

基于高光谱指数的水稻砷污染胁迫多重判别模型

曹仕¹, 刘湘南^{1*}, 刘慕霞²

(1. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083; 2. 湖南民族职业学院, 岳阳 414200)

摘要:水稻中过量砷(As)能够影响叶片中叶绿素含量、水分含量以及细胞内部结构,进而改变水稻在光谱上的特征表现.以表征叶绿素、水分含量、细胞结构的NDVI、NDWI、SIPI等9种高光谱指数和实测水稻叶片砷含量数据为基础,利用相关分析、主成分分析和独立变量分析方法,获得诊断指标对水稻砷污染胁迫进行多重光谱判别.结果表明,表征不同生理参数的高光谱指数PSNDa、fWBI、SIPI与水稻叶片砷含量高度相关,可作为砷污染单级光谱诊断参数;主成分因子F1、F2和独立变量因子ICA1、ICA2对水稻砷污染胁迫具有特殊反应,分别作为水稻砷污染胁迫的主成分诊断指标和独立分量诊断指标.综合上述3类诊断参数,构建水稻砷污染胁迫多重判别空间体系即光谱指数诊断空间(PSNDa-fWBI、PSNDa-SIPI、fWBI-SIPI)、主成分诊断空间(F1-F2)和独立变量诊断空间(ICA1-ICA2),从不同层面上综合诊断了实验区水稻砷污染胁迫情况,其中以表征叶绿素和细胞结构的光谱指数空间PSNDa-SIPI与主成分空间F1-F2诊断效果为最佳.

关键词:水稻;砷污染;高光谱指数;诊断空间体系;主成分分析(PCA);独立变量分析(ICA)

中图分类号:X83 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2462-07

Multi-diagnosis Space Models of As Stress in Rice Based on Hyperspectral Indices

CAO Shi¹, LIU Xiang-nan¹, LIU Mu-xia²

(1. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Hunan Vocational College for Nationalities, Yueyang 414200, China)

Abstract: High arsenic content in rice can influence the chlorophyll, water content and structure in their leaves, reduce the rate of photosynthesis and change their spectral features. Multiple models for diagnosing As contamination in rice based on spectral parameters were studied. Sixty samples belonging to mature rice in three different areas were scanned by ASD field pro3 for optical data. Arsenic reference values were obtained by atomic absorption spectrometry. First, correlation analysis was used between 9 hyperspectral indices and As content in rice, and three indices (PSNDa, fWBI, SIPI) were extracted to diagnose As contamination in rice, which were respectively sensitive to chlorophyll, water content and structure of leaves, then took the three indices to form a diagnosis spectral indices space (PSNDa-fWBI, PSNDa-SIPI, fWBI-SIPI) of As stress in rice. Second, principal component analysis and independent component analysis were also applied in these 9 hyperspectral indices, and two principal components (F1, F2) and two independent components (ICA1, ICA2) were extracted. These four components (F1, F2, ICA1, ICA2) were all correlated with As content in rice, and composed another two diagnosis spaces (F1-F2, ICA1-ICA2) for predicting As contamination. And these spaces composed a multiple diagnosis space model which diagnosed As contamination in rice of test area from different level, and showed a good result.

Key words: rice; As contamination; hyperspectral indices; system of diagnosis space; principal component analysis (PCA); independent component analysis (ICA)

水稻砷污染是人类生存所面临的重大生态环境问题之一,直接影响着农业生产和粮食安全,危及人类生存环境.

自从发现砷的危害以来,对砷在植物体内的吸收^[1]、转运^[2]、富集^[3~5]、毒害和解毒^[6,7]等过程进行了较广泛的研究. Milton等^[8]早在20世纪90年代就砷对植物的影响进行初步的探索,其后Font等^[9]利用数理统计方面的知识对砷污染胁迫的光谱表现进行了分析. 现今利用冠层光谱特征参数诊断水稻污染已成为农业环境监测的一种重要手段,通过研究水稻冠层光谱特征^[10],利用特定光谱参数对水稻重金属污染进行诊断^[11],但单独对水稻砷污

染进行的此类研究较为少见.

运用高光谱遥感技术获取农作物污染信息具有快速、准确、实时的优势,然而农作物污染信息是一种遥感弱信息,具有复杂隐蔽性,不易识别与提取. 一般来说,遥感探测到的是作物冠层的光谱信息,为了能利用高光谱遥感技术大面积监测农作物污染,必须研究受胁迫作物冠层的光谱信息特征,分析作物污染胁迫遥感信息机制,提取诊断遥感信息参数.

