

污水灌溉区土壤镉的高光谱遥感监测研究

肖捷颖, 王燕, 赵文霞

(河北科技大学 环境科学与工程学院 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 以石家庄多年污水灌溉区为对象, 通过对污灌土壤的可见-近红外波段光谱信息进行测量和处理, 利用相关分析和多元逐步回归分析, 建立土壤镉含量与反射光谱变量之间的回归模型。结果表明, 土壤镉在研究区土壤中有一定程度的积累, 镉含量与其原始光谱、倒数对数光谱在多数光谱波段达到极显著相关水平, 与连续统去除光谱相关性不显著。逐步回归模型中, 倒数对数模型拟合精度最高, 均方根误差为 0.020, 预测精度达到 92.71%, 说明倒数对数光谱变量模型可有效预测土壤镉含量, 是估算研究区土壤镉含量较理想的预测模型。

关键词: 污水灌溉; 高光谱; 土壤镉含量; 相关分析; 逐步回归

中图分类号: X833; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0062-05

Study on Soil Cd Monitoring in Sewage Irrigation Area by Hyperspectral Remote Sensing

XIAO Jie ying, WANG Yan, ZHAO Wen xia

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: The visible near infrared spectrum curves of soil samples were collected from the sewage irrigation area in Shijiazhuang, and the regression models between soil Cd content and different spectral variables were developed using the correlation analysis and multivariate stepwise regression analysis. The results showed that cadmium has accumulated to some extent in the soil and exceeded the background value during the last 50 years of sewage irrigation, and the soil cadmium content was significantly related to the original spectrum and inverse log spectrum in some bands, while had insignificant correlation with the continuum removal spectrum. Among the regression models, the inverse log spectral model had the highest fitting accuracy with a root mean square error of 0.020 and prediction precision of 92.71%, which indicated that the inverse log spectral variable model can predict the soil Cd content effectively in the study area.

Key words: sewage irrigation; hyperspectral; soil Cd content; correlation analysis; stepwise regression

1 研究背景

合理的污水灌溉既能满足农业对水的部分需要, 又可缓解水资源短缺问题^[1]。但直接地长期利用未经处理的污水灌溉会造成土壤、地下水的严重污染, 导致土壤板结和土壤结构与功能失调、重金属和有毒物质的积累、作物生长发育不良、农产品品质变差等一系列问题。污染物被作物吸收后通过食物链, 危害人体健康。特别是重金属类有毒有害物质, 危害极大, 世界八大公害之一的“骨痛病”事件就因镉污染引起^[2-3]。因此, 污水灌溉引起的农田土壤重金属污染问题已受到研究者、政府及社会的广泛关注。

传统土壤重金属污染监测方法能取得很好的测量精度,

但耗时费力, 效率低, 且只能对若干采样点和剖面进行观测, 大范围周期性监测能力有限、效率低^[4]。高光谱遥感技术的发展为快速获取土壤重金属元素信息提供了新的途径^[5]。有研究表明^[6-7], 根据土壤有机质、铁锰氧化物以及黏土矿物对土壤重金属的吸附或赋存关系, 利用土壤反射光谱可定量研究土壤重金属含量, 部分学者^[8-12]基于近-中红外、可见-近红外及土壤反射光谱实现了土壤 Cd、Cu、Ni、Zn、As、Hg、Pb、Fe、Cr、Co 等元素的多元回归分析、PCR 及 PLSR 分析, 证明了上述方法的可行性。不过, 高光谱遥感技术的研究区域多集中于污染较重的矿区, 而针对污灌区重金属污染的遥感监测研究少见报道。本研究通过对石家庄多年污灌区农田进行土壤采样、重金属分析和光谱测量, 运用相关分

收稿日期: 2012-12-08 修回日期: 2013-05-03 网络出版时间: 2013-07-28
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.033.html>

基金项目: 河北省自然科学基金(D2010000867); 河北省高校重点学科建设项目资助

作者简介: 肖捷颖(1970), 女, 河北涿州人, 副教授, 博士, 主要从事遥感应用研究。E-mail: xiaojieying@gmail.com

通讯作者: 王燕(1987), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属的遥感反演研究。E-mail: wangyan0720@163.com

