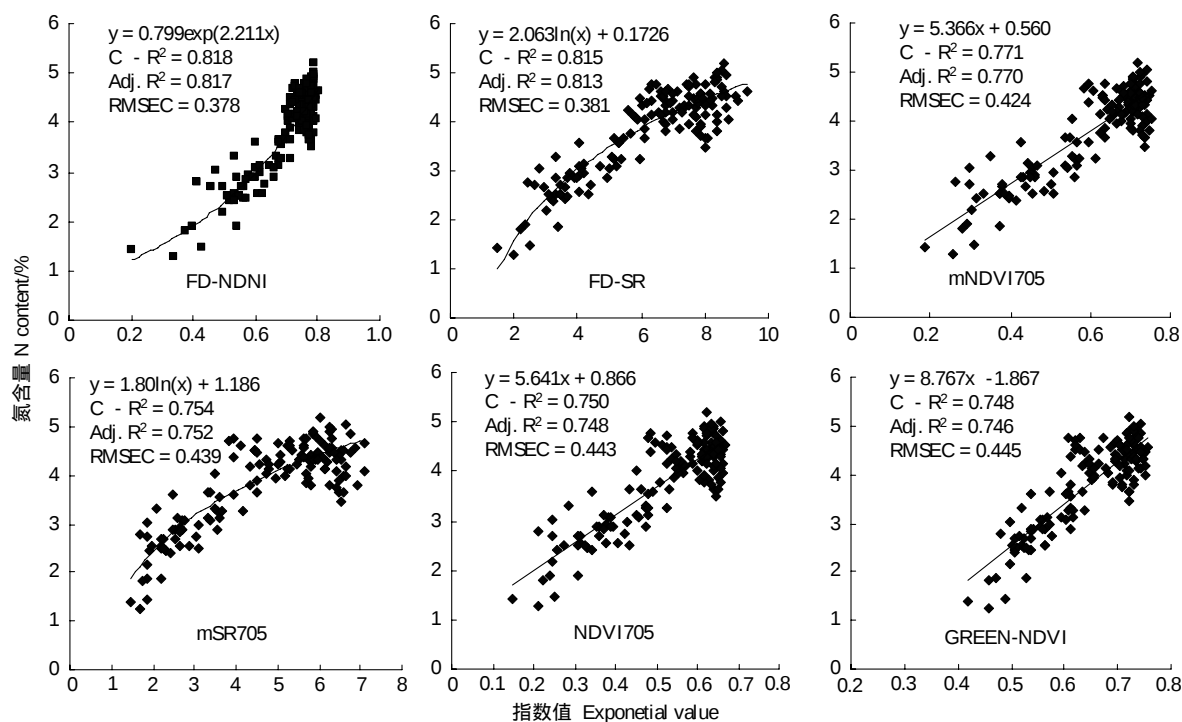


图2 小麦冠层叶片氮含量与各光谱指数的定量关系 ($n=142$)

Fig. 2 Quantitative relationships between wheat canopy leaf nitrogen content and hyperspectral indices