收稿日期:2009-12-23;修订日期:2010-03-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40771155);国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z174)

作者简介:曹仕(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为遥感应用模型与环境监测,E-mail:caoshi224@163.com

* 通讯联系人, E-mail:liuxneugh@163.com

本研究在前人工作的基础上,以水稻砷污染胁迫为对象,以高光谱指数为数据基础,分析水稻胁迫表征的高光谱响应特征,并利用相关分析、主成分分析和独立变量分析分别对高光谱指数进行水稻砷污染胁迫单级诊断参数、主成分诊断因子以及独立分量诊断因子的提取,并以此为基础建立水稻砷污染多重判别体系,综合诊断水稻砷污染情况,以期为系统、全面、及时、有效地监测大面积农作物砷污染提供理论模型依据。

1 材料与方法

1.1 数据采样与处理

研究选取吉林省长春市西湖附近水稻种植区域为试点。此处位于长春市西部郊区,临近长春第一汽车制造厂。由于工业废水和城市垃圾的不断排入,使附近的水域和土壤污染严重,尤其是重金属砷含量更是超出了土壤承受能力范围。根据离西湖水域距离远近分别选取西湖边Ⅰ号样地、农田间Ⅱ号样地以及Ⅲ号样地作为实验样地。

2008年和2009年7~9月先后6次对样地分蘖期、长穗期和成熟期的水稻分别取样。主要研究对象为成熟期水稻,所用水稻处于成熟晚期(黄熟期-完熟期),水稻品种为吉粳105。光谱测试采用ASD field pro3仪器,光谱测试取60个测点,每个样地取20个,分别进行编号,每个点测10次。然后对测试

点区域的水稻和土壤进行同步采样,分别用样品袋和土壤盒保存,在实验室中利用原子光谱吸收法测定重金属元素铅、砷、铬、镉的含量。

1.2 水稻砷污染胁迫的潜在响应光谱参数与多重判别

在不同的环境条件胁迫下作物的生理生态特征是不一样的。作物生理生态变化可用一系列参数来表征,如色素、水分、营养元素、冠层和细胞结构等,它们的微小变化可能导致作物冠层高光谱波形的变化。国内外大量研究表明,可以运用一系列光谱参数来更加精准地刻画光谱波形的变化,从而更加有效地响应作物生理生态参数的变化。光谱参数一般综合了多个特征波长的反射率,消除了仅依赖单个波长反射率进行分析计算的偶然性和不确定性,增强了特征光谱信息,对特定目标信息响应的针对性和敏感性更强。

为了有效地获取水稻砷污染胁迫诊断光谱参数,在前人工作的基础上,初步选择一些光谱指数,如表1所示,大量研究表明,它们对叶绿素含量、叶片水分、细胞结构以及冠层等参数的变化存在潜在的敏感性^[12]。本研究将通过理论推导和实验分析,明确这些指数与水稻砷污染胁迫表征的关系,确定水稻砷污染胁迫的敏感光谱指数,同时利用主成分和独立变量分析方法从不同层面构建水稻砷污染胁迫多重判别体系(图1)。

表1 水稻砷污染潜在敏感光谱指数

Table 1 Potential sensitive spectrum indices to As contamination of rice

生理参数	光谱参数	公式	文献
叶绿素	NDVI(normalized difference vegetation index)	$(R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + R_{671})$	[13]
	MCARI(modified chlorophyll absorption ratio index)	$[(R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})] / (R_{700} / R_{670})$	[14]
	PSNDA(pigment specific normalized difference a)	$(R_{810} - R_{674}) / (R_{810} + R_{674})$	[15]
	MTVI ₂ (modified triangular vegetation index)	$1.5[1.2(R_{800} - R_{550}) - 2.5(R_{670} - R_{550})] / \sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670}}) - 0.5}$	[16]
水分含量	WI(water index)	R_{900} / R_{970}	[17]
	NDWI(normalized difference water index)	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	[18]
	fWBI(flooding-position water index)	$R_{900} / \min(R_{930} - 970)$	[19]
细胞结构	SIPI(structure-independent pigment index)	$(R_{800} - R_{450}) / (R_{800} - R_{680})$	[20]
	PRI(photochemical reflectance index)	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	[21]

2 结果与讨论

2.1 砷胁迫水稻单级诊断光谱指数的提取

2.1.1 砷胁迫水稻叶绿素含量变化的诊断光谱指数

水稻中砷浓度值变化对水稻叶绿素含量的影响非常明显,一般H是,随着砷浓度升高,水稻叶绿

素含量逐渐下降,二者之间的相关关系非常显著。另外,砷胁迫还能引起色素比率的改变,水稻叶绿素a和叶绿素b随水稻砷浓度上升而下降,这说明砷对叶绿素a的破坏作用大于叶绿素b。实验证明,在高浓度砷污染胁迫时,水稻叶绿素含量均呈下降趋势,但降幅存在较明显差异。

