

基于敏感波段的冬小麦氮素营养高光谱诊断

杨福芹¹, 冯海宽^{2*}, 刘小强¹, 李天驰¹, 谢瑞¹, 周龙³, 高磊磊¹

(1. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 广东置信勘测规划信息工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 氮素营养状况是作物生长的一个重要参数, 准确监测尤为重要。本文利用2013、2014年在北京市农林科学院试验基地的冬小麦叶片反射光谱数据和相应的叶片氮含量及叶片氮累积量数据, 采用波段两两组合的方法筛选对叶片氮含量及叶片氮累积量敏感的波段, 在各个生育期及全生育期建立冬小麦氮素营养诊断模型。结果表明: (1) 波段两两组合筛选出的对叶片氮含量和叶片氮累积量敏感的光谱参数分别为 $NDSI_{(564,728)}$ 、 $NDSI_{(543,728)}$ 、 $RSI_{(564,728)}$ 和 $RSI_{(543,728)}$; (2) 在各个生育期和全生育期构建的氮素营养监测模型中, 每个生育期的叶片氮含量模型的稳定性和可靠性优于叶片氮累积量的模型, 用留一交叉验证法同样表明叶片氮含量模型稳定性和可靠性比较高, 研究表明用叶片氮含量可以很好地监测冬小麦氮素营养状况, 从而实现氮肥的精准管理。

关键词: 冬小麦; 叶片氮含量; 叶片氮累积量; 高光谱指数; 敏感波段

中图分类号: S129

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2023)01-0097-05

Hyperspectral Diagnosis of Nitrogen Nutrition in Winter Wheat Based on Sensitive Band

YANG Fuqin¹, FENG Haikuan^{2*}, LIU Xiaoqiang¹, LI Tianchi¹, XIE Rui¹, ZHOU Long³, GAO Leilei¹

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097; 3. Guangdong Zhixin Information Engineering of Surveying and Planning Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: Nitrogen nutritional status is an important parameter for crop growth, and how to accurately monitor it is particularly important. In this paper, the winter wheat leaf reflection spectrum data and the corresponding leaf nitrogen content and leaf nitrogen accumulation data at the experimental base of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences in 2013–2014 were used to screen out the wave bands which are sensitive to leaf nitrogen content and leaf nitrogen accumulation by the combination of bands, and sensitive wave bands were used to establish nitrogen nutrition diagnosis model of winter wheat in each growth period and whole growth period. The results show that: (1) The sensitive spectral parameters of leaf nitrogen content and leaf nitrogen accumulation screened by the combination of bands are $NDSI_{(564,728)}$, $NDSI_{(543,728)}$, $RSI_{(564,728)}$ and $RSI_{(543,728)}$; (2) Among the nitrogen nutrition diagnosis models constructed in each growth period and the whole growth period, the stability and reliability of LNC in each growth period is better than LNA, and the leave-one-out cross validation method also shows that the accuracy of LNC is relatively higher. This study has shown that the nitrogen content of leaves can be used to monitor the nitrogen nutrition status of winter wheat, so as to achieve precise management of nitrogen fertilizer.

Key words: Winter wheat; Leaf nitrogen content; Leaf nitrogen accumulation; Hyperspectral vegetation indices; Sensitive waveband

收稿日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007424); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102310427); 河南省高等学校重点科研项目(23A420001)

作者简介: 杨福芹(1979-), 女, 讲师, 博士, 主要从事农业定量遥感研究。

通讯作者: 冯海宽, 男, 硕士, 副研究员, E-mail: fenghaikuan123@163.com

定量监测作物氮素营养状况已成为国内外植被遥感的一个重要领域,快速、准确地检测作物氮素有利于精准施肥,为作物高产、高蛋白提供保证^[1-3]。目前大多学者主要从光谱特征或植被指数等方面对作物氮素营养状况进行遥感反演^[4-6]。黄芬等^[7]以不同颜色模型的颜色分量作为自变量,采用多元线性回归、支持向量回归和随机森林算法构建了冬小麦叶片氮含量遥感估算模型。崔日鲜等^[8]以冠层覆盖度及图像指数为输入参数,分别采用两种非线性回归和三种机器学习法估算冬小麦叶片氮累积量,结果表明用随机森林构建的叶片氮累积量估算模型最优。陈佳悦等^[9]通过优化组合构建了颜色组合标准化指数,结果表明该指数可以很好地反映冬小麦叶片氮含量。宋晓等^[10]基于地面观测光谱数据构建了三波段植被指数NEW-NDRE,结果表明在灌浆初期构建的该植被指数可以很好地监测冬小麦氮素营养状况。He等^[11]研究结果表明冬小麦在可见光区域光谱反射率随叶片氮含量的变化发生明显变化。

