

镉污染胁迫下水稻生理生态表征高光谱识别模型

关丽¹, 刘湘南²

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 中国地质大学信息工程学院, 北京 100083

摘要: 利用水稻生长季节多个时相的 ASD 实测高光谱数据和同步获取的土壤—作物特征参数, 系统分析了高光谱遥感指数与镉污染胁迫下水稻生理生态参数变化特征之间的响应关系。选择叶绿素含量、水分含量、细胞结构和叶面积指数 4 个重要生理生态参数作为水稻镉污染胁迫响应因子, 通过理论分析和实验验证, 得到对上述因子变化敏感的高光谱遥感指数及其响应规律。在此基础上建立 MCARI-NDWI、MCARI-RVSI、MCARI-RVI、NDWI-RVSI、NDWI-RVI 和 RVSI-RVI 模型, 揭示了不同污染程度条件下响应因子在各光谱指数空间中的表征规律。

关键词: 镉污染胁迫; 水稻生理表征; 高光谱遥感; 光谱特征空间; 遥感识别模型

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0488-06

快速、动态、准确地识别和监测农田土壤污染特征具有重要的科学意义和实践价值。农田土壤重金属污染成因复杂, 涉及许多随机过程和随机影响, 没有明显的外在表现, 往往要通过农作物包括粮食、蔬菜、水果或牧草以及摄食的人或动物的健康状况才能反映出来, 从遭受污染到产生后果有一个相当长的逐步积累过程, 具有滞后性和隐蔽性。为了监测农田土壤重金属污染, 不少领域的学者采用了不同的生物和化学等方法^[1-2], 希望从不同角度获得解决这一问题的有效途径。但要在短时间内获得大面积的土壤污染状况, 仅靠地面调查是很难做到的, 而利用高光谱遥感技术则可能十分迅速而有效。一般情况下, 农田土壤污染遥感监测多是通过农作物冠层光谱信息分析来展开的, 所以, 利用高光谱技术大面积动态监测农田土壤污染, 需要分析受污染胁迫作物冠层的光谱特征, 提取有关的遥感信息参数, 研究重金属污染的遥感胁迫机理, 为农田土壤重金属污染胁迫遥感监测提供理论支持。因此, 利用土壤-植被系统敏感因子的高光谱识别能力建立定量遥感反演模型, 进行农田面源污染的大范围快速提取, 不但是必要的, 而且是可行的。

国内外学者在利用高光谱数据对植物生化组分的定量研究中, 大多采用统计分析的方法, 对叶片不同形式的光谱数据进行直接或间接回归分析, 以获得统计方程和相关系数, 并对其进行评价^[3-4]。由于统计方法自身存在的局限性和不确定性等问题, 使其在实际应用中精度不高, 特别是不能进行机制解释。围绕统计方法的改进研究, 许多学者开展了大量的工作, 研究的核心在于如何选择最适宜

的光谱波段和光谱变化形式即光谱指数^[5-6], 提出了微分光谱、归一化光谱等光谱形式及红边位置等概念。本文以农田土壤镉污染胁迫为研究对象, 着重分析受污染胁迫的土壤-作物系统结构、理化性质和生物参数及其与高光谱遥感数据的响应关系, 探讨水稻冠层的光谱信息参数对镉胁迫程度的响应模型, 分析其胁迫机理, 建立水稻镉污染胁迫遥感识别模型。

1 数据获取与处理

在苏州、长春等地区选择具有不同污染特征的水稻样地若干块, 2008 年 6 月至 9 月, 在水稻生长季节的多个关键时期, 运用美国 ASD 公司 Agri SpecTM 便携式地物波谱仪测量水稻冠层及土壤高光谱数据, 工作波段 350~2 500 nm, 光谱采样间隔 10 nm。运用 Konica Minolta 公司生产的 SPAD-502 叶绿素仪进行水稻叶片叶绿素含量的测定。同步采集土壤样本、水稻植株样本进行实验室化验分析, 得到土壤表层 (0~10 cm) 镉元素含量、叶片镉元素含量、植株水分含量、叶面积指数等实验数据。对冠层高光谱数据进行处理, 从原始测量数据中选择一些特定波段和一组光谱特征参数, 选用的波段从 447 nm 到 925 nm, 932 nm 到 1 296 nm, 没有考虑在 1 400 nm 和 1 900 nm 间隔中那些强烈被大气水汽吸收的波段, 选用的光谱特征参数如表 1 所示, 它们对叶绿素含量、叶子水分和细胞结构及叶面积指数存在潜在的敏感性。为了分析镉污染胁迫对作物生长状态的影响, 应用相关关系法^[7]分别提取对受的水稻叶绿素含量、叶子水分、细胞结构和叶面积指数敏感的波段和光谱特征参数, 以便建立水稻镉污染胁迫特征遥感识别模型。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771155); 国家 863 基金项目 (2007AA12Z174)