为获取砷胁迫水稻叶绿素含量变化的诊断光谱

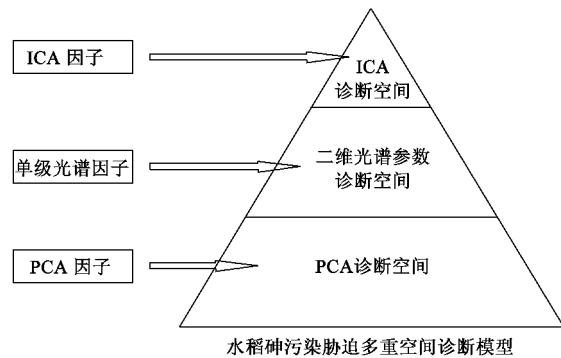


图 1 水稻砷污染胁迫多重判别体系

Fig. 1 System of multi-diagnosis space of As stress in rice

指数,选择 NDVI、MCARI、PSNDa、MTVI₂ 这 4 个潜在敏感光谱指数进行实验分析,分别计算砷胁迫水稻对应的 4 个光谱参数值,根据地面实验测得的水稻叶片中砷含量数据,利用相关关系法依次计算光谱指数值与水稻叶片中砷含量的响应系数,如图 2 所示.光谱指数的响应系数从高到低为 PSNDa > NDVI > MTVI₂ > MCARI. PSNDa 主要反映了叶绿素 a 的变化,可见由于砷污染的胁迫,叶绿素 a 的变化最为明显,即叶绿素 a 对砷污染最为敏感.

本研究把水稻叶片中砷含量以 4.0 mg/kg、6.0 mg/kg 为界限分为低、中、高 3 个污染等级:砷含量在 4.0 mg/kg 以下的为轻度污染情况;砷含量在 4.0 ~ 6.0 mg/kg 之间的为中度污染情况;砷含量在 6.0 mg/kg 以上的为高度污染情况.利用 60 个样品的 As 含量与 PSNDa 值做出响应关系图[图 3(a)],发现 PSNDa 值与 As 污染等级之间存在良好的对应关系:轻度污染 PSNDa 值基本在 0.65 以上;中度污染对应 PSNDa 值在 0.65 ~ 0.45 之间;高度污染对应 PSNDa 值在 0.45 以下.因此利用叶绿素 a 的变化来推测砷污染的程度具有良好的预测效果.

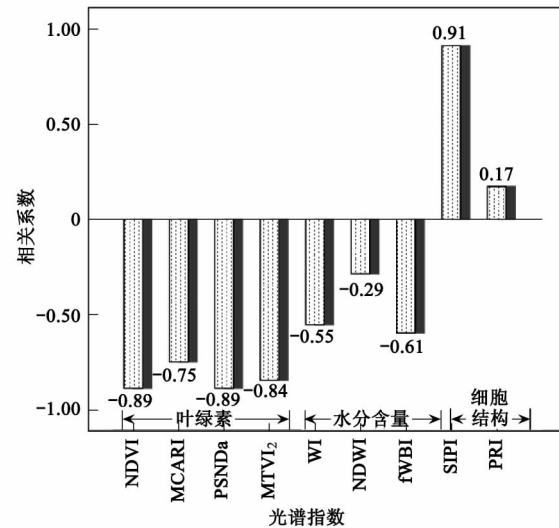


图 2 受砷胁迫的水稻光谱指数的响应关系

Fig. 2 Response relationships of spectral parameters with physiological features of As stress in rice

2.1.2 砷胁迫水稻水分含量变化的诊断光谱指数

砷胁迫影响水稻中水分含量的变化,使水的吸收量减少,从而影响水稻生理生化活性,如光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、营养元素吸收和酶的活性等.植被光谱在 1300 nm 之后,反射率曲线具有 2 个由于水分强烈吸收所致的明显波谷,分别位于 1400 nm 和 1950 nm.当水稻受砷污染胁迫严重时,2 个水分吸收谷变浅,随着水稻中砷浓度的增大,光谱曲线将呈水平趋势.