析和多元逐步回归方法开展对土壤镉污染的遥感监测方法研究,探讨高光谱遥感技术反演土壤重金属的可行性,以期为大面积监测土壤重金属含量提供理论支持。

2 数据与方法

2.1 研究区介绍

研究区为石家庄市多年污灌区(图1),地处河北省中南部,属太行山东麓山前平原的滹沱河冲积扇。区内土壤类型以潮褐土为主。区内土壤有机质和氮素含量中等偏缺,磷素含量缺乏,钾元素含量比较丰富。该区污水灌溉已有50多年的历史,污水主要来源于市区及附近郊县生活、工业混合污水,经过处理的和未经处理的工业污水等。多年污水灌溉的积累以及农药、化肥的过量使用,导致了研究区表层土壤重金属的积累^[13-14]。

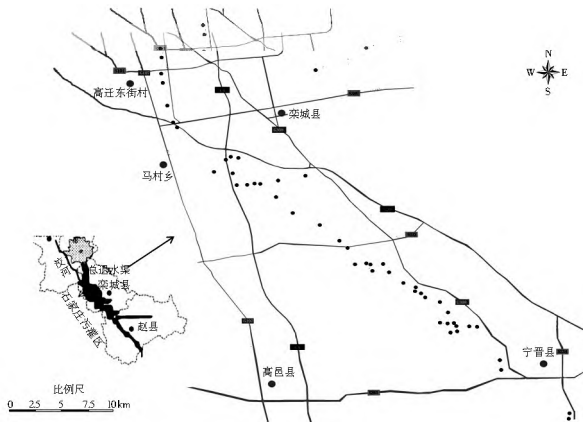


图1 研究区及样点示意图

Fig. 1 Study area and sampling locations

2.2 土壤样品的采集与预处理

2012年5月,在实地采集了污水灌溉农田表层(0~20 cm)土壤样品共49个,采样点分布见图1。采用S型布点法,每个土壤样品由3~5个样点组成。土样经自然风干、磨碎,过100目筛。每个样品分成两份,一份用于光谱测量,一份用于化学分析。

2.3 土壤镉含量测定与评价

土壤镉含量的测定在河北省分析测试研究中心进行,土样经硝酸-盐酸消解,火焰原子吸收光谱仪测定。分析过程中通过土壤成分分析标准物质(GSS 13)进行质量控制,使用去离子水,试剂均为优级纯。

表层土壤镉污染程度评价采用单因子指数法,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S \quad (1)$$

式中: P_i 为污染物单因子指数; C_i 为重金属元素实测值; S 为污染物评价标准或背景值。

2.4 土壤光谱特征测定

对土壤反射光谱的测量,使用的是日本EKO公司生产的MS 720便携式光谱辐射计,仪器波长范围为350~1050 nm,光谱采样间隔和分辨率为3.3 nm和10 nm。室外光谱测定使用的光源为太阳光。选择阳光充足的10:00-14:00完成光谱采集,光谱仪探头设定为90°视场,探测器头部垂直

对准样品,距离约10 cm,保证土壤充满探测视场,每个土样测5条光谱曲线经算术平均后作为该土样的实际反射光谱数据。

2.5 土壤光谱预处理

土壤光谱预处理可消减光谱中随机因素产生的误差,消除背景噪声、增强相似光谱之间的差异、突出光谱特征值,提高土壤光谱对重金属含量的响应能力、回归模型的稳定性和预测能力^[4,15]。本文采用一阶微分、光谱倒数对数和连续统去除法对原始反射光谱进行处理。对光谱曲线作微分变换,可消除基线漂移或平缓背景干扰的影响,还能对重叠混合光谱进行分解识别,扩大样品之间的光谱特征差异,提高分辨率和灵敏度,在光谱化学和高光谱遥感研究中都有很好的应用^[5,16]。一阶微分计算公式如下:

$$R'(\lambda) = [R(\lambda_{+1}) - R(\lambda_{-1})] / (\lambda_{+1} - \lambda_{-1}) \quad (2)$$