虽然现在关于作物氮含量或作物氮累积量估算的研究比较多^[12-14],但多基于某一生育期或多个混合生育期植被指数与作物氮含量或氮累积量的关系,没有考虑各个关键生育期采用何种氮素来监测作物氮素营养生长状况。因此,本研究尝试从各个关键生育期如何更好地监测氮素营养状况出发,通过波段两两组合寻找对叶片氮含量和叶片氮累积量敏感的光谱波段,探索在各个生育期和混合生育期是采用叶片氮含量还是叶片氮累积量可以更好地监测作物生长及氮素营养状况。

1 材料与与方法

1.1 试验设计

试验于2013~2014年在北京农林科学院试验基地进行。该基地位于北京市市区,39°56' N, 116°16' E。九月底十月初小麦多在此期播种。前茬作物为小麦,土层中有机质含量为1.54~2.16 g/kg,速效钾含量为77.54~216.27 mg/kg,硝态氮含量为6.99~21.40 mg/kg,有效磷含量为29.92~136.44 mg/kg,全氮含量为0.09~0.12 g/kg。每个池子大小1.2 m×1.5 m,播种33.75 g,施尿素40.5 g,播种6行。播种密度为600万株/hm²,于2013年9月29日播入。灌溉方式采用浇灌灌溉,传统种植方式。试验设计为2个品种,分别为京9428和农大211。水分水平为5个,分别为0 m³/hm²(W₁)、225 m³/hm²(W₂)、450 m³/hm²(W₃)、675 m³/hm²

(W₄)、900 m³/hm²(W₅)。试验为随机区组设计,4个重复。田间试验测定在挑旗期、开花期和灌浆期等3个关键生育期进行。

1.2 叶片光谱数据测定

叶片光谱反射率测定采用美国FieldSpec®Pro FR光谱仪(ASD Inc., Boulder Colorado, USA)耦联手持叶夹式叶片光谱探测器。光谱仪波段范围为350~2 500 nm,间隔1 nm,在350~1 000 nm内采样间隔为3 nm,在1 000~2 500 nm内采样间隔为10 nm。叶片夹探测器内置石英卤化灯,以保证光源稳定,叶片平整。在每片叶片的东、西、南、北4个位置测定反射率^[6]。

1.3 叶片氮累积量和叶片氮含量的测定

试验于冬小麦挑旗期、开花期和灌浆期等3个生育期进行,主要获取冬小麦氮含量及地上部生物量等数据。在地表选取具有代表性的20株小麦,在实验室内器官分离后置于纸袋中,放入烘箱105℃杀青30 min,然后在80℃烘干48 h以上,直至恒质量。将烘干后的各器官称重后粉碎,采用凯式定氮法测定植株不同器官的全氮含量(N,%)。叶片氮累积量(leaf nitrogen accumulation, LNA)=叶片氮含量(leaf nitrogen content, LNC)×叶片生物量。

1.4 植被指数的构建

叶片氮素营养状况和归一化植被指数(normalized difference vegetable index, NDVI)、比值植被指数(ratio vegetable index, RVI)有较好的相关性^[15-17],根据NDVI和RVI公式在全波段范围内构建更具普适的NDSI和RSI植被指数,计算公式如下:

$$NDSI_{(\lambda_1, \lambda_2)} = \frac{(R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2})}{(R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2})} \dots\dots\dots (1)$$

$$RSI_{(\lambda_1, \lambda_2)} = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \dots\dots\dots (2)$$

式中,λ₁为波长1,λ₂为波长2,R_{λ₁}为波长1对应的冬小麦叶片反射率,R_{λ₂}为波长2对应的冬小麦叶片反射率。

1.5 模型评价

选取决定系数(determinant coefficients, R²)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、相对误差(relative error, RE)评价模型的优劣。各指标计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^2}{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \dots\dots (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \dots\dots\dots (4)$$

$$RE = \frac{|X_i - Y_i|}{X_i} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