基于上述分析,为获取砷胁迫对水稻水分含量变化的影响,选择的潜在敏感光谱指数为 WI、NDWI 和 fWBI.对实验数据应用相关关系法处理后,得到的结果如图 2 所示,光谱指数的响应系数从高到低为 fWBI > NDWI > WI.因此,选取 fWBI 与 As

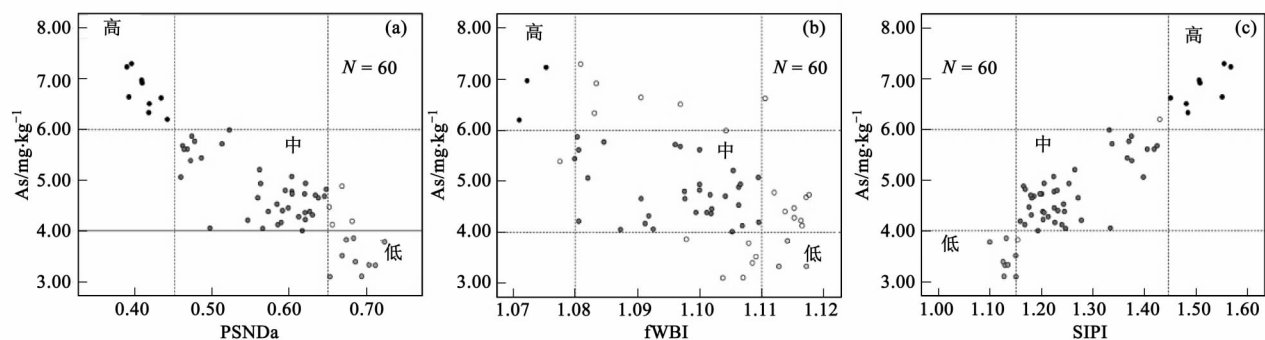


图 3 诊断光谱指数与水稻叶片中砷含量的空间分布

Fig. 3 Diagnosis spectral indices space of As stress in rice

含量做出预测关系图[图 3(b)],虽然其污染等级对应关系不如叶绿素 a 好,但从 $\frac{f}{a}$ 上还是遵循负相关的联系,其原因可能是由于采样点距水源远近所造成的干扰因素所致.因此,fWBI 可作为砷胁迫水稻水分含量变化的诊断光谱指数.

2.1.3 砷胁迫水稻细胞结构变化的诊断光谱指数

水稻遭受到砷胁迫影响时,会引起水稻细胞膜结构和功能的改变.膜质可能是胁迫物的主要作用位点,水稻在遭受砷胁迫后,质膜及各种细胞器的内膜系统在逆境下都会膨胀或破损,膜的通透性被破坏,膜内外渗透压失衡,引起水分子和营养元素的运转受阻,造成细胞代谢紊乱.破坏严重时,细胞内膜消失,细胞器崩溃,最终导致细胞坏死.

为获取砷胁迫对水稻中细胞结构变化影响,选择的潜在敏感光谱指数为 SIPI 和 PRI.对实验数据应用相关关系法处理后,得到的结果如图 2 所示,光谱指数的响应系数为 SIPI > PRI,选取 SIPI 与 As 含量做出预测关系图[图 3(c)],其 As 污染等级与 SIPI 值具有良好的对应关系,如轻度污染 SIPI 值基本在 1.15 以下;中度污染对应 SIPI 值在 1.15 ~ 1.45 之间;高度污染对应 SIPI 值在 1.45 以上.所以,选取 SIPI 作为砷胁迫水稻水分含量变化的诊断光谱指数具有良好的预测效果.

2.2 砷胁迫水稻光谱指数的主成分因子提取

水稻砷污染胁迫是一个复杂的过程,对它进行遥感诊断需要利用特定的敏感光谱指数.由于胁迫的结果总是会引起水稻生理生态参数的某些变化,表现在叶绿素含量、水分含量和细胞结构等方面,如上所述,可以用相关的单级诊断光谱指数来获得砷污染胁迫的这些变化.但是由于砷浓度的不同,胁迫程度不一,这些参数的变化情况也会不一样,一些情况下还会出现某些参数变化过小而不会在光谱数据上发生任何响应的情况.因此,为了使水稻砷污染胁迫的诊断更可靠、有效,采用主成分模型综合水稻叶绿素、水分和细胞结构的变化,任一因子的变化都会引起主成分的变化,从而系统、全面的诊断水稻砷污染状况.