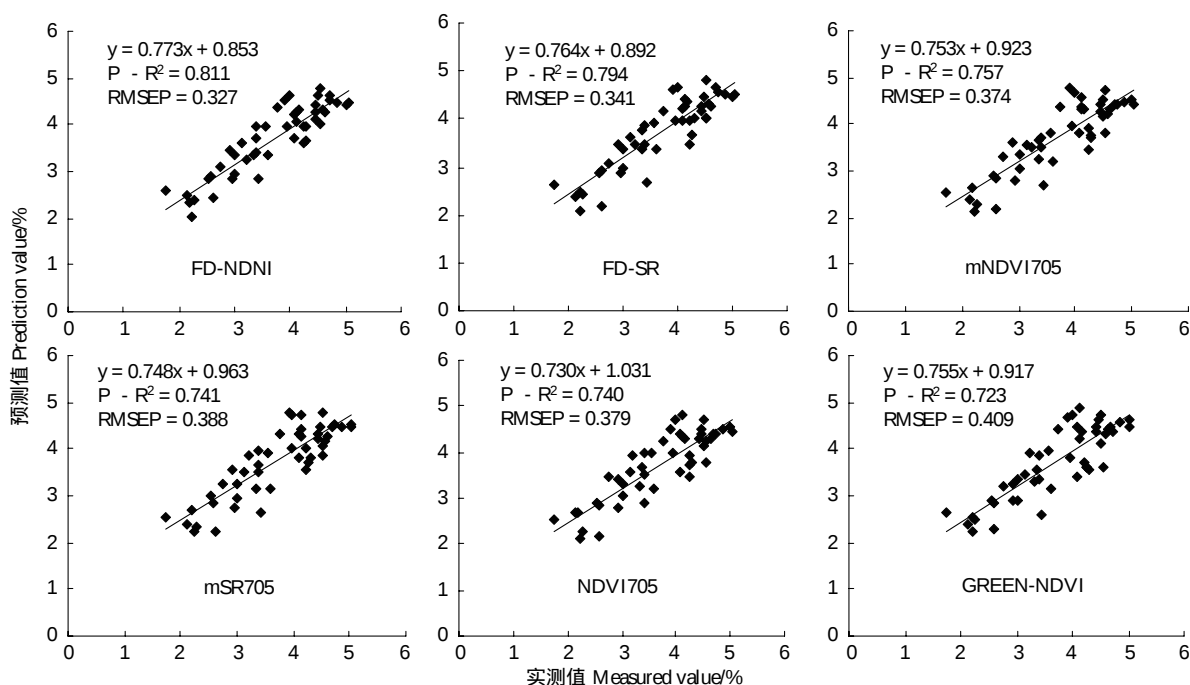


图3 各氮含量估测模型对未知样预测值与实测值之间的关系 ($n=48$)

Fig. 3 Measured value versus predicted value of the nitrogen content estimation models in prediction set

2.3 指数 FD-NDNI 对 LAI 的敏感性分析

若将指数应用于遥感影像的分析,则在遥感影像每一个像元中所查询到的氮含量信息不仅与叶片氮含量相关,而且与每一像元中的叶片总量相关。为了真实反映小麦冠层氮含量的信息,所用指数应尽可能地对叶片总量不敏感,才能避免冠层郁闭度等因素对小麦冠层氮含量估测的干扰。LAI 是反映冠层郁闭度的良好指

标,可较好地表征叶片总量的信息。因此,为评估 FD-NDNI 能否有效避免冠层郁闭度的干扰,将估测精度较高的 6 个指数与 LAI 按 2.1 中的方法分别建模。如果与其它指数相比,FD-NDNI 能有效地避免冠层郁闭度的干扰,则其对 LAI 应不敏感,其模型也应具有较小的决定系数与较大的均方根误差。

各指数与 LAI 值所建立的模型见表 4。虽总体而言,包括 FD-NDNI 在内的各光谱指数所建模型决定系数值均较高($R^2 > 0.536$),但此系氮含量值与 LAI 值本身有较高的线性相关($R^2 = 0.508$)所致。在 6 个指数中,指数 FD-NDNI 所建立的模型 R^2 与 Adj. R^2 分别为 0.536 与 0.534,在各指数中最低;RMSE 达 0.784,在各指数中最高。即 FD-NDNI 模型估测能力最差,对 LAI 值最不敏感。可知在各指数中,FD-NDNI 不但可最敏感地反映氮含量信息,且可最有效地避免冠层郁闭度等因素的干扰,符合“对目标因子尽量敏感,而对干扰因子尽量不敏感”这一光谱指数设计原则^[36]。说明 FD-NDNI 在遥感分析中具有较高的应用价值,是进行小麦冠层氮含量估测的优选指数。

表 4 各光谱指数与叶面积系数的相关模型($n=190$)