作者简介: 关丽(1980 年生), 女, 博士研究生, 研究方向为高光谱遥感及 GIS 数据组织的理论与应用研究。E-mail: binger02600@163.com

收稿日期: 2009-01-14

表 1 水稻生理生态敏感光谱参数计算方程

Table 1 Computation equations of sensitive spectral parameters for physiological characterization of rice

光谱参数名称	表达式	出处
1. Depth671(Depth of the 671 nm absorption band)	连续统算法(端点分别在 569 nm 和 763 nm)	Clark & Roush ^[8]
2. MCARI(Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)	$[(\rho_{701}-\rho_{671})-0.2(\rho_{701}-\rho_{549})]/(\rho_{701}/\rho_{671})$	Daughtry et al. ^[9]
3. NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)	$(\rho_{864}-\rho_{671})/(\rho_{864}+\rho_{671})$	Rouse et al. ^[10]
4. RVSI(Red-Edge Vegetation Stress Index)	$((\rho_{712}+\rho_{752})/2)-\rho_{732}$	Merton Huntington ^[11]
5. NPCI(Normalized pigments chlorophyll ratio index)	$(\rho_{680}-\rho_{460})/(\rho_{680}+\rho_{460})$	Blackburn G A. ^[12]
6. Depth983(Depth of the 983nm absorption bands)	连续统算法(端点分别在 933 nm 和 1094 nm)	Clark & Roush ^[8]
7. Depth1205(Depth of the 1205nm absorption bands)	连续统算法(端点分别在 1094 nm 和 1286 nm)	Clark & Roush ^[8]
8. LWVI (Leaf Water Vegetation Index)	$(\rho_{1094}-\rho_{893})/(\rho_{1094}+\rho_{893})$	Le'nio Soares Galva'õ ^[13]
9. VLWVI (Variational Leaf Water Vegetation Index)	$(\rho_{1094}-\rho_{1205})/(\rho_{1094}+\rho_{1205})$	Le'nio Soares Galva'õ ^[13]
10. DSWI (Disease Water Stress Index)	$(\rho_{803}+\rho_{549})/(\rho_{1659}+\rho_{681})$	Apan et al. ^[14]
11. NDWI(Normalized Difference Water Index)	$(\rho_{864}-\rho_{1245})/(\rho_{864}+\rho_{1245})$	Gao ^[15]
12. WI (Water inde)	ρ_{870}/ρ_{950}	Ogunjemiyo, S. ^[16]
13. LWC (Liquid water content)	ACORN-微分方法	Imspec ^[17]
14. FDREP (First Derivative and Red Edge Position)	一阶微分方法(从 691 nm 到 763 nm), 计算红边位置	Tsai & Philpot ^[18]
15. RVI (Ratio vegetation index)	ρ_{864}/ρ_{671}	Wiegand, C ^[19]

注: ρ 表示波长反射率。

2 镉污染胁迫下水稻生理生态参数变化特征及光谱响应

2.1 镉胁迫水稻色素变化及光谱响应机理

镉元素对水稻叶绿素含量的影响非常明显,随着水稻植株体内镉浓度升高,水稻中叶绿素含量逐渐下降,二者之间的相关程度非常显著。健康绿色植物的高光谱曲线可见光部分的低谷主要由叶绿素强烈吸收引起,假如叶绿素等色素的浓度因某种原因下降,绿色视觉效果就会减弱。另外,镉胁迫还能引起色素比率的变化。实验证明,水稻叶绿素 a/叶绿素 b 随土壤镉浓度上升而下降,这说明镉对叶绿素 a 的破坏作用大于叶绿素 b,而发挥重要作用的叶绿素分子正是叶绿素 a 分子。因此,土壤镉胁迫直接影响作物的生长发育,使水稻叶片逐渐褪绿,破坏叶绿素结构,表现为叶片出现褐色条纹,严重时根系少且短,根毛发育不良。有实验证明,