利用 NDVI 等 9 个光谱指数为因子对 60 个样品进行主成分分析,得出 9 个成分,对 9 个成分的贡献率进行统计计算,选取 F1、F2 作为主成分,F1 贡献率 67.2%,F2 贡献率 18.9%,累积贡献率 86.2% (图 4).其中 F1 主要包含 NDVI 等前 8 个光谱指数的大部分信息,F2 主要与 PRI 和 NDWI 有关(表 2).根据计算得出 F1、F2 值,并用 F1、F2 与水稻叶

片中砷含量进行相关分析,得出相关系数分别为 -0.893 和 0.887,并已通过显著性检验.

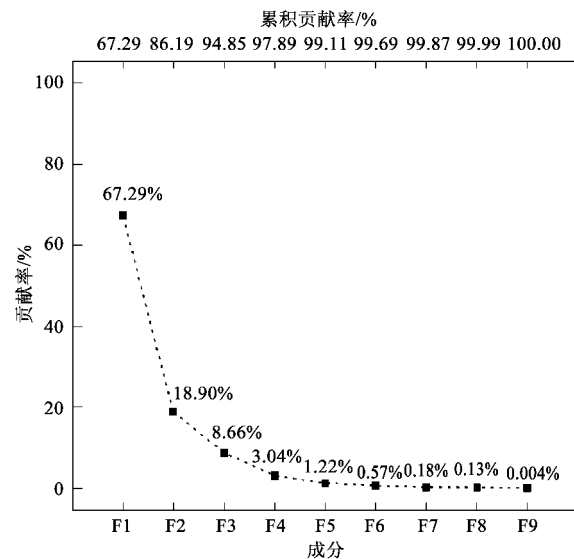


图 4 各主成分的贡献率

Fig.4 Extraction sums of principal component

表 2 主成分对各光谱指数的信息提取率

Table 2 Extraction information of principal component (F1,F2) from spectral indices

光谱指数	F1	F2
NDVI	0.96	-0.21
MCARI	0.794	-0.322
PSNDa	0.961	-0.209
MTVI ₂	0.915	-0.326
WI	0.836	0.489
NDWI	0.619	0.677
fWBI	0.877	0.405
SIPI	-0.946	0.243
PRI	0.003	0.694

主成分 F1、F2 值与水稻叶片中砷含量相结合进行分析,发现在主成分相关图中(图 5),不同的砷污染等级处在不同的空间:F1 < 0.70 为高度污染,F1 在 0.70 ~ 1.06 之间时为中度污染,F1 > 1.06 时为轻度污染[图 5(a)];F2 > 0.88 时为高度污染,F2 在 0.73 ~ 0.88 之间时为中度污染,F2 < 0.73 时为轻度污染[图 5(b)].

2.3 砷胁迫水稻光谱指数的独立分量因子提取

水稻砷污染胁迫的表现不仅复杂,而且具有很大的隐蔽性.上述诊断方法是从简单光谱指数层面去总结、概括砷胁迫所致的微小变化,从而做出诊断预测.而独立变量分析是从光谱指数内部构造出发,寻找隐藏于众多光谱诊断指数之间的对砷污染极度敏感的独立变量结构,从而利用此独立分量对

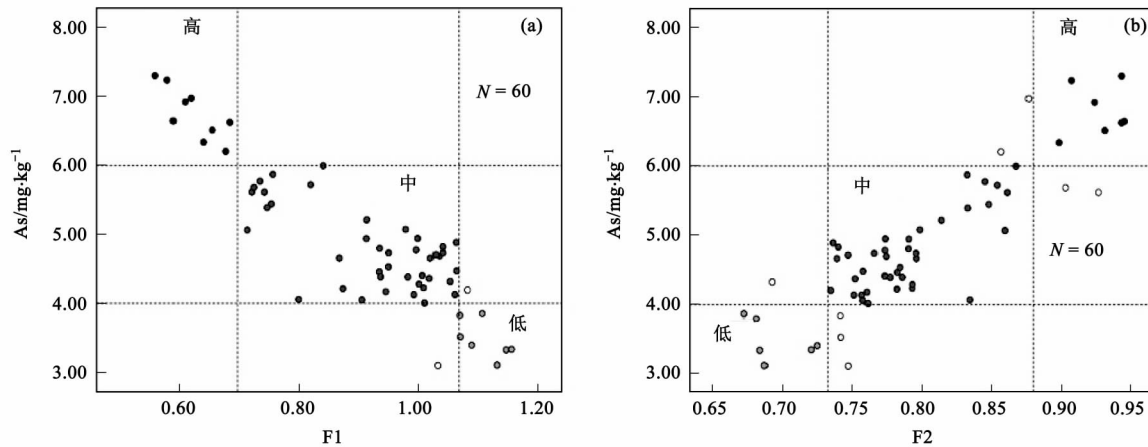


图 5 主成分 F1、F2 砷污染诊断空间分布图

Fig. 5 Principal component (F1, F2) diagnosis space of As stress in rice

水稻砷污染状况进行诊断预测。

以 60 个样品的 NDVI、fWBI、SIPI 等 9 个诊断光谱指数为因子组成 9×60 的计算矩阵, 然后对矩阵进行独立变量提取, 得出 2 个变量 ICA1、ICA2。用新得出的独立变量 ICA1、ICA2 与水稻叶片中砷含量进行相关分析, 相关系数分别为 0.295 和 -0.535, 并都已通过显著性检验。从 ICA 值上