式中, n 为样本总数, X_i 为第 i 个样本的氮含量或氮累积量的实测值, Y_i 为第 i 个样本的氮含量或氮累积量的估算值, \bar{X} 为样本氮含量或氮累积量实测平均值, \bar{Y} 为样本氮含量或氮累积量估算平均值。

2 结果与分析

2.1 敏感波段的选择和分析

利用 2013~2014 年北京市农林科学院小麦试验基地混合生育期 ($n=434$) 的冬小麦光谱数据和农学参数数据分别构建 NDSI、RSI 和叶片氮含量、叶片氮累积量的决定系数图(图 1~图 4)。从图中可以看出,根据决定系数图颜色的深浅分析 NDSI 及 RSI 对叶片氮含量及叶片氮累积量的敏感性,颜色从白色到黑色表示决定系数值由小到大,同种颜色含量越深表示波段越敏感。从图 1 可以看出,小麦 LNC 与 NDSI 最敏感的光谱指数是 $NDSI_{(564,728)}$, 其 R^2 为 0.62。从图 2 可以看出,小麦

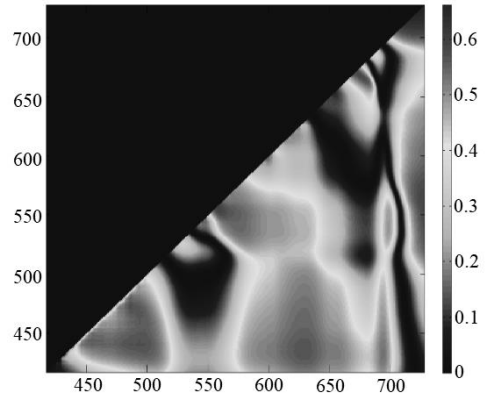


图 3 小麦 LNC 与 RSI R^2 图

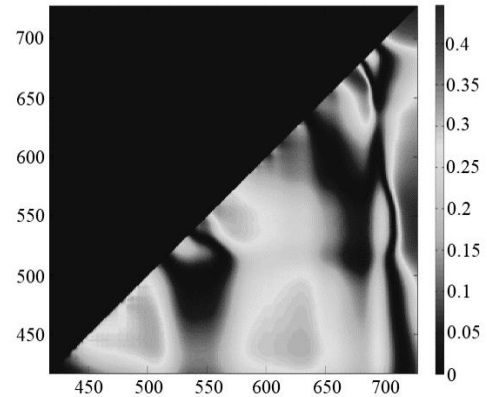


图 4 小麦 LNA 与 RSI R^2 图

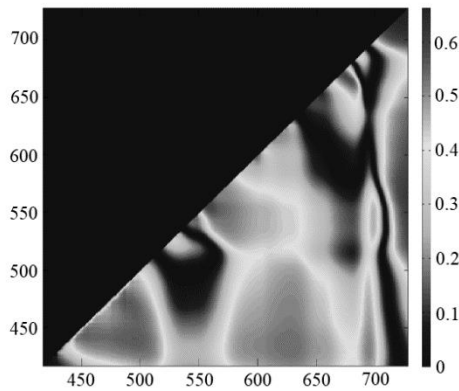


图 1 小麦 LNC 与 NDSI R^2 图

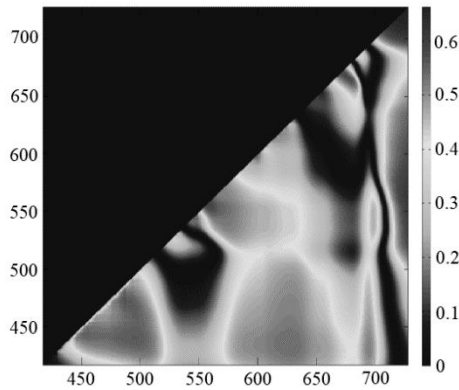


图 2 小麦 LNA 与 NDSI R^2 图

LNA 与 NDSI 最敏感的光谱指数是 $NDSI_{(543,728)}$, 其 R^2 为 0.53。从图 3 可以看出,小麦 LNC 与 RSI 最敏感的光谱指数是 $RSI_{(564,728)}$, 其 R^2 为 0.59。从图 4 可以看出,小麦 LNA 与 RSI 最敏感的光谱指数是 $RSI_{(543,728)}$, 其 R^2 为 0.44。

