

利用独立变量分析与高光谱植被指数模型 监测成熟期水稻中砷污染

曹 仕, 刘湘南, 刘清俊

(中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:水稻中过量砷(As)能够损害叶片中叶绿素和叶片内部结构,进而影响水稻光合作用效率,并改变水稻在光谱上的表现。利用高光谱植被指数(*CARI*、*PRI*、*SIPI*)和独立变量分析(*ICA*)模型对水稻中 As 含量进行了研究。结果表明,以上 3 种高光谱植被指数与水稻中 As 含量均呈一定的相关关系,其相关系数在 0.67 以上;而经过独立变量分析(*ICA*)可知,在蓝光波段(440~540 nm)和红光波段(600~700 nm)之间各有一个独立变量与水稻中 As 含量高度相关,相关系数达到 0.95 以上。将上述植被指数与独立变量和 As 含量之间进行回归分析,得到水稻中 As 含量的线性回归方程。研究表明,重金属 As 对水稻生长的影响可以通过其在光谱上的特征(如相关植被指数)改变来体现,并可以用独立变量分析(*ICA*)方法提取光谱中关于 As 胁迫的隐含弱信息,建立遥感预测模型,为大面积监测农作物 As 污染提供依据。

关键词:As 污染;独立变量分析(*ICA*);中心化和白化;最小二乘回归

中图分类号:X830.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0881-06

Monitor Arsenic Contamination in Mature Rice by the Model Based on the Independent Component Analysis and Hyperspectral Vegetation Indices

CAO Shi, LIU Xiang-nan, LIU Qing-jun

(School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High arsenic content in rice can damage the chlorophyll and structure in their leaves, reduce the rate of photosynthesis and change their spectral features. The model established in this paper by the independent component analysis(*ICA*) and hyperspectral vegetation indices(*CARI*, *PRI*, *SIPI*) were used to predict the arsenic content in mature rice. Sixty samples belonging to mature rice in three different areas were scanned by ASD field pro3. Arsenic reference values were obtained by atomic absorption spectrometry. The study showed that there was linear correlation between these three hyperspectral vegetation indices(*CARI*, *PRI*, *SIPI*) calculated from ASD optical data and the content of arsenic in mature rice, whose coefficients(*R*) are -0.67, 0.82, 0.91, using least-squares regression. The fast independent component analysis(*ICA*) was applied in a matrix 20×60, which represents the 20 groups optical data of the 60 samples. The 20 groups optical data previously centralized and standardized were respectively divided from the 100 nm range of blue band(440~540 nm) and red band(600~700 nm) by 5 nm intervals, and that produced four variables(IC-B1, IC-B2; IC-R1, IC-R2) from red band and blue band. Furthermore, IC-B1 and IC-R1 had high correlation with the arsenic content in mature rice(*R*=0.96, *R*=-0.95). So the model established in this paper by those variables and hyperspectral vegetation indices can predict arsenic contamination in mature rice.

Keywords: arsenic contamination; independent component analysis(*ICA*); centralized and standardized; least-squares regression

农作物对 As 的吸收、积累量受多种因素影响,主要为土壤含 As 量。农作物主要通过根系吸收 As,

故其最高浓度出现在农作物的根部以及块茎部位^[1],而地上部分受 As 污染伤害,主要表现在叶片上。随着工业的快速发展,As 污染在农作物中越来越普遍,作为人类主要粮食作物的水稻更是首当其冲,因此,开展 As 污染对水稻危害的研究已迫在眉睫。

目前,农作物 As 污染胁迫的研究现状大致可总结为:自从发现 As 的危害以来,对 As 在植物体内的

收稿日期:2009-11-02

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,湖南岳阳人,在读硕士,主要从事遥感应应用模型与环境监测方面的研究。E-mail:caoshi224@163.com