分析: ICA1 值无论是轻度砷污染还是重度砷污染都集中在 102 ~ 106 之间, 与砷污染程度没有明显的对应关系, 但其值范围可以定性的反应砷污染状况 [图 6(a)]; ICA2 值则与水稻砷污染程度有明显的对应关系, 轻度污染 $ICA2 > 29.5$, 中度污染值在 27.5 ~ 29.5 之间, 而高度砷污染 $ICA2 < 27.5$ [图 6(b)]。

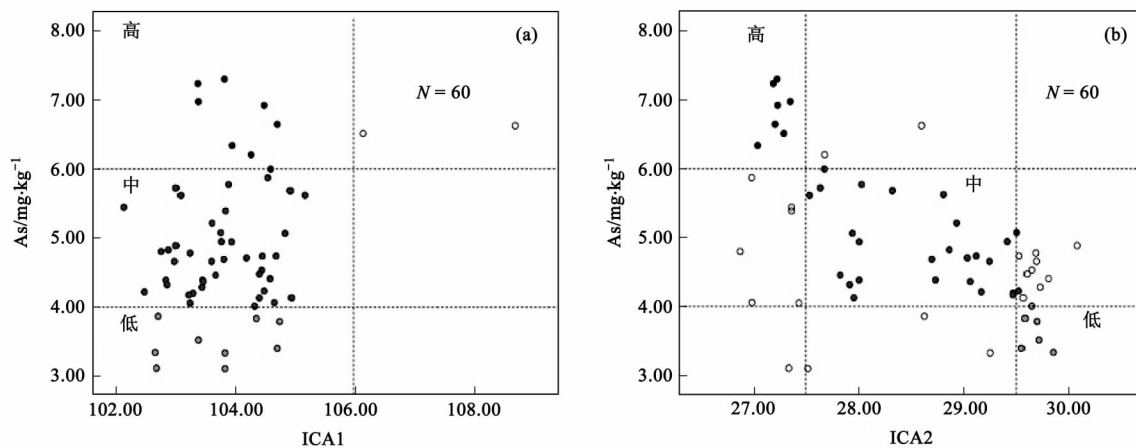


图 6 独立变量 ICA1、ICA2 的砷污染诊断空间分布图

Fig. 6 Independent component (ICA1, ICA2) diagnosis space of As stress in rice

2.4 水稻砷污染胁迫多重判别模型

水稻砷污染胁迫的表现是多方面的, 除了人们已知的叶绿素含量、水分含量、细胞结构等因素外, 还有众多未知的潜在因素包含其中, 所以光靠单一的诊断光谱参数作为判别依据稍显不足。本研究针对上述 3 种方法提取的单因子诊断参数, 分别进行相关组合, 建立水稻砷污染胁迫多重空间诊断体

系, 从不同角度探测水稻砷污染状况。

首先利用获取的分别表征叶绿素、水分和细胞结构变化的 3 个单级诊断光谱指数 PSNDa、fWBI、SIPI, 互相结合建立诊断光谱指数空间 (PSNDa-fWBI、PSNDa-SIPI、fWBI-SIPI), 这样就形成了一个水稻砷污染胁迫多级诊断光谱指数空间体系, 如图 7 所示, 不同程度的砷污染胁迫在每一个诊断光谱

指数空间中都占据特定的区域,其中以表征叶绿素与细胞结构的 PSNDa-fWBI 空间对应关系最好[图 7 (b)],这主要是由于所用样地数据在水分上有其它

因素(水源)的制约所致.在实践中可以根据不同的约束条件采用一个或多个光谱指数空间来诊断水稻砷污染胁迫程度.