当土壤镉含量低于 1 mg/kg 时,水稻减产不明显,5 mg/kg 处理后减产 10%以上。在高质量分数镉污染胁迫时,水稻叶绿素含量均呈下降趋势,但降幅存在较明显差异。

根据上述分析,为确定镉胁迫对水稻叶绿素含量变化的影响,分别计算镉胁迫下 447~925 nm 这 48 个波段水稻的反射率值,并选择 Depth671、MCARI、NDVI、RVSI 和 NPCI 等遥感信息指数(计算公式见表 1)。这五个指数都是对植物叶绿素变化比较敏感的遥感参数,通过计算分析将从中找出一个或者多个与水稻镉胁迫的叶绿素含量关系密切的指数。同时,计算 48 个波段之间的相关系数以及 5 个光谱参数之间的相关系数,以去除相关关系强烈的波段和光谱参数。其中,波段 14 和波段 21 的相关关系,Depth671 和 MCARI 的相关关系如图 1 所示。

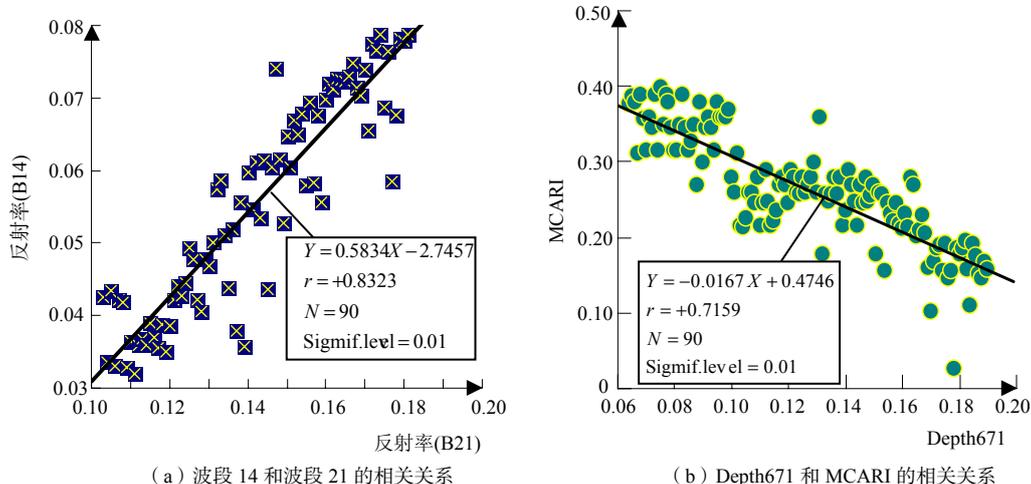


图 1 波段以及光谱指数的相关关系

Fig. 1 Correlation relationships of bands and spectral feature parameters

根据实验测得的水稻土表层 (0~10 cm) 中镉含量数据, 利用相关分析法依次计算 48 个波段和 5 个遥感信息指数与土壤镉含量的响应系数。遥感信息指数的响应系数从高到低的顺序为 MCARI, NPCI, RSVI, NDVI, Depth671。因此, 选用 MCARI 来作为镉胁迫下水稻叶绿素变化的响应参数, 如图 2 (a) 所示。从图 2 (a) 中可知, 农田土壤镉质量分数在 0~1.0 mg/kg 范围内, 随着镉质量分数增大, MCARI 曲线有小幅增长, 但幅度很小, 这说明水稻不但生长良好, 甚至比正常更好, 这是由于虽然镉不是植物的必需元素, 但如土壤中存在低质量分数的镉可能促进水稻的生长。农田土壤镉质量分数在 1.0~2.0 mg/kg 范围内, MCARI 曲线有小幅下降, 说明水稻的色素受到破坏。在 2.0~3.0 mg/kg 范围内, MCARI 曲线呈水平状态, 说明水稻已经达到忍耐镉质量分数的状态, 其色素受损达到一个稳定水平。在 3.0~5.0 mg/kg 范围内, MCARI 曲线呈平缓下降趋势, 水稻光合作用受到进一步破坏。在 5.0 mg/kg 以上, MCARI 呈大幅下降趋势, 水稻叶绿素受到极大破坏, 水稻趋于死亡状态。从以上分析中可以看出, 镉胁迫对水稻叶绿素的影响是比较大的, 二者相关关系明显, 并在高光谱遥感指数 MCARI 上有明显而规律的响应。