通讯作者:刘湘南 E-mail:liuxneugb@163.com

吸收^[2]、转运^[3]、富集^[4-5]、毒害和解毒^[6-7]等过程进行了较广泛的研究。N M Milton 在 20 世纪 90 年代就 As 对植物的影响进行了初步探索^[8],本世纪初 R Font 等利用数理统计法对 As 污染植被的光谱表现进行了分析^[9]。目前研究成果表明:(1)植物 As 中毒在形态学上的表现:a.叶片变少,变小甚至提前脱落,叶片垂直,冠层伤害严重;b.根系变少,色黑,细脆易折;c.对植物各生长阶段伤害不同,越成熟影响越大。(2)在生理上的表现:伤害植物叶绿体的内部结构,取代叶绿素分子中的 Mg 离子并干扰有关叶绿素合成酶的活性,使叶绿素合成受阻,同时增加叶绿素分解酶的活性,使叶绿素分解。(3)光谱上的表现:①(原始数据)a.蓝移现象(叶绿素吸收中心 680 nm)——蓝移距离;b.在黄绿光波段呈现高反射率(550~600 nm)——峰高距;c.与正常植物光谱曲线相交点(730 nm)之前反射率高,之后反射率低——相交点的位置;d.在 2 200 nm 处,As 浓度越大,反射率越低——距深。②(反射率二阶导数)As 含量浓度的分辨:绿光(498 nm)和红光(674 nm)谷底差距,水分(1 916 nm)、淀粉(2 000、2 274 nm)、油脂(2 310、2 348 nm)、蛋白质和氨基酸(1 956、2 248 nm)等响应光谱的变化情况。

虽然前人对农作物 As 污染进行了较广泛的研究,但具体对水稻这种农作物 As 污染研究却较少,且主要集中在用传统方法和原始光谱数据的简单变换进行研究。本文首次使用独立变量分析(ICA)^[10]与高光谱植被指数模型寻找由 As 污染胁迫造成其在光谱上的特征改变,建立相应的指标反映其受污染情况。

1 样品与方法

1.1 试验样地选择

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 As 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。

1.2 取样和处理

2008 年和 2009 年 7 至 9 月之间先后 6 次对 3 个样地分蘖期、长穗期和成熟期的水稻进行取样。本文主要研究成熟期水稻,水稻品种为吉粳 105,采样区水稻处于成熟晚期(黄熟期-完熟期)。

光谱测试采用 ASD field pro3 仪器,其探测波长

范围 350~2 500 nm;光谱分辨率 350~1 050 nm 范围内为 3.5 nm,1 000~2 500 nm 范围内为 10 nm。光谱采样间隔 350~1 050 nm 范围内为 1.4 nm,1 000~2 500 nm 范围内为 2 nm;采样时间 10 次·s⁻¹。

光谱测试每个样地取 20 个测点,进行编号,每个点测 10 次。然后对测试点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 Pb、As、Cr、Cd 的含量。

1.3 研究方法

1.3.1 高光谱指数分析方法

高光谱指数分析必须对采样所得的原始光谱数据进行归一化处理转换成反射率后进行计算。分别用表示叶绿素吸收率、光化反射率以及结构相关色素的植被指数^[11]进行分析,并计算 3 样地水稻之间高光谱植被指数的相关性,以判断其地域、形成因素的异同。

(1)叶绿素吸收率指数 *CARI*

$$CARI = \frac{R_{700}}{R_{670}} \times \frac{670a + R_{670} + b}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

$$a = \frac{R_{700} - R_{550}}{150}; b = R_{550} - 550a$$

(2)光化反射率指数 *PRI*

$$PRI = \frac{R_{570} - R_{531}}{R_{570} + R_{531}}$$

(3)结构相关色素指数 *SIPI*

$$SIPI = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} + R_{680}}$$

1.3.2 快速独立变量分析(ICA)方法

独立变量分析(ICA)是基于高阶统计和信息熵理论,以各个通道间相互统计独立为提取准则,提取通道间的隐含信息成分。ICA 将多维随机向量分解为一系列统计上独立的成分,因此能够提取高光谱数据在光谱空间上多维分布的分布特征,实现特征提取。而快速 ICA 是采用基于负熵作为目标函数的 ICA 算法,从而得到对各源信号最佳逼近的独立分量。ICA 分析前必须对原始数据进行中心化和白化处理。

