

基于水稻冠层 NDVI 的土壤盐碱化信息预测研究

张俊华¹, 贾科利²

(1. 宁夏大学 新技术应用研究开发中心, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 通过测定不同盐碱化程度土壤上覆植被光谱特征和土壤的盐碱化指标,探讨了通过上覆植被光谱与土壤盐碱化信息的关系。试验结果表明,水稻冠层归一化植被指数(NDVI)从返青期到孕穗期逐渐增大,孕穗期达到最大,然后开始下降;水稻全生育期冠层 NDVI 与土壤表层全盐、电导率(EC)呈显著相关(相关系数平均分别为 0.608 2 和 0.623 9),孕穗期相关性达到最强;除返青期外,其它时期水稻冠层 NDVI 与土壤 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 呈极显著相关关系(平均相关系数为 0.564 8);全生育期水稻冠层 NDVI 与土壤 HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关性很差或不稳定,所以从分蘖期到乳熟期,根据冠层 NDVI 可以较准确地估测土壤全盐、EC 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$,但不能准确估测土壤中的其它盐基离子。

关键词: 盐碱土; NDVI; 盐分指标

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0113-04

中图分类号: S143

Prediction of Alkali-saline Information Based on NDVI of Rice Canopy

ZHANG Jun-hua¹, JIA Ke-li²

(1. Applied Research and Development Center for New Technology of Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. College of Resource and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Reflectance characteristics of canopy and salinity parameters of soil were studied to investigate the relationship of reflectance of above-vegetation and salinity information of soil. The results showed that the maximum of canopy NDVI value presented at booting of rice. Throughout the whole growth stages, the canopy NDVI increased with the decrease of the whole salt, EC of surface soil, especially at booting stage. The NDVI of rice canopy was inversely related to soil $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ at jointing, booting and filling stages, except for the regreening stage. The NDVI of rice canopy did not presented significant differences with the increase of soil HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Mg^{2+} at the whole stages. Therefore, the total salt, EC and $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ of alkali-saline soil could be accurately predicted through measuring the canopy reflectance of rice from tillering to filling stage.

Keywords: alkali-saline soil; NDVI; salt index

传统识别和监测土壤盐碱化的方法包括地下水位钻孔,土壤理化分析和土壤电导率测定等^[1-2]。但由于盐碱化土壤分布的不均匀性和复杂性,单位面积的土壤盐碱化程度可能存在较大差别,所以需要采集大量的土壤样品,从大量样品的采集、风干(烘干)、称重、研磨直至测定,都需要耗费大量的人力、物力和财力,而且由于花费时间过长,可能导致研究结果缺乏适时性。利用土壤的电磁波谱信息,遥感技术能够获取广域、多波段、多时相的土壤信息,使大面积实时动态监测盐碱化状况成为可能^[3-4]。上覆植被生长状况

和土壤特性密切相关,通过上覆植被冠层光谱特征反映土壤的盐碱化程度,为土壤盐碱化程度的估测提供了另外一条途径。早有学者^[5-8]研究指出,作物冠层归一化植被指数(NDVI)和土壤电导率高度相关,从而可以区分出盐碱土和非盐碱土。作物冠层 NDVI 与土壤碱化度(ESP)和 pH 值的也具有较好的相关性,Delfine^[9]指出作物冠层 NDVI 和水分指数(WI)是区分盐碱土和非盐碱土的最有效的光谱指数。Penuelas 等^[10]在研究盐碱化对不同品种大麦影响时指出,盐碱化程度加重使作物在近红外波段反射率降

收稿日期:2011-04-15

修回日期:2011-06-30

资助项目:国家自然科学基金项目“基于土壤与作物光谱特征的龟裂碱土盐碱化信息预测”(41001129);宁夏回族自治区自然科学基金“基于作物光谱特征的龟裂碱土盐碱化程度反演研究”(NZ0909)

作者简介:张俊华(1977—),女(汉族),宁夏回族自治区中卫市人,博士,副研究员,主要研究数字农业和废弃物资源化利用。E-mail: zhangjunhua728@163.com。