式中: λ_{+1} 、 λ 、 λ_{-1} 为相邻波长; $R'(\lambda)$ 为波长 λ 一阶微分光谱。

光谱反射率经倒数对数变换,可增强可见光区光谱差异,而且减少因光照条件变化引起的乘性因素影响^[16,17]。连续统去除可有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将反射率归一化到0~1之间,光谱的吸收特征也归一化到一致背景上,有利于光谱曲线之间特征波段的比较,从而提取特征波段^[18-19]。

2.6 数据分析方法

在进行数据分析时,分别利用Unscramber软件对土壤光谱进行微分及倒数对数处理,利用ENVI^[11]对光谱曲线进行连续统去除分析来获得土壤光谱的特征吸收带,使用SPSS软件计算土壤镉含量与不同光谱变量之间的相关系数。在分析相关性的基础上,采用多元逐步回归方法建立镉含量与光谱变量之间的关系模型并进行验证。模型稳定性采用决定系数 R^2 判定,反演能力采用均方根误差RMSE来评价,较高的判定系数和较小的均方根误差表明该模型具有良好的稳定性和精度。

3 结果与分析

3.1 镉含量分析与评价

对49个土样镉含量进行了统计分析,结果见表1。根据《土壤环境质量标准》(GB 15628 1995)二级标准,当土壤pH值<7.5时,土壤镉允许含量为0.60 mg/kg,污灌区镉含量未超过二级标准。以《中国土壤元素背景值》^[20]中镉元素背景值(0.094 mg/kg)为评价标准,利用单因子指数法对49个表层土壤样点镉元素污染程度进行评价,见表2。该区土壤镉已有一定程度的积累,81.63%的样品中镉含量超过背景值,最高单因子污染指数达3.07,平均污染指数为1.46,在沿总退水渠和洺河两岸形成了一定的污染区。

表1 土壤镉含量的统计结果

Table 1 Statistical results of soil Cd content

元素	最小值 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	均值 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差	标准 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
镉	0.064	0.289	0.137	0.066	0.60

表 2 土壤重金属镉污染指数统计分析

Table 2 Descriptive statistics of heavy metal Cd pollution index

项目	最小值	最大值	均值	标准偏差	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$P_i > 3$
P_{-Cd}	0.681	3.074	1.510	0.705	20.41	71.43	6.12	2.04

3.2 光谱特征分析

所有样品的土壤反射光谱曲线(图 2)形态大致相同,近似平行;在整个光谱波段,光谱反射率斜率均较大,特征吸收带出现的波段位置基本一致;由于土壤成分的含量不同,导致特征波段反射率大小不同。图 3 显示采用连续统去除法获得土样的主要吸收波段位置,明显的吸收带分别位于 450 nm、480 nm、600 nm、720 nm、850 nm 和 950 nm 附近。

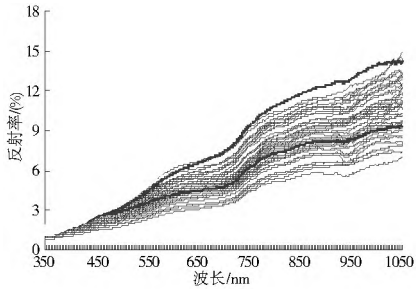


图 2 土壤样品的反射光谱曲线

Fig. 2 Reflectance spectral curves of soil samples

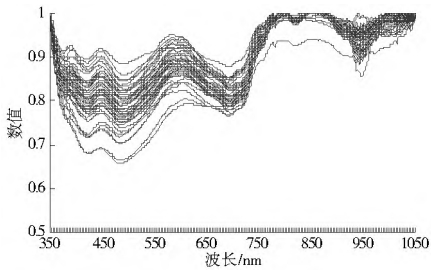


图 3 连续统去除光谱曲线

Fig. 3 Continuum removed spectral curves of soil samples

3.3 镉含量与光谱变量相关分析

利用 SPSS 软件依次将原始光谱、一阶微分光谱、倒数对数光谱、连续统去除光谱与镉含量进行相关分析,得到相关系数曲线,见图 4。原始光谱、倒数对数光谱与镉含量在多数