2.2 镉胁迫水稻水分变化及光谱响应机理

镉胁迫将导致水稻对水的吸收减少, 耗氧量增大, 影响水稻的生理生化活性, 使氧化过程和光合过程及脂肪代谢过程强度减弱, 阻碍植株生长, 甚至引起作物死亡。植被光谱上, 在 1300 nm 之后, 反射率曲线具有两个明显的波谷, 分别位于 1300~1600 nm (1400 nm), 1830~2008 nm (1950 nm), 这两个波谷是由于水分强烈吸收所致。当水稻受镉胁迫严重时, 两个水分吸收谷变浅, 随着土壤中镉质量分数的增大, 光谱曲线将呈水平趋势。

为确定镉胁迫对水稻植株中水分含量变化的影响, 选择遥感信息指数包括 Depth983、Depth1205、LWVI、DSWI、NDWI、WI、VLWVI 和 LWC (计算公式见表 1)。根据实验数据分析, 结果表明, 对水稻植株中水分变化敏感的遥感信息指数的响应系数从高到低的顺序为 NDWI, WI, DSWI, Depth983, LWVI, VLWVI, Depth1205, LWC。由此可见, NDWI 能有效反映水稻植株水分的变化特征, 对镉胁迫的水稻水分比较敏感, 可以作为衡量植株中水分变化的响应因子。应用 NDWI 来研究镉胁迫的水稻水分变化, 如图 2 (b) 所示。从图 2 (b) 中可知, 农田土壤镉质量分数在 0~1.0 mg/kg 范围内, NDWI 有小幅增长, 表明在此范围内水稻水分受到镉胁迫的影响较弱; 农田土壤镉质

量分数在 1.0~2.0 mg/kg 范围内, NDWI 呈下降趋势, 但下降幅度较小, 主要是由于水稻受镉胁迫影响, 导致氧化过程强度减弱, 促使水的吸收量减少, 1245 nm 光谱反射值上升; 在 2.0 mg/kg 处, NDWI 出现断点; 在 2.0~3.0 mg/kg, NDWI 基本呈水平趋势, 说明镉对水稻水分的影响在一个忍耐阶段; 3.0~5.0 mg/kg 范围内, NDWI 曲线平缓下降, 水稻呼吸作用和蒸腾作用被进一步遏制, 表明水稻植株水分含量显著减少; 在 5.0 mg/kg 以后, NDWI 迅速下降, 说明镉的质量分数已经阻碍植物生长, 引起植物死亡。

2.3 镉胁迫水稻细胞结构变化及光谱响应机理

当水稻受到镉胁迫的影响时, 会引起水稻细胞膜结构和功能的改变。首先, 膜质可能是胁迫物的主要作用位点, 水稻在遭受镉胁迫后, 细胞膜会发生膜质过氧化作用, 导致膜损伤, 通透性发生改变。受镉胁迫时, 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, 细胞内分割作用消失, 细胞器崩溃, 最终导致细胞坏死。