低,可见光反射率升高,作物的 NDVI、生物量和产量都降低,并指出冠层 NDVI 是估测土壤盐碱化水平的有效指标。Lee 等^[11]提出 NDVI, RVI 和胁迫指数来估测作物受土壤盐碱化产生的影响。Fernandez—Buces 等^[12]根据 NDVI 计算出的一个复合光谱响应植被指数 COSRI 与土壤 SAR, EC 和 pH 值都有较好的相关关系。国内也有研究表明^[13-15],通过航空或遥感影像提取的 NDVI 与土壤盐碱信息有较好的相关性,这都为盐碱胁迫条件下通过作物冠层反射光谱来准确估测土壤盐碱化程度提供了有利依据。以上大多数工作都是定性研究了盐碱化土壤光谱特征与非盐碱化土壤的区别,定量分析光谱特征与全盐含量关系的研究还不多见,光谱特征与盐分的量化关系研究更少。本研究选择盐碱化土壤为研究对象,研究其盐碱化指标与上覆植被(水稻)冠层光谱的耦合关系,进而构建龟裂碱土盐碱化程度的反演模型,为快速、廉价预报土壤的盐碱化信息提供依据。研究成果能够为当地提高耕地质量、增加耕地面积、增加农民收入服务,也可以为土壤盐碱化程度的预报提供科学方法和参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验地点 试验设在宁夏回族自治区银北地区西大滩,位于贺兰山东麓洪积扇边缘,属于黄河中上游灌溉地区(106°24′209″E, 38°50′289″N),该地区属干旱的暖温带季风气候。年平均降水量为 205 mm,年蒸发量 1 875 mm。地下水埋深一般在 1.5 m 左右。

1.1.2 试验材料 水稻品种为 D10。2009 年 5 月 10 日插秧,2009 年 10 月 18 日收获;2010 年 5 月 24 日插秧,2010 年 10 月 29 日收获。

1.2 光谱数据的测量及其它指标的测定

试验选择了水稻返青期(2009 年 5 月 29 日,2010 年 6 月 11 日)、分蘖期(2009 年 6 月 29 日,2010 年 7 月 16 日)、拔节期(2009 年 7 月 23 日,2010 年 8 月 5 日)孕穗期(2009 年 8 月 5 日,2010 年 8 月 17 日)和乳熟期(2009 年 9 月 18 日,2010 年 10 月 7 日)等关键生育期进行测定,采用便携式植物光谱仪(Greenseeker)测定作物冠层光谱。该仪器由美国 NTech 公司生产,具有两个直接向上的光电二极管传感器,可以接收通过装有红光(Red,波段为 671±6 nm)和近红外(NIR,波段为 780±6 nm)干涉过滤器

的入射光,该仪器还有两个向下的光电二极管传感器,它和向上的传感器一样可以接收通过平行和干涉过滤器的光线。NDVI 值和 RVI 的计算公式为:

$$NDVI = \frac{(NIR_{ref}/NIR_{inc}) - (Red_{ref}/Red_{inc})}{(NIR_{ref}/NIR_{inc}) + (Red_{ref}/Red_{inc})} \quad (1)$$

$$RVI = \frac{NIR_{ref}/NIR_{inc}}{Red_{ref}/Red_{inc}} \quad (2)$$

式中: NIR_{ref} , Red_{ref} ——近红外和红光区的反射率; NIR_{inc} , Red_{inc} ——近红外和红光区的入射率。

测定选择在晴朗无云的天气,测量时间为 10:00—14:00,测量时传感器探头向下,距冠层垂直高度 0.5 m。该仪器测试视场角为 3.4°,测定植被指数的速度为 10 个/s,每个处理光谱测量重复两次。沿着每两行水稻行间距前进进行整个处理的光谱扫描测定。与光谱测量同步,将每个处理分为 4 块,采用多点法(每块选 9 个点)取表层 0—20 cm 土壤样品混合为一个土样,则每个处理为 4 个土样。风干过筛测定土壤全盐、EC 和分盐^[16]。