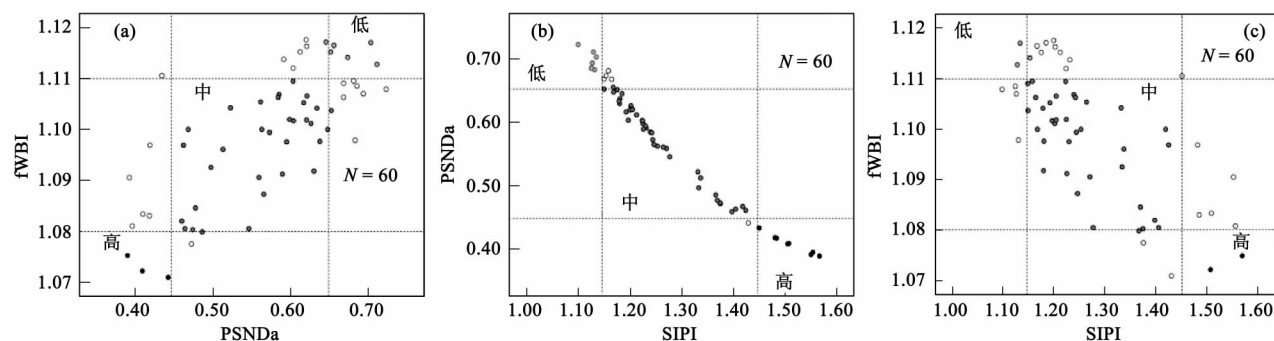


图 7 诊断光谱指数的组合空间分布

Fig. 7 Composite diagnosis spectral indices space of As stress in rice

其次利用主成分因子 F1、F2 和独立变量因子 ICA1、ICA2 分别组合,形成的诊断空间如图 8 所示, F1-F2 砷污染诊断空间[图 8(a)]同时体现主成分 F1、F2 与水稻砷污染等级之间的关系,综合反映砷污染胁迫信息,与水稻砷污染程度存在显著的空间对应关系:高度污染: $F1 < 0.70$, $F2 >$

0.88;中度污染: $0.70 < F1 < 1.06$, $0.88 > F2 > 0.73$;轻度污染: $F1 > 1.06$, $F2 < 0.73$.此外,ICA1-ICA2 诊断空间[图 8(b)]从定性的角度判断水稻砷污染等级,虽然其相关性不甚显著,但其与砷污染胁迫表征密切相关,对水稻砷污染程度具有一定的解释能力.

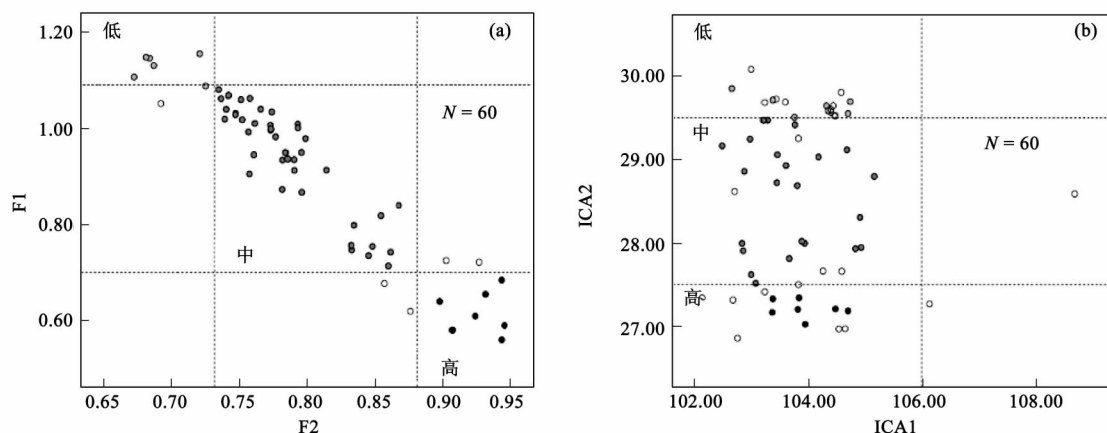


图 8 主成分诊断因子与独立变量诊断因子的组合空间分布

Fig. 8 Composite diagnosis components space of As stress in rice

3 讨论

上述基于高光谱参数的诊断模型从不同角度、不同层面出发,组成了从单因子到多因子的水稻砷污染胁迫多重空间诊断的综合体系.在实际应用上可以根据实验数据特点选择不同的诊断空间或综合各种诊断空间优势来进行水稻砷污染胁迫的诊断.虽然多级空间诊断模型能很好的运用于水稻砷污染的诊断,但主成分分析和独立变量分析对于光谱参

数应用较少,其内在联系与精确性需要进一步探索证明.