2.2 冬小麦氮素营养诊断模型构建

表 1 和表 2 为小麦关键生育期 LNC 和 LNA 的模型估算结果。在挑旗期,以 $RSI_{(543,728)}$ 为自变量构建的 LNC 和 LNA 模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其中, LNC 的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.70、0.39% 和 0.59%, LNA 的 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.58、0.48 N/m^2 和 5.84%; 在开花期,四个敏感光谱参数构建的 LNC 的模型都可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.65、0.37% 和 0.46%,由 $RSI_{(564,728)}$ 构建的 LNA 模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.43、0.29 N/m^2 和 2.29%; 在灌浆期,以 $NDSI_{(543,728)}$ 为自变量构建的 LNC 模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.50、0.35% 和 0.00%,以 $RSI_{(543,728)}$ 为自变量构建的 LNA 模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE 和 RE 分别为 0.20、0.23 N/m^2 和 0.00%; 在

表1 冬小麦各个生育期LNC估算

植被 指数	挑旗期(n=199)			开花期(n=160)			灌浆期(n=75)			混合生育期(n=434)		
	R^2	RMSE(%)	RE(%)	R^2	RMSE(%)	RE(%)	R^2	RMSE(%)	RE(%)	R^2	RMSE(%)	RE(%)
NDSI _(564,728)	0.65	0.41	0.70%	0.65	0.37	0.46	0.49	0.36	0.00	0.62	0.56	0.01
NDSI _(543,728)	0.66	0.40	0.68	0.65	0.37	0.46	0.50	0.35	0.00	0.60	0.57	0.00
RSI _(564,728)	0.69	0.40	0.59	0.65	0.37	0.46	0.49	0.36	0.00	0.65	0.53	0.00
RSI _(543,728)	0.70	0.39	0.59	0.65	0.37	0.46	0.49	0.35	0.00	0.63	0.55	0.00

表2 冬小麦各个生育期LNA估算

植被 指数	挑旗期			开花期			灌浆期			混合生育期		
	R^2	RMSE(N/m ²)	RE(%)	R^2	RMSE(N/m ²)	RE(%)	R^2	RMSE(N/m ²)	RE(%)	R^2	RMSE(N/m ²)	RE(%)
NDSI _(564,728)	0.56	0.47	6.67	0.43	0.29	2.36	0.21	0.23	4.90	0.53	0.40	5.41
NDSI _(543,728)	0.57	0.47	6.53	0.42	0.29	2.27	0.19	0.23	0.00	0.54	0.40	5.23
RSI _(564,728)	0.58	0.48	6.04	0.43	0.29	2.29	0.20	0.23	4.92	0.54	0.40	4.93
RSI _(543,728)	0.58	0.48	5.84	0.43	0.29	2.32	0.20	0.23	0.00	0.54	0.41	4.88

混合生育期,以RSI_(564,728)为自变量构建的LNC模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE和RE分别为0.65、0.53%、0.00%,以RSI_(543,728)为自变量构建的LNA模型可以很好地监测作物氮素营养状况,其 R^2 、RMSE和RE分别为0.54、0.41 N/m²和4.88%。在各个生育期及混合生育期所建的氮素营养诊断模型中,LNC模型的稳定性及可靠性优于LNA回归模型。结果表明在各个生育期及混合生育期小麦LNC是一个比较敏感的参数,可以用LNC实时监测小麦作物氮素营养状况,对氮素进行精准管理。

2.3 冬小麦氮素营养状况模型验证

采用留一交叉验证法^[18]对所获取的氮素营养模型进行验证(表3、表4)。从表3可以看出,各个生育期交叉验证获得的精度具有较高的可靠性。在挑旗期,交叉验证LNC的RMSE精度比估算模型精度低0.01%,RE高0.59%;在开花期,交叉验证LNC的RMSE精度与估算模型精度均相等,RE验证精度比估算模型精度高0.46%;在灌浆期和混合生育期,交叉验证LNC的RMSE和RE与估算模型的精度均相同。从表4可以看出,在挑旗期,交叉验证LNA的RMSE精度比估算模型精度高0.02 N/m²,RE精度比估算模型精度高5.84%;在开花期,交叉验证LNA的RMSE精度与估算精度相等,RE精度比估算模型精度高2.29%;在灌浆期,交叉验证LNA的RMSE精度与估算精度相等,RE验证精度比估算模型精度低0.04%;在混合生育期,交叉验证LNA的RMSE验证精度比估算精度