光谱波段都达到极显著相关,相关系数曲线形状接近但趋势相反,说明镉对这两个反射光谱变量的贡献率相反,最大相关性均出现在 728 nm 处($r_{原始} = 0.704$, $r_{倒数对数} = -0.680$),基本位于 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的特征吸收区域^[21]。光谱经一阶微分转换后,除光谱波段两端区域外,与镉的相关性均达到显著水平,可能是因为波段测试范围两头光谱数据不稳定;500 nm 附近波段的相关性增强,对应铁锰氧化物的特征吸收区^[7];最高相关波段为 637 nm ($r = 0.719$),是土壤有机质典型的反射峰^[4]。而经连续统去除后光谱与镉含量相关水平总体偏低,但在 700 nm 附近相关水平显著,在 726 nm ($r = 0.560$) 处最高,是铁锰氧化物特征吸收光谱区域。

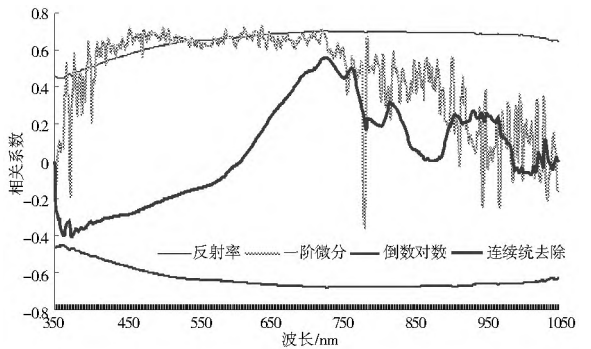


图 4 土壤镉含量与土壤光谱的相关系数曲线

Fig. 4 Correlation coefficient curves between soil Cd content and spectral reflectance

Cd content and spectral reflectance

3.4 镉含量多元逐步回归模型的建立与检验

逐步回归法是多元线性回归中选择回归变量的常用方法,已广泛用于实测光谱分析地表物质的研究^[21-22]。本文在分析光谱变量与镉含量相关性并结合光谱特征吸收区域基础上,建立镉含量与不同光谱变量之间的逐步回归模型。将 49 个样本分为两组,一组 33 个样本用于回归模型建立,另一组 16 个用于模型精度检验。分别将原始反射率、一阶微分、倒数对数、连续统去除 4 个光谱指标波段作为自变量,土壤镉含量实测值作为因变量,进行逐步回归分析。 F 显著水平值为评价依据,选入和剔除自变量的概率参数为 0.05 和 0.10,见表 3。

表 3 土壤镉逐步回归光谱模型

Table 3 Spectral model of stepwise regression for soil Cd prediction

光谱变量	模型	回归系数	F 统计量	均方根误差	平均相对误差 (%)
原始光谱	$Y = -0.02 + 9.443X_{930} - 6.781X_{1025}$	0.631	17.650	0.025	8.072
一阶微分	$Y = 0.06 + 2527.968X_{454} - 454.463X_{736}$	0.502	24.418	0.042	13.483
倒数对数	$Y = 0.498 + 443X_{930} - 0.349X_{904}$	0.637	25.906	0.020	7.290
连续统去除	$Y = -0.799 + 1.105X_{725}$	0.313	12.206	0.026	15.003

注: Y 为土壤重金属含量; X_{454} 、 X_{725} 、 X_{736} 、 X_{904} 、 X_{930} 、 X_{1025} 表示拟合波段的波长位置。

根据回归系数和 F 统计量最高、均方根误差最小的原则,选择土壤重金属镉的高光谱遥感最佳回归模型。结果表明倒数对数光谱变量建立的回归模型最佳,主要是因为反射率经倒数对数变化后,不仅增强了可见光区的光谱差异,而且减少了由于光照条件等变化引起的随机因素影响,提高了模型精度。图 5 为检验样本镉含量实测值和预测值关系图,横坐标是实测值,纵坐标为回归模型预测值。样点越接近