为确定镉胁迫对水稻细胞结构影响的光谱响应规律, 选择 59 个波段进行分析, 将这些波段分为 9 类, 分别为 Red edge(691-763(34-41))、NIR1(782-803(43-45))、NIR2(813-862(46-50))、NIR3(864-892(51-53))、NIR4(894-972(54-57, 80-83))、NIR5 (976-993 (84-85))、NIR6 (996-1194(86-105))、NIR7(1205-1255(106-111))、NIR8 (1265-1295 (112-115)), 分别计算镉污染胁迫下水稻在这 59 个波段的反射率值。选择的遥感信息指数包括 FDREP、NDVI、RSVI 和 RVI, 用来反演水稻细胞结构变化, 响应系数最大值从高到低的顺序为 B85, B34, B43, B52, B107, B94, B114, B50, B57。结果表明受镉胁迫的水稻细胞结构在 NIR5 比 Red edge 敏感, 这主要由于在 NIR5 范围内波段反射率降低幅度大, 因此计算得出的响应系数更高。因此, B85 和 B34 都可作为监测胁迫的敏感波段。遥感信息指数的响应系数从高到低的顺序为 RSVI, NDVI, FDREP, RVI。RSVI 能有效反映水稻细胞结构受镉胁迫影响的变化, 尤其在 Red edge 波段范围内, 由于镉胁迫下水稻细胞结构变化对此波段较敏感, 所以, 一定程度上使 RSVI 对镉胁迫的响应很高。因此, 采用 RSVI 指数来识别镉胁迫的水稻细胞结构变化特征, 如图 2 (c) 所示。从图 2 (c) 看出, 农田土壤镉质量分数在 0~1.0 mg/kg 范围内, RSVI 基本不变, 这说明镉胁迫主要被水稻根系固结, 水稻细胞结构并没有受到严重破坏;

在 1.0~2.0 mg/kg, RVSII 指数小幅上升, 植物的红边出现蓝移现象, 作物细胞结构受到轻微破坏; 在 2.0~3.0 mg/kg 范围内, RVSII 指数曲线呈水平状态, 表明作物细胞结构破坏到一定程度, 出现忍耐阶段; 3.0~5.0 mg/kg 范围内, RVSII 曲线平缓下降, 水稻细胞结构遭受进一步破坏; 在 5.0 mg/kg 以上, RVSII 迅速下降, 说明镉的质量分数已经阻碍水稻生长, 引起水稻死亡。

2.4 镉胁迫水稻叶面积指数变化及光谱响应机理

镉胁迫会导致水稻植株形态上发生某些变化, 如落叶、分枝减少或死亡、叶片出现坏死斑等。为了有效反映镉胁迫下水稻植株的形态变化, 应用 LAI 来表征水稻形态变化。通常 LAI 指单位土地面积上所有叶片表面积的总和, 或单位面积上植物叶片的垂直投影面积的总和。本研究中, 采用研究比较成熟的 RVI 来反演 LAI, 并进一步建立 RVI 与土壤镉质量分数的响应关系, 如图 2 (d) 所示。其中, RVI 已做归一化处理。从图 2 (d) 可以看出, 土壤镉质量分数在 0~1.0 mg/kg 范围内, RVI 随着土壤镉质量分数的增加有小幅增长, 可见, 低质量分数的镉胁迫可能促进水稻生长, 但 LAI 增长有限; 农田土壤镉质量分数在 1.0~2.0 mg/kg 范围内, RVI

曲线有小幅下降, 植被叶面积指数减小, 说明水稻的枝叶密度降低, 这主要由于土壤镉胁迫导致叶子脱落; 在 2.0~3.0 mg/kg 范围内, RVI 曲线呈现水平状态, 水稻忍受一定质量分数的镉胁迫, 在此质量分数范围内, 形态变化不大; 在 3.0~5.0 mg/kg 范围内, RVI 曲线平缓下降; 在 5.0 mg/kg 以上, RVI 曲线大幅下降, LAI 减小, 水稻叶子变化明显, 大部分叶片脱落, 直至死亡状态。

3 镉污染胁迫下水稻生理生态表征遥感识别模型

在系统研究农田土壤镉胁迫与水稻的色素、水分、植株细胞结构和叶面积指数之间的关系及光谱响应规律后, 根据所确定的四个高光谱敏感因子, 通过理论分析和实验数据验证, 揭示水稻镉胁迫遥感信息机理, 建立水稻镉污染胁迫高光谱遥感识别模型, 包括 MCARI-NDWI 模型、MCARI-RVSII 模型、MCARI-RVI 模型、NDWI-RVSII 模型、NDWI-RVI 模型、RVSII-RVI 模型, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在 MCARI-RVSII、NDWI-RVSII、RVSII-RVI 三个模型中, 中等程度的农田土壤镉质量分数 (1.0~3.0 mg/kg) 在光谱指数特征空间中集中在高质量分数和低质量分数的上方, 这主要缘