本文选取蓝光波段(440~540 nm)和红光波段(600~700 nm)分别进行 ICA 分析,分别将两个波段 100 nm 的范围,间隔 5 nm 分为 20 组,与 60 个样本组成 20×60 的矩阵进行计算。

2 结果与分析

2.1 试验样地重金属含量分析

通过对试验样地重金属含量的分析,判断 As 在污染中贡献值。文中所提到的水稻中重金属含量均为水稻叶片中的含量。

2.1.1 样地中 As 含量分析

由于水稻属于水土混合介质中生长的作物,从重金属总量上看,其大部分重金属含量在较高范畴内。土样中,As 含量平均在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,比 Pb、Cr 含量都小(图 1-A);但在水稻叶片中却恰恰相反,As 含量平均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,远远高于其他 3 种金属含量(图 1-B)。结果表明,实验样地水稻对 As 的吸收远远高于其他重金属,而且在叶片中,As 含量较高,其影响占主导地位。

2.1.2 水稻中 As 积累分析

在水稻叶片中,As 在 II 号水稻叶中含量最高,III 号水稻叶中次之,西湖边 I 号水稻叶中最少。就其 As 在水稻中的积累率来说: II 号水稻的相对积累率最高达到 66.1%, III 号次之,西湖边 I 号水稻最少只有 29.5%(图 2)。分析得知:(1)由于 II 号和 III 号基本处于同一块区域,其土壤中 As 含量基本一致,但就水稻含 As 量和积累率来说,可以推出,随着水稻的生长,As 逐渐在叶片中累积。(2)对所处成熟期基本一致的 I 号水稻和 II 号水稻进行对比,发现西湖边 I 号水稻无论是含 As 量还是 As 积累率都远低于 II 号水稻,在一定程度上说明过多的水分能抑制 As 在水稻中的累积。