4 结论

(1)水稻中的 As 含量与叶片中叶绿素含量、水分含量以及细胞内部结构关系密切,代表上述因子的高光谱参数同时与水稻中 As 污染状况息息相关.在光谱指数中提取的 PSNDa、fWBI 以及 SIPI 单级诊断指数与砷污染程度有较好的对应关系,尤其是

代表叶绿素、细胞结构的 PSNDa 和 SIPI 与水稻中砷含量相关系数分别达到 -0.89 和 0.91. 并由上述 3 个诊断光谱指数组成的多级诊断空间 PSNDa-fWBI、PSNDa-SIPI 与 fWBI-SIPI 中, 以 PSNDa-SIPI 空间诊断效果最佳, 说明砷污染对水稻叶片叶绿素和细胞结构伤害最为显著, 而叶片水分由于还受其它因素影响, 所以诊断效果稍显不理想.

(2) 主成分分析从宏观层面上综合了表征水稻叶绿素、水分和细胞结构变化的各光谱参数信息, 系统、全面地诊断水稻砷污染程度. 得出的主成分 F1、F2 与水稻叶片中砷含量高度相关, 相关系数分别为 -0.893 和 0.887, 2 个主成分都能很好地诊断水稻砷污染情况, 特别是由此而组成的诊断空间 F1-F2, 与砷污染等级有良好的对应效果.

(3) 独立变量分析从光谱指数中砷污染胁迫隐藏信息出发, 提取出的 2 个独立变量 ICA1、ICA2 虽然与水稻叶片中砷含量相关性不是很高, 但 ICA1 对水稻砷污染定性的诊断, ICA2 对水稻砷污染等级的诊断都具有良好的效果.

参考文献:

- [1] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species [J]. New Phytol, 2002, **154**: 29-43.
- [2] Meharg A A, Macnair M R. Suppression of the high-affinity phosphate-uptake-system-a mechanism of arsenate tolerance in *Holcus lanatus* L. [J]. Exp Bot, 1992, **43**: 519-524.
- [3] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation [J]. Chin Sci Bull, 2002, **47**: 902-905.
- [4] Ma L Q, Komar K M, Zhang W, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic-a hardy, versatile, fast-growing plant helps to remove arsenic from contaminated soil [J]. Nature, 2001, **409**: 579.
- [5] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29** (10): 2906-2911.
- [6] Mkandawire M, Lyubun Y V, Kosterin P V, et al. Toxicity of arsenic species to *Lemna gibba* L. and the influence of phosphate on arsenic bioavailability [J]. Environ Toxicol, 2004, **19**: 26-34.
- [7] Zhao F J, Wang J R, Barker J H A, et al. The role of phytochelatins in arsenic tolerance in the hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. New Phytol, 2003, **159**: 403-410.
- [8] Milton N M, Ager M, Eiswerth B A, et al. Arsenic-and selenium-induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants [J]. Remote Sens Environ, 1989, **30**: 263-269.
- [9] Font R, Del Río M, Vélez D. Use of near-infrared spectroscopy for determining the total arsenic content in prostrate amaranth [J]. Sci Total Environ, 2004, **327**: 93-104.
- [10] 刘庆生, 刘高焕, 储晓雷. 水稻、大豆与芦苇农田冠层光谱特征研究 [J]. 中国生态农业学报, 2006, **14** (2): 66-69.
- [11] 关丽, 刘湘南. 镉污染胁迫下水稻生态表征高光谱识别模型 [J]. 生态环境学报, 2009, **18** (2): 488-493.
- [12] Goel P K, Prasher S O, Landry J A, et al. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn [J]. Comput Electron Agric, 2003, **38** (2): 99-124.
- [13] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [A]. In: Proceedings of Third ERTS-1 Symposium, NASA SP-351 [C]. Washington, 1973. 309-317.
- [14] Daughtry C S, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sens Environ, 2000, **74** (2): 229-239.
- [15] Blackburn G A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves [J]. Int J Remote Sens, 1998, **19** (4): 657-675.
- [16] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. Remote Sens Environ, 2002, **81**: 416-426.
- [17] Penuelas J, Isla R, Filella I, et al. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley [J]. Crop Sci, 1997, **37** (1): 198-202.
- [18] Gao B C. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. Remote Sens Environ, 1996, **58**: 257-266.
- [19] Strachan I B, Pattey E, Boisvert J B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance [J]. Remote Sens Environ, 2002, **80**: 213-224.
- [20] Penuelas J, Filella I, Elvira S, et al. Reflectance assessment of summer ozone fumigated Mediterranean white pine seedlings [J]. Environ Exp Bot, 1995, **35** (3): 299-307.
- [21] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. Remote Sens Environ, 1992, **41**: 35-44.