1:1 线,模型反演值越接近实测值。倒数对数光谱变量模型预测值和实测值最接近,均方根误差为 0.020,平均相对误差为 7.29%,精度达到 92.71%,而原始反射率、一阶微分和连续统去除模型的平均相对误差分别为 8.07%、13.48% 和 10.03%,精度分别为 91.93%、86.52% 和 84.97%。模型预测的精度还有待提高,但倒数对数模型的预测精度高于其它光谱变量模型,具有较好的应用潜力。

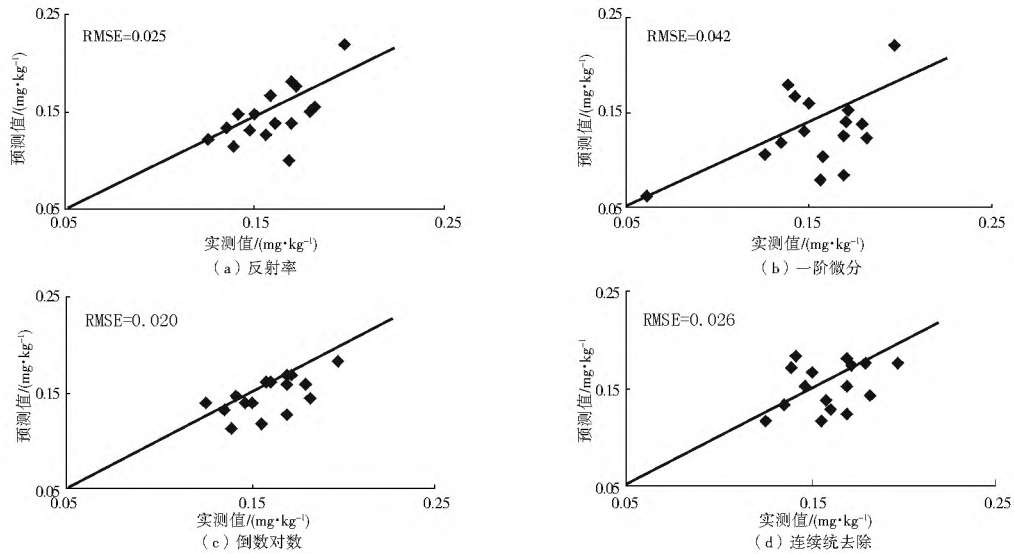


图5 土壤镉含量实测值与预测值的散点图

Fig. 5 The scatter plots of measured and predicted soil Cd contents

4 结论与讨论

采样点土壤镉已有一定程度的积累,超过 80% 土样镉含量超过土壤背景值,最高单因子污染指数达 3.07,平均污染指数为 1.46,表明土壤镉在总退水渠和洨河沿岸形成污染,这与已有研究结果^[13]一致。根据镉与不同光谱变量之间的相关性,利用多元逐步回归分别建立镉含量与光谱变量之间的模型并进行检验。结果表明,土壤镉含量与原始光谱、倒数对数光谱在多数光谱波段都达到极显著相关,与连续统去除光谱的相关水平总体偏低。倒数对数模型的精度最高,均方根误差为 0.020,预测精度达到 92.71%,说明在 930 nm 和 904 nm 处倒数对数模型可有效反演土壤镉含量,是估算石家庄污灌区土壤镉含量较理想的光谱指标。

土壤镉含量与其倒数对数光谱变量之间存在较高的相关性,表明高光谱遥感方法可实现对土壤镉污染的定量监测评估。因土壤高度异质性特点,需要针对不同土壤类型、不同重金属污染类型及程度,系统分析土壤反射光谱特征差异,探索其光谱响应机理和响应区间,建立重金属含量的反演模型,以期为利用成像光谱数据监测区域土壤重金属污染提供理论依据。本文仅是基础研究,深度和广度还显不足,未来将进行模型优化及应用和地面高光谱数据与高空遥感数据的匹配和转换研究。

参考文献(References):

[1] 王浩,陈玉松,胡开林,等. 污水灌溉研究综述[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(2): 73-76. (WANG Hao, CHEN Yur song, HU Kai lin, et al. Summary on Wastewater Irrigation[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2007, 20(2): 73-76. (in Chinese))