2.2 水稻中 As 含量的高光谱分析模型

重金属 As 由于其具有毒性,过量的 As 含量会

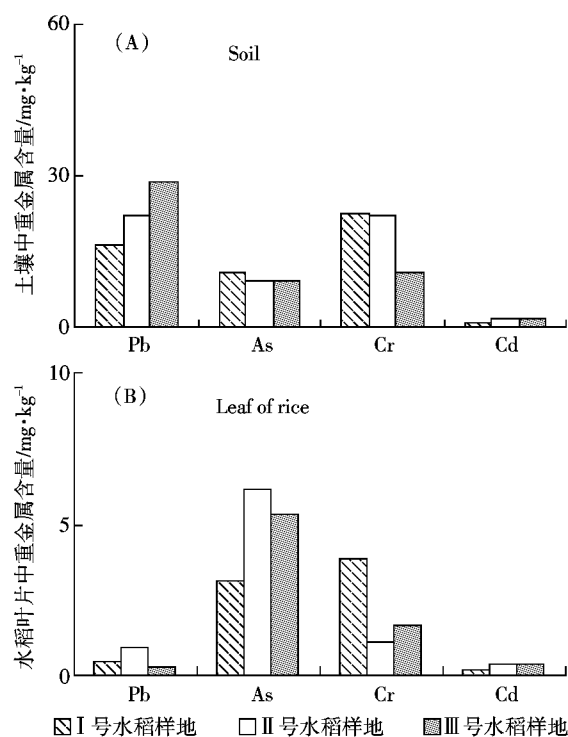


图 1 重金属含量对比

Figure 1 Contrast of the content of heavy metal

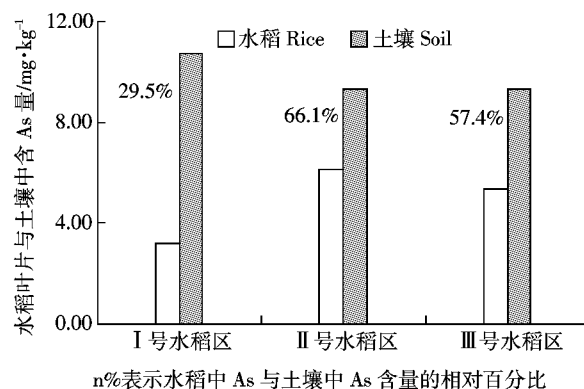


图 2 水稻对土壤中重金属 As 的吸收情况

Figure 2 Contrast of arsenic content between in rice and in soil

伤害植物叶绿体的内部结构,取代叶绿素分子中的 Mg 离子并干扰有关叶绿素合成酶的活性,使叶绿素合成受阻,同时增加叶绿素分解酶的活性^[12-13],使叶绿素分解。本文从水稻叶绿素、光和作用效率以及结构相关色素含量 3 个方面出发,利用表示以上 6 方面的高光谱植被指数(CARI、PRI、SIPI),研究其与水稻中 As 含量的内在联系,并建立相应的回归模型。同时计算 3 样地水稻之间的高光谱植被指数相关性,从反映水稻叶片叶绿素组成和内部构造的指数出发侧面反映水稻生长环境、生长状况的异同,以了解不同样地水稻之间的相似性。

2.2.1 叶绿素吸收率指数(CARI)

CARI 使用绿色波段发射率为基础,对叶绿素含量高度敏感。试验 CARI 值的范围为 0.33~0.62,均值 0.45,数值较小,被试验水稻基本处于成熟阶段。对 3 个不同样地的水稻的 CARI 值间进行相关计算,结果(图 3-a)发现 I 号和 II 号两成熟水稻间的相关系数达到 0.52,相关性较强,表明此两种水稻生长状况基本一致。而西湖边 I 号水稻与 III 号水稻相关系数极小,从侧面反映出此两样地水稻生长环境和生长状况不同。

2.2.2 光化反射率指数(PRI)

PRI 利用两个蓝色窄波段,该指数与辐射利用效率有关,随着光合作用效率的增加而减小。试验 PRI 值范围为 0.1~0.14,均值 0.12,很显然同地区的成熟水稻 PRI 值大于欠成熟水稻。而西湖边 I 号成熟水稻由于水分充足等环境因素,其光合作用效率最高,故其值最小。同样对 3 个地区进行相关分析(图 3-b),发现光合作用效率相对较高的西湖边 I 号成熟水稻和 III 号欠成熟水稻间几乎不相关,说明彼此间的形成较低 PRI 值的原因相差较大。

2.2.3 结构相关色素指数(SIPI)

SIPI 利用蓝色和红色波段来估计叶绿素与总的光合色素之比(类胡萝卜素与叶绿素之比),并用近红外波段来说明与色素改变一致的结构变化。试验 SIPI 值的范围为 1.12~1.58,均值 1.28。Ⅱ号水稻 SIPI 均值已达到 1.44,比值最大,证明其叶绿素不断分解,类胡萝卜素不断累积,作物处在成熟老化期。Ⅲ号水稻叶绿素含量最高,其 SIPI 值最小。其 3 个地区的相关性都较低(图 3-c)。

2.2.4 高光谱植被指数与水稻中 As 含量的关系

过量的 As 含量会伤害植物叶绿体的内部结构,

减少叶绿素,降低光合作用效率。所以从原理上讲,As 含量应该和 CARI 成一定的反比关系,而与 PRI 和 SIPI 呈正比。

试验结果显示,CARI 与水稻中 As 含量呈负相关,相关系数-0.67;PRI 和 SIPI 与 As 含量呈正相关,相关系数分别为 0.82 和 0.91(表 1)。如此高的相关系数证明过量的 As 能严重阻碍叶绿素的形成,减少叶片中叶绿素含量,改变叶片体内各色素之间的组分比例,并伤害叶片内部结构,甚至使作物外部形态也发生较大变化。

表 1 植被指数与水稻中 As 含量回归分析统计

Table 1 Regression analysis between arsenic content in rice and hyperspectral vegetation indices

植被指数	R	SD	N	P
CARI	-0.67	0.787 52	60	<0.000 1
PRI	0.82	0.601 17	60	<0.000 1
SIPI	0.91	0.434 26	60	<0.000 1

经过最小二乘回归,得出各高光谱植被指数与 As 含量的线性回归方程如下(参见图 4):