高0.01 N/m²,RE验证精度比估算精度高4.87%。以上结果表明所构建的模型具有很好的稳定性和可靠性。从表3和表4的对比可以看出,LNC交叉验证的精度优于LNA交叉验证的精度,验证结果表明LNC可以更好地监测氮素营养状况。

表3 LNC模型交叉验证

生育期	最佳光谱参数	R^2	RMSE(%)	RE(%)
挑旗期	RSI _(543,728)	0.74	0.40	0.00
	NDSI _(564,728)	0.63	0.37	0.00
开花期	NDSI _(543,728)	0.64	0.37	0.00
	RSI _(564,728)	0.64	0.37	0.00
灌浆期	RSI _(543,728)	0.64	0.37	0.00
	NDSI _(543,728)	0.50	0.35	0.00
混合生育期	RSI _(564,728)	0.65	0.53	0.00

表4 LNA模型交叉验证

生育期	最佳光谱参数	R^2	RMSE(N/m ²)	RE(%)
挑旗期	RSI _(543,728)	0.52	0.46	0.00
开花期	RSI _(564,728)	0.25	0.29	0.00
灌浆期	RSI _(543,728)	0.20	0.23	0.04
混合生育期	RSI _(543,728)	0.50	0.40	0.01

3 讨论

随着遥感技术的应用与发展,有学者尝试将高精度卫星影像数据用于作物氮营养诊断研究。贾良良等^[19]利用IKONOS卫星获取了冬小麦拔节期影像,并建立了植被指数,通过分析植被指数与冬小麦氮营养诊断指标的相关性,发现植株地

上部吸氮量与大部分植被指数之间的相关性达到显著水平,其相关系数绝对值范围为0.49~0.86,为监测冬小麦氮营养状况提供了一个较好的检测指标。王来刚等^[20]对获取的SPOT-5卫星影像进行波段处理及分解混合像元等处理,构建的叶片氮累积量监测模型 R^2 为0.45~0.73,但RE均高于20%。由于卫星搭载的传感器精度有限,而且影像获取易受大气影响,因此通过卫星影像进行作物氮营养监测的精度并不高。

为了提高冬小麦氮营养诊断精度,可利用光谱仪等仪器测定冬小麦地面农学参数。胡昊等^[21]使用手持测量仪器获取冬小麦NDVI和SPAD值,建立线性回归模型估算冬小麦植株氮含量,模型 R^2 为0.69~0.73。肖春华等^[22]将ASD Fieldspec FR 2500型光谱仪装载在自制简易多角度光谱测定架上,选择7个角度测定冬小麦冠层光谱数据,并利用植被指数光谱特征参量构建非线性模型,结果表明验证模型 R^2 均高于0.75,且光谱仪水平测定时精度最高。结合本研究结果,发现利用测量仪器直接获取冬小麦农学参数并建立监测模型,其精度高于使用卫星影像数据建立的监测模型精度。

但是人工测定存在工作量大、容易对测定过程产生人为干扰等不足,可以考虑使用无人机技术进行监测。通过无人机搭载高分辨率数码相机或高光谱成像仪,快速获取冬小麦氮营养监测指标。本研究仅利用了一年期北京地区冬小麦氮营养指标数据,提高了构建模型的普适性,可进一步增加不同地区、不同时限的冬小麦植株数据。

4 结 论

在精准农业条件下选取合适的生育期及氮素状况(LNC和LNA)对冬小麦氮素营养状况诊断具有重要意义。本研究的目标是通过分析不同生育期对氮素状况的影响,择优选择合适的光谱特征参数估算氮素状况,判断何种氮素状况可以更好地监测冬小麦氮素营养。主要得出如下结论:(1)通过两两组合所有的波段构建对冬小麦氮素营养状况敏感的NDSI和RSI,比较分析构建的敏感光谱参数分别为 $NDSI_{(564,728)}$ 、 $NDSI_{(543,728)}$ 、 $RSI_{(564,728)}$ 和 $RSI_{(543,728)}$ 。(2)在各个生育期和全生育期分别建立了氮素营养状况监测模型并采用留一交叉法进行了验证。结果表明:在挑旗期,以 $RSI_{(543,728)}$ 为自变量构建的叶片氮含量和叶片氮累积量模型可以很好地监测作物氮素营养状况;在开花期,四个敏感光谱参数构建的叶片氮含量都可以很好地监