2 结果与讨论

2.1 水稻不同生育期 NDVI 和土壤盐分的变化

作物冠层 NDVI 随着水稻生长期的推移逐渐增大,在孕穗期达到最大值,然后开始下降,到乳熟期冠层 NDVI 甚至低于拔节期。从图 1 可以看出,水稻生长初期冠层 NDVI 标准差较大,至孕穗期和乳熟期长势基本稳定,其 NDVI 值的标准差也变小。土壤全盐含量在水稻返青期最大(平均为 0.53 g/kg),随着水稻生育期的推移,持续的灌水排水,全盐含量逐渐下降,到乳熟期降至 0.26 g/kg,土壤 EC 变化趋势和全盐相同。

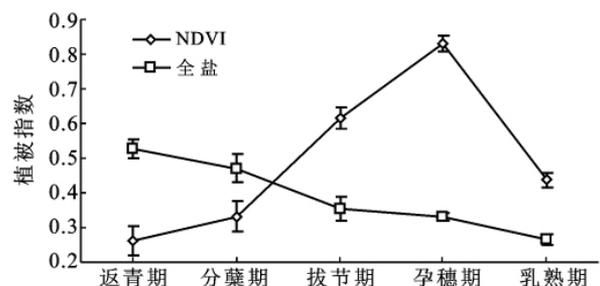


图 1 不同生育期水稻冠层 NDVI 和全盐变化

2.2 不同生育期水稻冠层 NDVI 与土壤盐分指标之间的关系

2.2.1 返青期 表 1 列出了 2009 年和 2010 年水稻返青期冠层 NDVI 对土壤全盐、EC 和分盐之间的拟

合关系。由表 1 可以看出,返青期水稻 NDVI 与土壤全盐和 EC 呈显著负相关关系,二者相关系数基本持平,且都以幂函数形式拟合准确度较高;NDVI 与土壤 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 CO_3^{2-} 的相关性次之,但未达到显著水平,与 HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关性很差。土壤盐分在水稻返青期含量相对较高,但由于

是水稻生长初期,秧苗很小,其冠层 NDVI 值还不能准确反映出水稻生长状况,所以该指数与土壤盐分相关性较差。此外,该土壤中离子以 Na^+ , CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 为主, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量很少,所以水稻冠层 NDVI 与这几种离子的含量基本无相关性。

表 1 返青期水稻冠层 NDVI 对土壤盐分信息的拟合方程

拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
$y_{\text{TS}} = 0.575e^{-0.981x}$	0.333*	$y_{\text{EC}} = 10.528e^{-1.287x}$	0.332*
$y_{\text{CO}_3^{2-}} = -0.005x^2 + 0.281x + 0.284$	0.226	$y_{\text{HCO}_3^-} = -2.729x^2 - 0.302x + 1.639$	0.009
$y_{\text{Cl}^-} = -8.687x^2 - 2.336x + 2.881$	0.110	$y_{\text{SO}_4^{2-}} = -24.725x^2 + 5.946x + 2.718$	0.013
$y_{\text{Ca}^{2+}} = -8.293x^2 + 2.282x + 0.083$	0.044	$y_{\text{Mg}^{2+}} = 13.805x^2 - 4.409x + 1.077$	0.034
$y_{\text{Na}^+ + \text{K}^+} = 36.084x^2 - 19.489x + 11.046$	0.234	—	—

注:样本数 $n=40$; * 表示在 $\alpha_{0.05}=0.304$ 达到显著水平; ** 表示在 $\alpha_{0.01}=0.393$ 达到极显著水平。下同。

2.2.2 分蘖期 从表 2 可以看出,分蘖期水稻 NDVI 与土壤全盐、EC 和分盐的相关性普遍较返青期有所提高,其中与全盐,EC, CO_3^{2-} , Cl^- 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的相关性达到极显著水平,与 EC 的相关性最佳,与全盐含量相关性次之。水稻分蘖期 NDVI 与土壤 CO_3^{2-} 之间用幂函数形式拟合相关系数最大,其它盐分指标

则用二项式方程拟合较为理想。NDVI 与 HCO_3^- 相关性也较好,但未达到显著水平,与 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 无相关性。