$m=-7.78\times CARI+8,R=-0.67$

$m=75.66\times PRI-5.06,R=0.82$

$m=7.37\times SIPI-4.57,R=0.91$

式中:m 为水稻中 As 含量,单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 水稻中 As 含量的快速独立变量(ICA)分析

在植物反射光谱上,由于叶绿素 a、b 的强吸收,一般会在蓝光和红光波段形成两个吸收谷。而在绿色植物荧光光谱特征上,在蓝光和红光波段会形成两个荧光峰。一般认为,决定蓝绿荧光的色素,属于维生素 K 或一种类似的苯醌,其峰强可反映该区色素向叶绿素 a 传递能量的有效程度。红光区荧光则来源于通过光子传播引发光合作用的有关叶绿素。蓝绿荧光和红光区荧光在发射源对应的叶片组织结构方面又有所不同,蓝绿荧光发射主要来自主、侧叶脉,而红光区荧光发射主要来自于非叶脉区域^[14]。根据重金属 As 能引起叶绿素和叶片结构变化,本文选取蓝光波段(440~540 nm)和红光波段(600~700 nm)分别进行 ICA 分析。

利用快速独立变量(ICA)分析的目的是想找出 As 污染胁迫造成水稻光谱特征改变的独立变量。然后利用此变量与 As 含量进行最小二乘拟合,得出回归方程。

而在进行快速独立变量(ICA)分析之前必须对

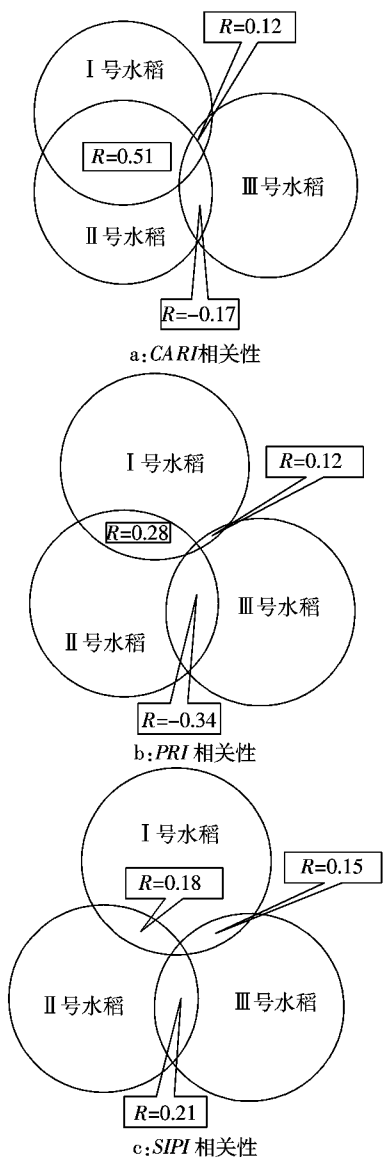


图 3 不同地区水稻的高光谱植被指数之间相关性
Figure 3 Correlation of hyperspectral vegetation indices among different rice