Fig. 4 The correlation models between LAI and hyperspectral indices

变量名称 Name	模型函数 Model function	评价指标 Evaluating indicator		
		R^2	RMSE	Adj. R^2
NDVI705	$y = 0.197 \exp(4.383x)$	0.757	0.571	0.756
mNDVI 705	$y = 0.152 \exp(4.209x)$	0.715	0.619	0.713
mSR705	$y = 0.602x - 0.554$	0.709	0.625	0.707
GREEN-NDVI	$y = 0.033 \exp(6.327x)$	0.784	0.538	0.783
FD-SR	$y = 0.490x - 0.817$	0.588	0.743	0.587
FD-NDNI	$y = 9.086x - 4.111$	0.536	0.784	0.534
N 含量	$y = 1.016x - 1.665$	0.508	0.813	0.505

2.4 指数 FD-NDNI 生物学意义分析

在作物理化参数的估测中,一个理想的指数不但应具有良好的估测精度,且应具备较明确的生物学意义。FD-NDNI 系 730 nm 与 525 nm 两个波段所构建,指数的生物学意义主要由两者所表征的植物生理学信息所决定。绿色植物一个显著特点是因叶绿素对太阳光的特征吸收,使其光谱在蓝光与红光处反射率很低,而在绿光处相对较高,形成明显的绿峰^[33]。525 nm 是小麦蓝光吸收带向绿峰过渡部分——蓝边的拐点,经一阶导数处理后,便存在一峰值。由于氮素系植物需求量最大的营养元素之一,当植物体内氮含量发生变化时,其色素含量以及光合能力也会相应地受到影响。当氮含量充足,机能活动旺盛时,叶绿素对蓝光与红光吸收功能较强,导致绿峰凸出明显,光谱 525 nm 处斜率较大,其一阶导数值也相应较大;而当氮含量不足,各生理活动受到胁迫,叶绿素对蓝光与红光吸收功能减弱,绿峰被削平,525 nm 处斜率减小,其一阶导数值也相应减小。因此,525 nm 波段可较敏感地反映出小麦冠层氮含量信息。

绿色植物另一特点是在 700—1200 nm 波段范围内,由于叶片内海绵状叶肉细胞对近红外光谱的强反射以及多层叶片对近红外光谱的加性反射,使其反射率在红光吸收带后急剧上升,形成独特的近红外高台阶^[33]。730 nm 系红光吸收带向近红外高台阶的过渡部分——红边的拐点,经一阶导数处理后,同样存在一峰值。当植物体内氮含量充足,机能活动旺盛时,叶绿素对红光的吸收功能较强,红边起始位置偏向红端,导致红边相对陡峭,光谱 730 nm 处斜率较大,其一阶导数值也相应较大;当氮含量降低,植物体受到胁迫,其光谱红边则表现出通常所谓的“红端蓝移”现象,使红边相对平缓,730 nm 处斜率减小,其一阶导数值也相应较小。因此,730 nm 也是敏感反映小麦氮含量的特征波段。

然而,虽然 525 nm 与 730 nm 均系可敏感反映作物氮含量的波段,但由于在野外进行光谱采集时,冠层反射率受到辐射强度、辐射方向以及叶倾角分布函数的变化等诸多因素的影响,对任意一单波段值,都会因一个因素的变化而导致巨大的变化。只有当选用两个或多个波段时,由于环境因子对不同波段将产生同步影响,才可采用比值或归一化的方法使其部分抵消^[35]。因此,文中单独以 525 nm 或 730 nm 所建立的模型均未取

得理想的结果($R^2<0.692$,表3),而采用两者的比值与归一化形式所构建的指数 FD-NDNI 与 FD-SR 则都取得了较好的结果($R^2>0.815$,表3)。而根据上文分析可知,两者中 FD-NDNI 所建模型具有最高的精度与稳健性,且可最有效地避免郁闭度等因素的干扰,故将作为最佳指数进行下一步的模型优化分析。