2.2.3 拔节期 拔节期水稻 NDVI 与土壤全盐、EC 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的相关性较分蘖期进一步增加,但与 CO_3^{2-} , Cl^- 等离子表现出无相关性(表 3)。

表 2 分蘖期水稻冠层 NDVI 对土壤盐分信息的拟合方程

拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
$y_{\text{TS}} = 0.517x^2 - 1.122x + 0.743$	0.587**	$y_{\text{EC}} = 23.129x^2 - 35.765x + 16.339$	0.596**
$y_{\text{CO}_3^{2-}} = 5.545e^{-1.883x}$	0.535**	$y_{\text{HCO}_3^-} = 0.745x^2 - 2.094x + 1.847$	0.272
$y_{\text{Cl}^-} = 2.846x^2 - 7.515x + 3.790$	0.530**	$y_{\text{SO}_4^{2-}} = -21.235x^2 + 12.425x + 0.904$	0.120
$y_{\text{Ca}^{2+}} = -0.265x^2 + 0.188x + 0.038$	0.440**	$y_{\text{Mg}^{2+}} = -42.814x^2 + 22.353x - 1.890$	0.066
$y_{\text{Na}^+ + \text{K}^+} = 24.277x^2 - 30.273x + 15.743$	0.589**	—	—

表 3 拔节期水稻冠层 NDVI 对土壤盐分信息的拟合方程

拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
$y_{\text{TS}} = 6.266x^2 - 6.660x + 2.067$	0.681**	$y_{\text{EC}} = 80.235x^2 - 102.750x + 35.506$	0.712**
$y_{\text{CO}_3^{2-}} = -26.251x^2 + 23.041x - 3.098$	0.005	$y_{\text{HCO}_3^-} = 38.052x^2 - 39.625x + 11.374$	0.089
$y_{\text{Cl}^-} = -3.854x^2 - 5.481x + 4.813$	0.085	$y_{\text{SO}_4^{2-}} = 14.436x^2 - 21.022x + 9.000$	0.043
$y_{\text{Ca}^{2+}} = 3.562x^2 - 5.022x + 1.741$	0.061	$y_{\text{Mg}^{2+}} = -10.935x^2 + 12.086x - 2.385$	0.029
$y_{\text{Na}^+ + \text{K}^+} = 49.654x^2 - 59.308x + 23.499$	0.606**	—	—

2.2.4 孕穗期 孕穗期水稻 NDVI 与土壤全盐、EC 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的相关性达到整个生育期的最高值(相关系数平均为 0.709 5)。但与其它离子无相关性或相关性很差。孕穗期是水稻长势最旺盛的时期,土壤盐分胁迫水稻生长,其长势的差异性在孕穗期最明显,所以冠层光谱指数可以较好地反映土壤盐分含量(表 4)。

2.2.5 乳熟期 乳熟期水稻 NDVI 与土壤全盐、EC 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 之间仍为极显著相关,但相关系数低于孕穗期(平均为 0.651 7),与 Cl^- 相关关系也达到极显著水平,其次为 SO_4^{2-} ,但未达到显著水平。该时期土壤盐分经过大半个生育期的淋洗含量很低,而且该时期水稻长势基本稳定,盐分对其影响较小,因此冠层光谱与土壤盐分指标之间的相关性下降(表 5)。

表 4 孕穗期水稻冠层 NDVI 对土壤盐分信息的拟合方程

拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
$y_{TS} = 4.820x^2 - 8.187x + 3.713$	0.770**	$y_{EC} = 3296.500e^{-9.073x}$	0.745**
$y_{CO_3^{2-}} = -32.745x^2 + 49.234x - 6.692$	0.0284	$y_{HCO_3^-} = 9.146x^2 - 17.503x + 9.309$	0.041
$y_{Cl^-} = 59.114x^2 - 98.873x + 41.965$	0.217	$y_{SO_4^{2-}} = 129.320x^2 - 205.34x + 82.965$	0.248
$y_{Ca^{2+}} = 0.433x^2 - 2.570x + 1.887$	0.079	$y_{Mg^{2+}} = 17.914x^2 - 22.998x + 7.946$	0.067
$y_{Na^+ + K^+} = 86.178x^2 - 146.880x + 67.333$	0.609**	—	—