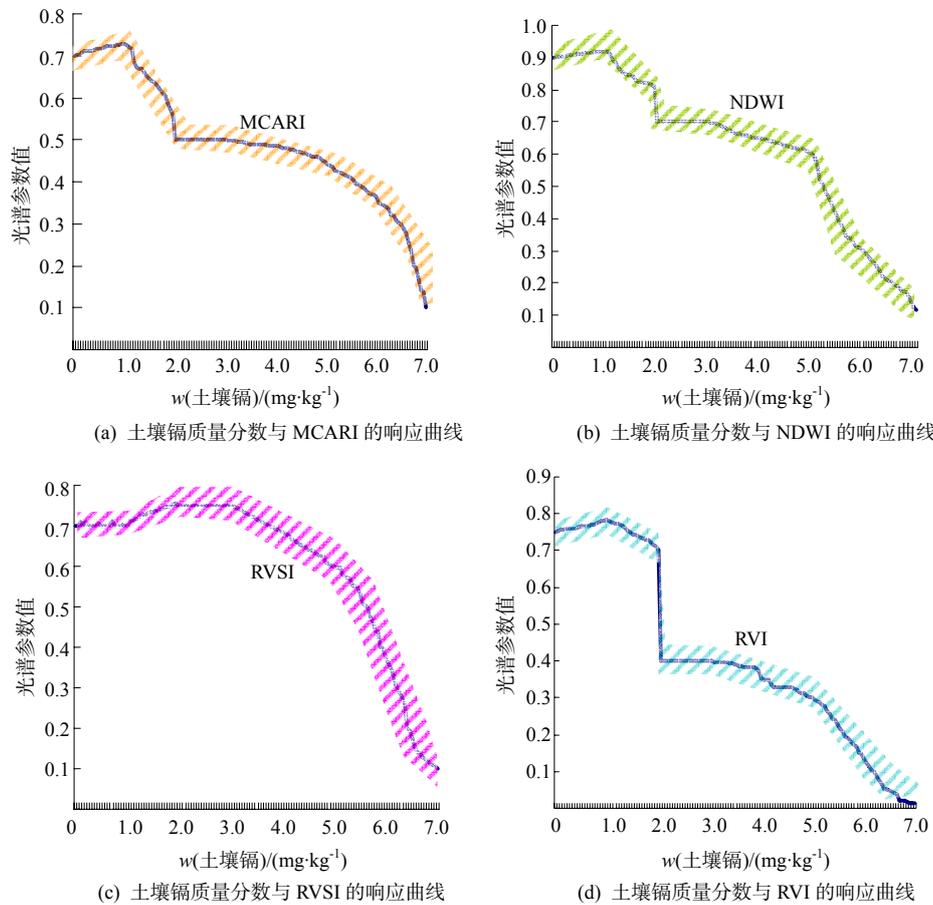


图 2 土壤镉质量分数与光谱指数的响应曲线

Fig. 2 Response curves of Cd concentration in soil and vegetation indices

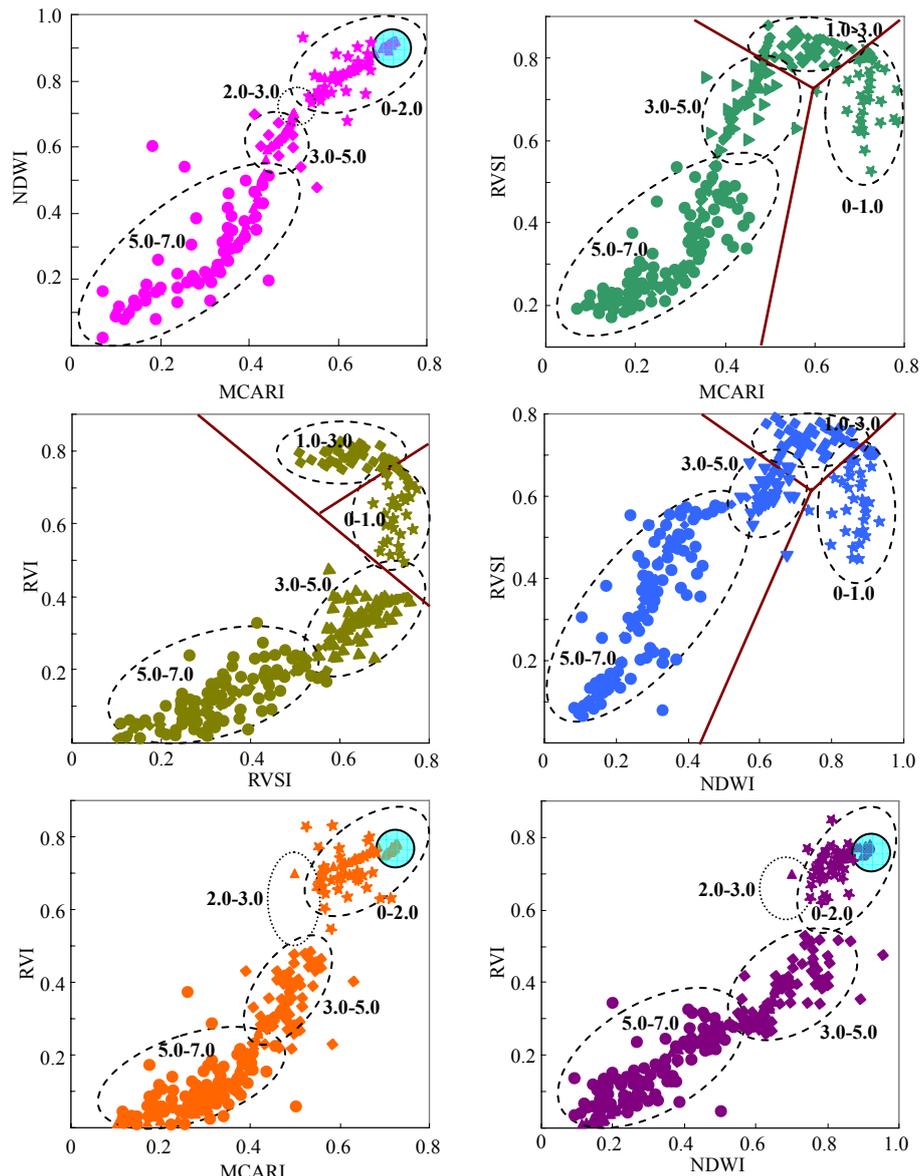


图 3 水稻镉胁迫遥感识别模型

Fig. 3 Remote sensing recognition models in Cd stress of rice

于植被光谱蓝移现象。在 MCARI-NDWI、MCARI-RVI、NDWI-RVI 三个模型中,低质量分数胁迫 ($0\sim 2.0\text{ mg/kg}$) 主要集中在光谱指数特征空间中参数值都很高的区域,中质量分数胁迫 ($2.0\sim 3.0\text{ mg/kg}$) 主要集中在指数值居中的位置,而且由于镉质量分数在 $2.0\sim 3.0\text{ mg/kg}$ 范围内,水稻植株多会出现忍耐现象,这在各个遥感信息指数的响应关系中很明显,因此,在镉胁迫遥感识别各个模型中,出现了植被忍耐点,也就是各个遥感信息指数都集中在这一点,称为水稻镉忍耐点。