2.5 LS-SVR 模型

为更精确地实现小麦冠层氮含量的估测,采用 LS-SVR 算法对模型进行优化。以指数 FD-NDNI 作为因变量,氮含量值作为自变量,利用校正集的 142 份样本建立 LS-SVR 模型。模型的核函数选用径向基核(RBF),对结果影响较大的两个参数(惩罚系数 C 与 RBF 核函数参数 g)通过交叉验证确定,其余参数采用默认值^[37]。交叉验证采用格网搜索法进行。为降低搜索难度与节省计算时间,本文将格网搜索分为两步进行。第一步采用较大的搜索步长在较大的取值范围中进行寻优,第二步根据第一步的结果确定取值范围并设定较小的搜索步长以获得最佳参数取值。格网搜索的结果如表 5 所示,最终确定 LS-SVR 模型的最佳参数组合为 $C=6.4, g=1.6$ 。

表 5 LS-SVR 模型参数 C 与 g 寻优结果
Table 5 LS-SVR model parameters C and g optimization results

参数名称 Parameter name	参数取值 Parameter value	
	步骤一 Step one	步骤二 Step two
惩罚系数 Penalty coefficient(C)	$0.01 \leq C \leq 10000$	$0.1 \leq C \leq 100$
RBF 参数 RBF parameter(g)	$0.01 \leq g \leq 1000$	$0.1 \leq g \leq 10$
搜索步长 Step-size in search	10	2
寻优结果 Optimization results	$C=10; g=1$	$C=6.4; g=1.6$

将 LS-SVR 模型对校正集的拟合结果与标准值进行回归拟合以分析模型精度,其结果见图 4。其拟合方程 $C-R^2$ 为 0.846,比指数模型($C-R^2=0.818$)高; $RMSEC$ 为 0.321,则比指数模型($RMSEC=0.342$)要低;斜率为 0.847,比指数模型(斜率为 0.820)更接近于 1;偏移为 0.564,比指数模型(偏移为 0.664)更小。说明相比指数模型,LS-SVR 算法建立的估测模型对校正集样本具有更好的拟合结果。

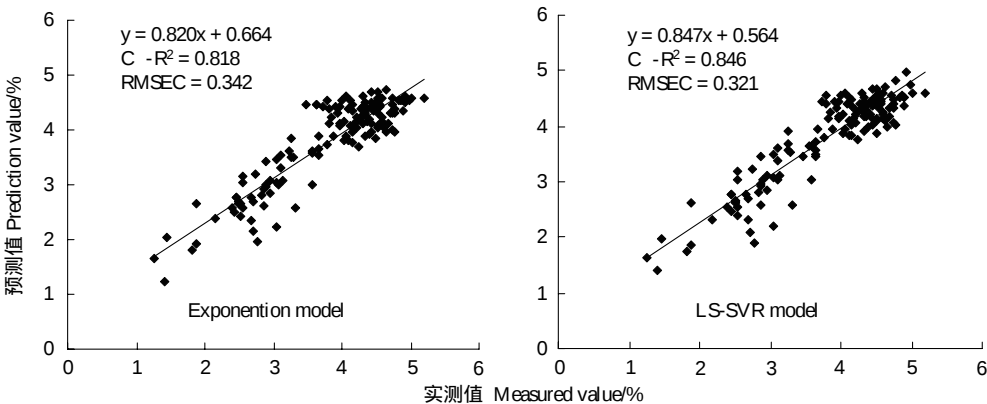


图 4 LS-SVR 与指数模型对校正集样本氮含量拟合值与实测值之间的关系 ($n=142$)
Fig. 4 Measured value versus the fitted value of exponential model and SVR model in calibration set

为进一步检验 LS-SVR 模型对未知样本的适应性,利用 LS-SVR 模型对预测集 48 个未知样本进行预测,将模型预测结果分别与标准值进行回归拟合以评价其预测精度,结果见图 5。可知 LS-SVR 模型的样本点在回归线附近更为集中, $P-R^2$ 达 0.838,比指数模型($P-R^2=0.811$,结果见图 3)更高;斜率达 0.803,比指数模型(斜率为 0.773)更接近于 1;而 $RMSEP$ 与偏移分别为 0.309 与 0.734,比指数模型($RMSEP$ 为 0.327,偏移为 0.853)更小。说明与指数模型相比,LS-SVR 模型不但对检验集样本具有更好的拟合结果,也具有更好的预测效果,是建模的优选方法。