表 5 乳熟期水稻冠层 NDVI 对土壤盐分信息的拟合方程

拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
$y_{TS} = 17.897x^2 - 18.224x + 4.801$	0.581**	$y_{EC} = 305.360x^2 - 323.040x + 87.836$	0.619**
$y_{CO_3^{2-}} = 132.510x^2 - 122.170x + 28.639$	0.126	$y_{HCO_3^-} = 0.217x^2 - 4.439x + 1.801$	0.014
$y_{Cl^-} = 118.900x^2 - 123.780x + 32.502$	0.363*	$y_{SO_4^{2-}} = 102.830x^2 - 108.340x + 29.214$	0.263
$y_{Ca^{2+}} = 8.142x^2 - 9.733x + 2.984$	0.089	$y_{Mg^{2+}} = -31.116x^2 + 30.601x - 6.993$	0.023
$y_{Na^+ + K^+} = 399.960x^2 - 391.200x + 98.114$	0.465**	—	—

3 结论

土壤盐碱化是指易溶性盐分在土壤表层积累的现象或过程,主要发生在干旱、半干旱和半湿润地区。一般高土壤盐分会造成植物细胞脱水、植物生长减缓、产量降低、严重地会导致植物死亡。为了适应土壤盐分胁迫,植物往往会改变自身属性,如叶变多肉汁、颜色变暗绿等。这些差别往往会夸大植物在某些光谱区域的光谱响应,因而可以利用植被光谱信息来推断下覆土壤盐碱化程度。Dehaan 和 Leone 等^[17-18]指出,虽然植被覆盖会改变土壤的光谱响应,但它的确实是一个很好的盐渍化程度间接指标。通过本试验也发现,水稻全生育期冠层 NDVI 与土壤全盐、EC 呈显著或极显著相关;而且从返青期到孕穗期相关性逐渐增强,孕穗期相关性达到最强,与 Delfine 和 Farifteh 等研究结论一致^[6,19],到乳熟期开始下降。 Na^+ 和 K^+ 是盐化土壤盐分的重要组分,所以水稻冠层 NDVI 与土壤 $Na^+ + K^+$ 呈极显著相关关系(除返青期外)。此外,本研究证明整个生育期水稻冠层 NDVI 与土壤 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关性不稳定或普遍很差,故根据冠层 NDVI 不能准确估测土壤中的 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。通过 2 a 的试验可以看出,从拔节期到乳熟期,通过上覆植被的冠层植被指数可以较准确地估测土壤的土壤全盐和 EC, $Na^+ + K^+$ 。由于盐碱地水盐运动随着时空的变化而变化,而且作物种植时空条件和气候的不同,都会影响到拟合的精度,所以本研究建立的拟合方程还有待于进一步验证。

试验区位于宁夏回族自治区贺兰山东麓洪积扇边缘,属于黄河中上游灌溉地区,地势平缓低洼,一般地下水埋深 1.5 m 左右,地下水主要含硫酸盐、氯化

物,并且普遍含有苏打。土壤碱化度 15%~60%,pH 值 8.0~10.4,全盐 2.5~6.5 g/kg,盐分类型主要有 $NaCl$ 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 。该地区大面积种植水稻,如果通过作物冠层来估测土壤盐碱化程度,将对该地区的盐碱地预测与合理利用都具有重大意义。

[参 考 文 献]

- [1] Mettemicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85:1-20.
- [2] 亢庆. 土地退化评价中土壤因子的遥感信息提取研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2006.
- [3] Leone A P, Menenti M, Buondonno A, et al. A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89:39-48.
- [4] Clercq D, Meirvinne W P, Fey M V, et al. Prediction of the soil-depth salinity-trend in a vineyard after sustained irrigation with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96:395-404.
- [5] Howari F M, Goodell P C, Miyamoto S. Spectral properties of salt crusts formed on saline soils[J]. J. Environ. Qual., 2002, 31:1453-1461.
- [6] Delfine S, Alvino A, Zacchini M, et al. Consequences of salt stress on conductance to CO_2 diffusion, Rubicon characteristics and anatomy of spinach leaves[J]. Aust. J. Plant Physiol., 1998, 25:395-402.
- [7] Penuelas J, Iala R, Filella I, et al. Visible and near infrared reflectance assessment of salinity effects on barley[J]. Crop Sci., 1997, 37:198-202.
- [8] Susan L U, Phillip G V, Shawn C K, et al. Remote sensing of biological soil crust under simulated climate change manipulations in the Mojave Desert[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113:317-328.