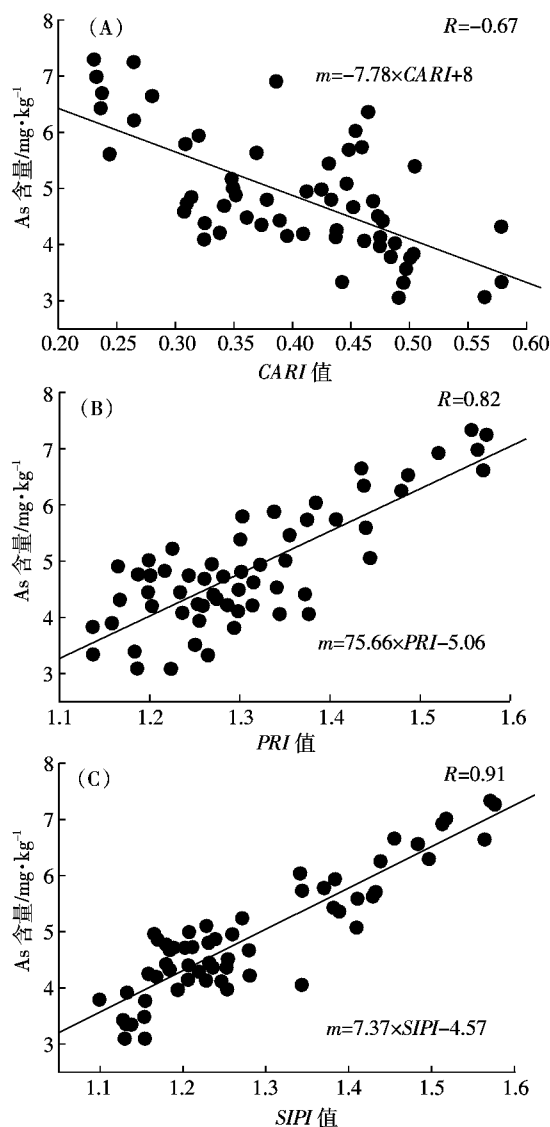


图4 水稻中As含量与高光谱植被指数的回归方程

Figure 4 Regression equation between hyperspectral vegetation indices and arsenic content in rice

光谱数据进行预处理,也就是中心化和白化。中心化即是使数据的均值为0,中心化方法为 $x=x-m$,其中 $m=E(X)$ 为数据 x 的均值。在对信号进行中心化处理后,利用主成分分析通过线性变换,使变换后信号的各分量之间互不相关,其各分量的方差均为1,这个过程称为对数据的白化处理。

通过试验分析得出,在蓝光波段(440~540 nm)和红光波段(600~700 nm)之间各提取了两个独立变量,分别为蓝光波段的 $IC-B1$ 、 $IC-B2$ 和红光波段的 $IC-R1$ 、 $IC-R2$ 。分别对其与As含量进行相关分析,发现 $IC-B1$ 、 $IC-R1$ 与水稻中As含量高度相关,相关系数高达0.95以上,其中水稻中As含量与 $IC-B1$ 正相关,而与 $IC-R1$ 负相关(表2)。这表明,在蓝光波段,

As能引起某独立变量的正向变化,这种变量可能与叶绿素以及叶片结构有关;而在红光波段,As能引起与叶绿素相关的独立变量的负向变化。

表2 独立变量与水稻中As含量回归分析统计

Table 2 Regression analysis between arsenic content in rice and independent variables

独立变量	<i>R</i>	<i>SD</i>	<i>N</i>	<i>P</i>
$IC-B1$	0.96	0.313 19	60	<0.000 1
$IC-R1$	-0.95	0.343 51	60	<0.000 1

440~540 nm内的独立变量 $IC-B1$ 与As含量的相关关系如表2,回归方程如下(参见图5A):

$$m=1.1 \times (IC-B1) - 16.4, R=0.96$$

600~700 nm内的独立变量 $IC-R1$ 与As含量的相关关系如表2,回归方程如下(参见图5B):

$$m=-1.08 \times (IC-R1) - 3.83, R=-0.95$$

式中: m 为水稻中As含量,单位 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 结论

水稻中As含量与叶片中叶绿素含量以及叶片内部结构关系密切,代表叶绿素及叶片内部结构变化的高光谱植被指数(如 $CARI$ 、 PRI 、 $SIPI$)与水稻中As含

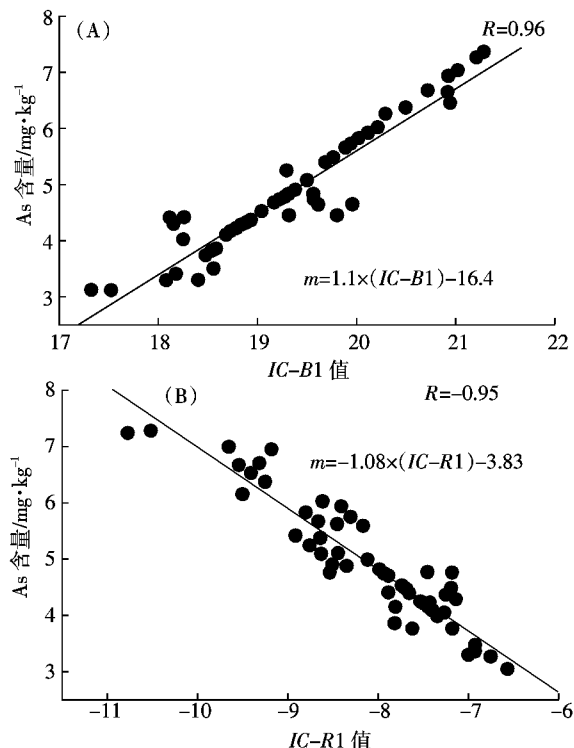
图5 独立变量 $IC-B1$ 、 $IC-R1$ 与水稻中As含量的线性回归图