高质量分数镉胁迫 ($3.0\sim 5.0\text{ mg/kg}$) 主要集中在遥感信息指数特征空间较低的区域。值得注意的是,镉质量分数 1.0 mg/kg 是各个曲线的峰值拐点,这是水稻在低质量分数镉胁迫下生长更茂盛的体现,也是水稻镉胁迫的特别之处。由此可见,不同镉质量分数胁迫在光

谱指数特征空间中分布位置不同,因此,可以根据此遥感识别模型应用高光谱卫星遥感数据大面积快速、动态判定土壤镉胁迫程度。

4 讨论

本文通过研究受镉胁迫的水稻冠层光谱与其生化组分的关系来研究水稻镉污染胁迫的遥感监测机制,着重分析受镉胁迫的水稻叶绿素、水分、细胞结构和叶面积指数等敏感因子的表征及其在高光谱遥感指数上的响应规律,揭示水稻镉污染胁迫的遥感信息机理,建立水稻镉污染胁迫遥感识别模型。研究表明,不同的镉质量分数胁迫在光谱指数特征空间上分布位置不同,通过建立多个特征光谱指数特征空间模型来提取稳定的镉污染胁迫特征。因此,可以根据该遥感识别模型应用高光谱遥感数据判定土壤镉胁迫程度,并进行镉胁迫大