3 结论与讨论

高光谱技术的出现使遥感影像具备了图谱合一的特征,可从中获得详细的光谱维信息以实现与地物光谱的精确匹配。因此,以地物光谱为基础,精准地定位可敏感反映被测对象的特征波段以构建光谱指数,已成为农业遥感研究的一大热点^[33]。由于氮素是反映作物长势与生理状况的重要的指标,构建一种可精确地实现氮含量估测的光谱指数更受到了广泛的关注。众多学者以马铃薯、油菜、玉米、水稻以及小麦等作物为对象进行了一系列研究,试图设计出既能敏感反映作物氮含量,又不受植郁闭度以及其它环境因子所干扰的新光谱指数。目前,除 NDVI705 等传统指数外,还出现了 NDNI、NDVI(573,440)、Viopt、RVI(810,560)、RVI(950,660)以及 RVI(810,660)等诸多以氮素估测为目标的光谱指数^[2-10,20-21]。但上述指数大部分系直接采用作物的反射光谱所构建。而这一方法所设计的指数往往存在固有的缺陷,即当目标物的下垫面(如土壤)对光谱信息有一定贡献时,其指数便容易受到背景信息的影响而在模型中引入干扰因子。本文研究结果显示,上述指数在小麦氮含量估测中均未取得理想的结果(模型 $R^2 < 0.74$),其原因之一很可能是本文数据系在小麦拔节后至孕穗前所采集,难以保证植株处于完全郁闭的状态,因此对估测精度造成了影响。

但在农作物理化参数的遥感获取中,土壤作为背景信息而存在是难以避免的。因此,如果所设计的光谱指数可削弱甚至去除土壤背景的干扰,将可提高作物理化参量遥感估测的精度。本文提出的指数 FD-NDNI 系由红边与蓝边拐点这两处可敏感反映氮含量信息的特征波段的一阶导数值所构建,而光谱经导数处理后可削弱甚至去除土壤背景的影响^[1,13-14],因此,FD-NDNI 可在敏感反映氮含量信息的同时去除土壤背景的干扰,从而取得了较理想的结果(指数模型 $R^2 = 0.818$)。且进一步分析表明,这一指数对 LAI 的敏感性较低,能有效避免叶片总量的干扰,符合 Verstraete^[36]所提出的光谱指数设计原则,即所构建的光谱指数对干扰因子尽可能不敏感,而对于待反演的植被参量尽可能敏感,是进行小麦氮含量估测的优选指数。当然,这一结果是在本研究所采用的有限样本集中获得,FD-NDNI 是否能在不同条件、不同地区所种植的小麦以及其它作物种类中取得理想的结果还有待进一步验证。

除光谱指数外,建模方法的选择对估测结果也有较大影响。SVM 是一种基于结构风险最小化原理的机器学习算法,能保证模型同时具备良好的训练精度与泛化能力,已在遥感分析中获得了成功的应用^[1,38-39]。本文比较分析表明,LS-SVR 可取得比传统 PLS 算法更精确的结果,是建模的优选方法。但这一算法对惩罚系数 C 与核函数参数 g 的选取较为敏感,若参数选用不当,易使模型产生过拟合现象而无法做出正确的预测^[1]。目前, C 与 g 常采用格网搜索法进行参数寻优,但存在计算量大、耗时太长的缺陷。本文采用分步搜索的方法解决这一问题,即首先以较大的搜索步长确定取值范围,然后以较小的步长确定具体取值,从而实现了参数 C 与 g 最佳值的快速、准确获取。

References:

- [1] Liang L, Yang M H, Zang Z. Determination of wheat canopy nitrogen content ratio by hyperspectral technology based on wavelet denoising and support vector regression. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 248-253.
- [2] Jain N, Ray S S, Singh J P, Panigrahy S. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. Precision Agriculture, 2007, 8(4/5): 225-239.