(下转第 120 页)

坡体随之似“散粒体”一样溃散、滑动下来,形成滑坡。

(3) 溃滑—震动堆积阶段。滑体冲过郑家沟,受到迎面山体的强力阻挡,逆冲爬高约 50 m 后,表部惯性极大的松散岩土体快速折返并震动堆积、荡平,余势不减的碎屑流汇入字库河,向下游流动,受到下部滑坡堆积体停留下来形成碎屑流堆积区。

4 结论

(1) 通过对新坪村滑坡现场的调查,对强震作用下横向坡失稳模式及溃滑运动、碎屑流堆积有了初步认识,研究认为横向坡失稳与滑坡堆积是在地震过程中的极短时间内一次性完成的。

(2) 新坪村横向坡坡体为结构面发育,岩体破碎,三面临空孤立单薄山脊,距发震断层仅 700 m,在地震过程中突兀山体对地震波有放大作用,碎裂岩体在地震波的作用下极易震裂、松弛、摩阻力急剧降低导致山体大规模失稳。

(3) 新坪村滑坡为破碎散体结构,失稳模式为拉裂溃滑型,形成动力过程可概括为:强震长持时作用下,坡体的振动溃裂,在坡体后部形成陡峻、贯通的后缘拉裂面,同时,坡体下部也因垂向和水平向的震动而产生张剪性破坏,从而形成统一滑面,溃裂的坡体随之似“散粒体”一样高速溃散、滑动下来。

[参 考 文 献]

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡触发特征研究[J]. 工程地质学报, 2009, 16(4): 433-444.
- [2] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [3] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730-741.
- [4] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 725-736.
- [5] 黄润秋. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 131-132.
- [6] 四川省地质矿产局 川西北地质大队九队. 中华人民共和国地质图说明书(比例尺: 1: 50 000)(南坝幅)[R]. 四川 成都: 四川省矿产资源开发局, 1993.
- [7] 张倬元 王士天 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [8] 许强, 黄润秋. 5·12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721-729.
- [9] 李秀珍, 孔纪名, 邓红艳, 等. “5·12”汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 72-77.
- [10] 孙萍, 汪发武, 殷跃平, 等. 汶川地震高速远程滑坡机制实验研究[J]. 地震地质, 2010 32(1): 98-105.
- [11] Delfine S, Alvino A, Zacchini M, et al. Consequences of salt stress on conductance to CO₂ diffusion, Rubisco characteristics and anatomy of spinach leaves[J]. Aust. J. Plant Physiol., 1998, 25: 395-402.
- [12] Penuelas J, Isla R, Filella I, et al. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley[J]. Crop Sci., 1997, 37: 198-202.
- [13] Lee G, Robert N, Carrow R R D. Photosynthetic responses to salinity stress of halophytic sea shore paspalum ecotypes[J]. Plant Science, 2004, 166: 1417-1425.
- [14] Fernandez B N, Siebea C, Cramb S, et al. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 644-667.
- [15] 扶卿华, 倪绍祥, 王世新, 等. 土壤盐分含量的遥感反演研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 48-54.
- [16] 李民赞. 基于可见光光谱分析的土壤参数分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 36-41.
- [17] 许迪, 王少丽. 利用 NDVI 指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. Remote Sens. Envir., 2002, 80: 406-417.
- [20] Leone A P, Menenti M, Buondonno A, et al. A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89: 39-48.
- [21] Farifteh J, Meer F, Meijde M A. Spectral characteristics of salt-affected soils: A laboratory experiment[J]. Geoderma, 2008, 145: 196-206.

(上接第 117 页)