Figure 5 Regression equation between arsenic content in rice and independent variables

量高度相关。其中 *CARI* 与水稻中 As 含量呈负相关, 相关系数-0.67; *PRI* 和 *SIPI* 与 As 含量呈正相关, 相关系数分别为 0.82 和 0.91。

独立变量分析(*ICA*)结果表明, 在蓝光波段(440~540 nm)和红光波段(600~700 nm)之间各有一个独立变量与水稻中 As 含量高度相关, 相关系数达到 0.95 以上。其中水稻中 As 含量与 *IC-B1* 正相关, 而与 *IC-R1* 负相关。

高光谱模型和独立变量分析模型能很好的探测成熟期水稻中重金属 As 的含量, 为大面积探测成熟水稻 As 污染提供一定的依据。

但是本研究也存在着一定的缺陷, 由于研究数据的限制, 缺乏足够的数据库对研究进行纵向的比较, 而且所取样品 As 含量比较接近, 故在光谱曲线上的差别不大, 且没有完整的不同浓度组的比较。其次, 本文仅对处于成熟期的水稻进行研究, 对水稻不同生长期的 As 反应缺乏足够比较, 这些都是以后需要深入解决的地方。

参考文献:

- [1] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(3): 264-270.
- [2] Jiang Cheng-ai, Wu Qi-tang, Chen Zhang-liu. The researching progress of arsenic contamination in soil[J]. *Soil*, 2004, 36(3): 264-270.
- [3] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species[J]. *New Phytol*, 2002, 154: 29-43.
- [4] 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.
- [5] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation[J]. *Chinese Science Bull*, 2002, 47: 902-905.
- [6] 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 contaminated soil[J]. *Nature*, 2001, 409: 579.
- [7] Mkwandawire 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]. *Environment Toxicol*, 2004, 19: 26-34.
- [8] 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.
- [9] 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 Sensing of Environment*, 1989, 30: 263-269.
- [10] Font R, Del Río M, Vélez D. Use of near-infrared spectroscopy for determining the total arsenic content in prostrate amaranth[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 327: 93-104.
- [11] Du P, Zhao H J. Independent component analysis for hyperspectral imagery plant classification[J]. *Applications of Neural Networks and Machine Learning in Image Processing*, 2005, 5673: 71-81.
- [12] 梁顺林, 著. 范闻捷, 等译. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 198-205.
- [13] LIANG Shun-lin, FAN Wen-jie, et al. translate. Quantitative of remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2009: 198-205.
- [14] 李圣发, 普红平, 王宏镭. 砷对植物光合作用影响的研究进展[J]. 土壤, 2008, 40(3): 360-366.
- [15] LI Shen-fa, PU Hong-ping, WANG Hong-bin. The researching progress of the impact of arsenic on plant photosynthesis[J]. *Soil*, 2008, 40(3): 360-366.
- [16] 谢飞, 王宏镭, 王海娟, 等. 砷胁迫对不同砷富集能力植物叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报. 2009, 28(7): 1379-1385.
- [17] XIE Fei, WANG Hong-bin, WANG Hai-juan, et al. Effects of arsenic stress on activities of antioxidant enzymes in the fronds of plants with different abilities to accumulate arsenic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1379-1385.
- [18] 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 6-9.
- [19] WANG Ji-hua, ZHAO Chun-jiang, HUANG Wen-jiang, et al. Foundation and application of quantitative remote sensing in agriculture[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6-9.