测作物氮素营养状况,以 $RSI_{(564,728)}$ 为自变量构建叶片氮累积量模型可以很好地监测作物氮素营养状况;在灌浆期,以 $NDSI_{(543,728)}$ 和 $RSI_{(543,728)}$ 为自变量分别构建的叶片氮含量模型可以很好地监测作物氮素营养状况;在全生育期,以 $RSI_{(564,728)}$ 和 $RSI_{(543,728)}$ 为自变量分别构建的叶片氮含量模型可以很好地监测作物氮素营养状况。综合结果表明各个生育期和全生育期所构建的模型具有较好的稳定性和可靠性。(3)由叶片氮含量和叶片氮累积量的建模结果及验证结果分析可知,叶片氮含量模型的稳定性和可靠性均优于叶片氮累积量模型。结果表明叶片氮含量可用于监测作物长势和氮素营养状况,从而实现氮肥的精准管理。

参考文献:

- [1] 王纪华,赵春江,黄文江,等.农业定量遥感[M].北京:科学出版社,2008:171-174.
- [2] Han Z Y, Zhu X C, Fang X Y, et al. Hyperspectral estimation of apple tree canopy LAI based on SVM and RF regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 800-805.
- [3] 朱丽丽,李井会,宋述尧.叶绿素仪和硝酸盐反射仪对大白菜氮素营养诊断的比较研究[J].东北农业科学,2019,44(5):65-68.
- [4] 杨福芹,戴华阳,冯海宽,等.基于赤池信息准则的冬小麦植株氮含量高光谱估算[J].农业工程学报,2016,32(23):161-167.
- [5] Feng W, Yao X, Zhu Y, Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 394-404.
- [6] 杨福芹.小麦、玉米叶片和植株氮营养高光谱诊断与应用研究[D].北京:中国矿业大学,2016.
- [7] 黄芬,高帅,姚霞,等.基于机器学习和多颜色空间的冬小麦叶片氮含量估算方法研究[J].南京农业大学学报,2020,43(2):364-371.
- [8] 崔日鲜,刘亚东,付金东.基于机器学习和可见光光谱的冬小麦叶片氮累积量估算[J].光谱学与光谱分析,2016,36(6):1837-1842.
- [9] 陈佳悦,姚霞,黄芬,等.基于图像处理的冬小麦氮素监测模型[J].农业工程学报,2016,32(4):163-170.
- [10] 宋晓,许端阳,黄绍敏,等.基于地面观测光谱数据的冬小麦冠层叶片氮含量反演模型[J].应用生态学报,2020,31(5):1636-1644.
- [11] He L, Zhang H Y, Zhang Y S, et al. Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 170-185.
- [12] 冯伟,朱艳,姚霞,等.利用红边特征参数监测小麦叶片氮素积累状况[J].农业工程学报,2009,25(11):194-201.
- [13] Li Z, Jin X, Yang G, et al. Remote Sensing of Leaf and Canopy Nitrogen Status in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Based on N-PROSAIL Model[J]. Remote Sensing, (下转第115页)