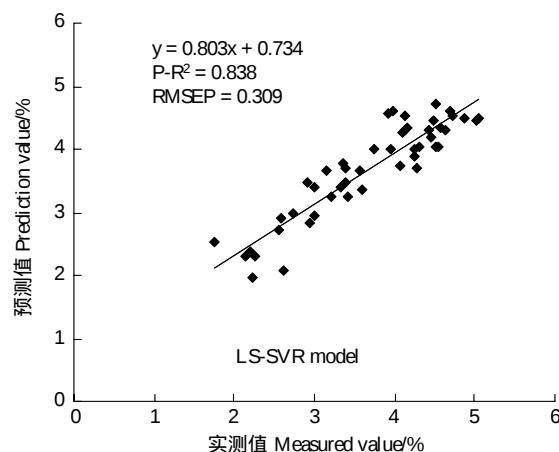


图5 LS-SVR 模型对未知样氮含量预测值与实测值之间的关系 ($n=48$)

Fig. 5 Measured value versus predicted value of LS-SVR model in prediction set

- [3] Müller K, Böttcher U, Meyer-Schatz F, Kage H. Analysis of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 172-182.
- [4] Stroppiana D, Boschetti M, Brivio P A, Bocchi S. Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 119-129.
- [5] Ryu C, Suguri M, Umeda M. Model for predicting the nitrogen content of rice at panicle initiation stage using data from airborne hyperspectral remote sensing. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(4): 465-475.
- [6] Yang M H, Liu L Y, Liu T J, Huang W J, Zhao C J. Research on a method to retrieve biophysical and biochemical parameters of wheat canopy with hyperspectral remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(4): 316-321.
- [7] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542-553.
- [8] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Dai T B, Zhu Y. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1): 135-142.
- [9] Li Y X, Zhu Y, Tian Y C, Yao X, Qin X D, Cao W X. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 32(2): 203-209.
- [10] Zhu Y, Yao X, Tian Y C, Liu X J, Cao W X. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 1-10.
- [11] Zhao C J, Wang J H, Liu L Y, Huang W J, Zhou Q F. Relationship of 2100—2300 nm spectral characteristics of wheat canopy to leaf area index and leaf N as affected by leaf water content. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 333-338.
- [12] Feng W, Zhu Y, Tian Y C, Cao W X, Yao X, Li Y X. Monitoring leaf nitrogen accumulation with hyper-spectral remote sensing in wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 23-32.
- [13] Demetriades-Shah T H, Steven M D, Clark J A. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 33(1): 55-64.
- [14] Zhang L P, Zheng L F, Tong Q X. The estimation of vegetation variables based on high resolution spectra. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 111-114.
- [15] Gitelson A A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143: 286-292.
- [16] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [17] Datt B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants; tests using Eucalyptus leaves. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154: 30-36.
- [18] Curran P J, Windham W R, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree Physiology*, 1995, 15: 203-206.
- [19] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563-1575.
- [20] Fourty T, Baret F, Jacquemoud S, Schmuck G, Verdebout J. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition; direct and inverse problems. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56(2): 104-117.
- [21] Serrano L, Peñuelas J, Ustin S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data; decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 355-364.
- [22] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [23] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 1997, 112(4): 492-501.
- [24] Rondeaux G, Steven M D, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95-107.
- [25] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New hyperspectral vegetation characterization parameters. *Advances in Space Research*, 2001, 28(1): 201-206.
- [26] Marshak A, Knyazikhin Y, Davis A B, Wiscombe W J, Pilewskie P. Cloud-vegetation interaction; use of normalized difference cloud index for estimation of cloud optical thickness. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1695-1698.
- [27] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. Comparative analysis of red-edge hyperspectral indices. *Advances in Space Research*, 2003, 32(11): 2217-2222.