面积动态监测。本研究的结果有助于改进传统遥感数据统计分类的精度及局限性, 为利用高光谱遥感技术大面积监测土壤镉胁迫提供了一种新的思路与技术方法, 具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 高杨, 范必威. 大气降尘与土壤中重金属铬的形态分布规律[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1438-1441.
GAO Yang, FAN Biwei. The modality distribution of the chromium in the atmospheric dustfall and soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008, 17(4): 1438-1441.
- [2] 齐雁冰, 黄标, Darilek J L, 等. 氧化与还原条件下水稻土重金属形态特征的对比[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2228-2233.
QI Yanbing, HUANG Biao, DERLEK J L, et al. Comparison of heavy metal fractions distribution in paddy soil under anoxic and oxidized conditions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2008, 17(6): 2228-2233.
- [3] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228-232.
WU Changshan, XIANG Yueqin, ZHENG Lanfen, et al. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3): 228-232.
- [4] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 279-283.
LIU Weidong, XIANG Yueqing, ZHENG Lanfen, et al. Relationships between rice LAI CH D and hyperspectral data[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(4): 279-283.
- [5] 颜春燕, 牛铮, 王纪华, 等. 光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型[J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 742-749.
YAN Chunyan, NIU Zheng, WANG Jihua, et al. The assessment of spectral indices applied in chlorophyll content retrieval and a modified crop canopy chlorophyll content retrieval model[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 742-749.
- [6] HABOUDANE D, MILLER J R, TREMBLAYN, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 416-426.
- [7] GOEL K, PRASHER O, LANDRY A, et al. Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency and weed infestation in corn[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2003, 38: 99-124.
- [8] CLARK N, ROUSH L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 6329-6340.
- [9] DAUGHTRY T, WALTHALL L, KIM S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74: 229-239.
- [10] ROUSE W, HAAS H, SCHELL A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]. Proceedings of Third ERTS-1 Symposium, NASA SP-351, Washington: 1973, 1: 309-317.
- [11] MERTON R, HUNTINGTON J. Early simulation of the ARIES-1 satellite sensor for multi-temporal vegetation research derived from AVIRIS[J]. Summaries of the Eight JPL Airborne Earth Science Workshop, 1999, 99(17): 299-307.
- [12] BLACKBURN A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 657-675.
- [13] LEˆNIO SOARES GALVAˆO, ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO, DANIELA A T. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94: 523-534.
- [14] APAN A, HELD A, PHINN S, et al. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25: 489-498.
- [15] GAO C. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58: 257-266.
- [16] OGUNJEMIYO S, ROBERTS A, KEIGHTLEY K, et al. Evaluating the relationship between AVIRIS water vapor and poplar plantation evapotranspiration[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, D107, ACL20.1-ACL20.15.
- [17] JACKSON D, PINTER. Analytical Imaging and Geophysics[M]. CO USA, 1986.
- [18] TSAI F, PHILPOT W. Derivative analysis of hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 41-51.
- [19] WIEGAND, CANDERSON G, LINGLE S, et al. Soil salinity effects on crop growth and yield: Illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148: 418-424.

Hyperspectral recognition models for physiological ecology characterization of rice in Cd pollution stress

Guan Li¹, Liu Xiangnan²

1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In this paper the response relationships between hyperspectral remote sensing parameters and change features of physiological ecology parameters in Cd pollution stress are systematically analyzed, taking advantage of measured ASD hyperspectral data and synchronized obtained soil-crop feature parameters in several time phase of growing season of rice. Four important physiological ecology parameters, including chlorophyll concentration, water content, cell structure and leaf area index (LAI), are regarded as the response factors of Cd pollution stress of rice. The hyperspectral remote sensing parameters, which are sensitive to above factors change, and its response rules are gained under theoretical analysis and experimental verification. On this basis MCARI-NDWI model, MCARI-RVSI model, MCARI-RVI model, NDWI-RVSI model, NDWI-RVI model and RVSI-RVI model are established to reveal characterization rules of response factors in various spectral parameter space under different condition of pollution degree.

Key words: Cd pollution stress; rice physiological characterization; hyperspectral remote sensing; spectral feature space; remote sensing recognition models