- 与发展,2019,31(2):55-58.
- [10] 周子康,崔洁,许平,等.细菌降解低分子量多环芳烃的研究进展[J].生物工程学报,2019,35(11):2069-2080.
- [11] 陈凯丽,叶茜琼,吴蔓莉,等.微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应[J].环境科学,2017,38(2):728-734.
- [12] Song X H, Xu Y, Li G M, et al. Isolation, characterization of *Rhodococcus* sp. P14 capable of degrading high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons and aliphatic hydrocarbons[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 2122-2128.
- [13] Nwinyi O C, Ajayi O O, Amund O O. Degradation of polynuclear aromatic hydrocarbons by two strains of *Pseudomonas*[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2016, 47(3): 551-562.
- [14] Singh P, Tiwary B N. Optimization of conditions for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation by *Pseudomonas stutzeri* P2 isolated from Chirimiri coal mines[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2017, 10: 20-29.
- [15] Dong C M, Bai X H, Lai Q L. Draft genome sequence of *Sphingobium* sp. strain C100, a polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium from the deep-sea sediment of the arctic ocean[J]. Genome Announcements, 2014, 2(1): 55-59.
- [16] Hritash A K, Kaushik C P. Degradation of low molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons by microorganisms isolated from contaminated soil[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2016, 6(5): 808-819.
- [17] 许超,曲勤凤,顾文佳,等.新型可降解高效氯氟酯微生物菌株的筛选、鉴定及条件优化[J].东北农业科学,2016,41(2):70-73.
- [18] 宋宇,王鹏,韦月平.不同共作模式的稻田土壤细菌群落结构分析[J].东北农业科学,2019,44(4):46-49.
- [19] 陈素暖,何江涛,金爱芳,等.多环芳烃在不同灌区土壤剖面的分布特征研究[J].环境科学与技术,2010,33(10):10-14.
- [20] 周燕.西安市居民区土壤多环芳烃来源及健康风险评估[J].环境科学导刊,2019,38(6):71-77.
- [21] 李燕.污染场地生物修复技术应用研究[J].环境保护与循环经济,2019,39(5):22-25.
- [22] 李乐,孙海,刘政波,等.微生物肥料的作用、机理及发展方向[J].东北农业科学,2016,41(4):63-69.
- [23] 邵猛猛.多环芳烃降解菌的筛选、降解性能及环境影响研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [24] 赵旭阳,郭美霞,周艳梅.外源微生物对PAHs污染土壤细菌群落结构的影响[J].化学研究,2019,30(5):498-503.
- [25] 花莉,彭香玉,范洋,等.石油降解单菌株及混合菌降解产物分析[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2014,32(5):27-31.
- [26] 马丹,王永刚,陈吉祥,等.1株高效菲降解不动杆菌的筛选、鉴定及性能研究[J].微生物学杂志,2018,38(6):15-23.
- [27] Xia Y, Min H, Rao G, et al. Isolation and characterization of phenanthrene-degrading *Sphingomonas paucimobilis* strain ZX4[J]. Biodegradation, 2005, 16(5): 393-402.
- [28] 由胜男,沈文丽,裴晓芳,等.*Comamonas* sp.ID02合成靛蓝的特性研究[J].环境科学学报,2017,37(6):2069-2075.
- [29] 陈小兵.植物内生细菌的分离筛选及其与植物联合修复土壤多环芳烃的研究[D].南京:南京农业大学,2007.

(责任编辑:王昱)

(上接第101页)2018,10(9):2-18.

- [14] 吴伟斌,李佳雨,张震邦,等.基于高光谱图像的茶树LAI与氮含量反演[J].农业工程学报,2018,34(3):195-201.
- [15] 王凌.苹果树花期叶/冠N、P营养状况的卫星遥感反演研究[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [16] 徐良将,黄昌春,李云梅,等.基于高光谱遥感反射率的总氮总磷的反演[J].遥感技术与应用,2013,28(4):681-688.
- [17] 冯海宽,杨福芹,李振海,等.最优权重组合模型和高光谱估算苹果叶片全磷含量[J].农业工程学报,2016,32(7):173-180.
- [18] 付元元,杨贵军,冯海宽,等.基于高光谱维数约简与植被指数估算冬小麦叶面积指数的比较[J].农业工程学报,2012,28(23):107-113.
- [19] 贾良良,李斐,陈新平,等.应用IKONOS卫星影像监测冬小麦氮营养状况[J].中国土壤与肥料,2013(6):68-71.
- [20] 王来刚,田永超,李文龙,等.基于地-空遥感耦合的冬小麦叶片氮积累量估算[J].应用生态学报,2012,23(1):73-80.
- [21] 胡昊,白由路,杨俐苹,等.基于SPAD-502与GreenSeeker的冬小麦氮营养诊断研究[J].中国生态农业学报,2010,18(4):748-752.
- [22] 肖春华,李少昆,王克如,等.基于多视角反射光谱的冬小麦冠层叶片氮素营养监测研究[J].作物学报,2007(7):1141-1145.

(责任编辑:王丝语)