- [28] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, Zarco-Tejada P J, Strachan I B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 337-352.
- [29] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 43: 1541-1552.
- [30] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 156-172.
- [31] Gitelson A A, Merzlyak M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3/4): 494-500.
- [32] Reyniers M, Walvoort D J J, De Baardemaaker J. A linear model to predict with a multi-spectral radiometer the amount of nitrogen in winter wheat. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4159-4179.
- [33] Jensen J R. *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective*. Chen X L, Gong W, Li P X, Tian L Q, Transl. Beijing: China Machine Press, 2007: 288-296.
- [34] Vapnik V N. *Statistical Learning Theory*. New York: Wiley, 1998: 1-50.
- [35] Verstraete M M, Pinty B. Designing optimal spectral indices for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1254-1265.
- [36] Xu X R. *Physical Theory of Remote Sensing*. Beijing: Beijing University Press, 2005: 121-159.
- [37] Hsu C W, Chang C C, Lin C J. <http://ntu.csie.org/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>.
- [38] Sun D Y, Li Y M, Wang Q. A unified model for remotely estimating chlorophyll a in lake Taihu, China, based on SVM and in situ hyperspectral data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2957-2965.
- [39] Liang L, Yang M H, Li Y F. Hyperspectral remote sensing image classification based on ICA and SVM algorithm. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2724-2728.

参考文献:

- [1] 梁亮, 杨敏华, 臧卓. 基于小波去噪与 SVR 的小麦冠层含氮率高光谱测定. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 248-253.
- [6] 杨敏华, 刘良云, 刘团结, 黄文江, 赵春江. 小麦冠层理化参量的高光谱遥感反演试验研究. *测绘学报*, 2002, 31(4): 316-321.
- [9] 李映雪, 朱艳, 田永超, 姚霞, 秦晓东, 曹卫星. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系. *作物学报*, 2003, 32(2): 203-209.
- [12] 冯伟, 朱艳, 田永超, 曹卫星, 姚霞, 李映雪. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量. *生态学报*, 2008, 28(1): 23-32.
- [14] 张良培, 郑兰芬, 童庆禧. 利用高光谱对生物变量进行估计. *遥感学报*, 1997, 1(2): 111-114.
- [33] 延森. *遥感数字影像处理导论*. 陈晓玲, 龚威, 李平湘, 田礼乔, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 288-296.
- [36] 徐希孺. *遥感物理*. 北京: 北京大学出版社, 2005: 121-159.
- [39] 梁亮, 杨敏华, 李英芳. 基于 ICA 与 SVM 算法的高光谱遥感影像分类. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2724-2728.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory; the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province	SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District	YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area; a case study within Yulong County	JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form	ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China	CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China	FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data; an example from the Tarim River Basin	GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, <i>Rhamnus davurica</i>	WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al (6371)
Age-dependent growth responses of <i>Pinus koraiensis</i> to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China	WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of <i>Stipa krylovii</i> population in different alpine degraded grasslands	ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant <i>Ginkgo biloba</i> stands	YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, <i>Primula merrilliana</i>	SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia	LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile	WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of <i>Pinus massoniana</i> in a karst mountain area of central Guizhou province	ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of <i>Caragana</i> species in the Inner Mongolia Plateau	MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of <i>Haloxylon ammodendron</i> population in the western part of Gurbantunggut desert	SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ...	ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, <i>Leptinotarsa decemlineata</i> , and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country	LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010	JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) to Host Shift	ZHOU Fucui, LI Chuanming, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE ...	LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities	ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of <i>Microcystis</i> to solar UV radiation	WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates	WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter	LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons	LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang	YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province	XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia	XIAO Guoju, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy	LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River	ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph	
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds	HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Recruitment limitation of plant population: from seed production to sapling establishment	LI Ning, BAI Bing, LU Changhu (6624)
Scientific Note	
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes	DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元