[2] 张淑丽. 浅析污水灌溉环境污染的研究进展[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(27): 128-129. (ZHANG Shu li. Progress of Study on Environmental Pollution Caused by the Sewage Irrigation[J]. Scitech Information Development & Economy, 2009, 19(27): 128-129. (in Chinese))

[3] 黄春国,王鑫. 我国农田污灌发展现状及其对作物的影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10692-10693. (HUANG Chun guo, WANG Xin. China's Farm land Sewage Irrigation Development and Its Impact on Crop Research[J]. Journal of Anhui Agricultural science, 2009, 37(22): 10692-10693. (in Chinese))

[4] 龚绍琦,王鑫,沈润平,等. 滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 169-177. (GONG Sha o qi, WANG Xin, SHEN Run ping, et al. Study on Heavy Metal Element Content in the Coastal Saline Soil by Hyperspectral Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 169-177. (in Chinese))

[5] 王维,沈润平,吉曹翔. 基于高光谱的土壤重金属铜的反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 348-354. (WANG Wei, SHEN Run ping, JI Cao xiang. Study on Heavy Metal Cu based on Hyperspectral Remote Sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(3): 348-354. (in Chinese))

[6] Wu Y Z, Chen J, Ji J F, et al. A Mechanism Study of Reflectance Spectroscopy for Investigating Heavy Metals in Soil[J]. Sci. Soc. Am. J., 2007, 71: 918-926.

[7] 解宪丽,孙波,郝红涛. 土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 982-992. (XIE Xian li, SUN Bo, HAO Hong tao. Relationship Between Visible Near Infrared Reflectance Spectroscopy And Heavy Metal Of Soil Concentration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 982-992. (in Chinese))

[8] Siebielec G, McCarty G W, Stuczynski T I, et al. Near and Mid Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for Measuring Soil Metal Content[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(6): 2056-2069.

[9] Kemper T, Sommer S. Estimate of Heavy Metal Contamination in Soil after a Mining Accident Using Reflectance Spectroscopy[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(12): 2742-2747.

[10] 任红艳,庄大方,邱冬生,等. 矿区农田土壤砷污染的可见-近红外反射光谱分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1):

- 114-118. (REN Hong yan, ZHUANG Da fang, QIU Dong sheng, et al. Analysis of Visible and Near Infrared Spectra of As Contaminated Soil in Croplands Beside Mines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(1): 114-118. (in Chinese))
- [11] Wu Y Z, Chen J, Ji J F, et al. Feasibility of Reflectance Spectroscopy for the Assessment of Soil Mercury Contamination [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(3): 873-878.
- [12] Ren H Y, Zhuang D F, Singh A N, et al. Estimation of As and Cu Contamination in Agricultural Soils Around a Mining Area by Reflectance Spectroscopy: A Case Study [J]. Pedosphere, 2009, 19(6): 719-726.
- [13] 崔邢涛, 栾文楼, 石少坚, 等. 石家庄污灌区土壤重金属污染现状评价 [J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 38-42. (CUI Xing tao, LUAN Wen lou, SHI Shao jian, et al. Soil Heavy Metal Pollution Assessment in the Sewage Irrigation Region of Shijiazhuang City [J]. Earth And Environment, 2010, 38(1): 38-42. (in Chinese))
- [14] 栾文楼, 温小亚, 崔邢涛, 等. 石家庄污灌区表层土壤中重金属环境地球化学研究 [J]. 中国地质, 2009, 36(2): 465-473. (LUAN Wen lou, WEN Xiao ya, CUI Xing tao, et al. Environmental Geochemistry of Heavy Metals in Surface Soils within Sewage Irrigation Areas of Shijiazhuang City [J]. Geology In China, 2009, 36(2): 465-473. (in Chinese))
- [15] 任红艳. 宝山矿区农田土壤—水稻系统重金属污染的遥感监测 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008. (REN Hong yan. Use of Hyper/Multiple Spectral Data on Monitoring Heavy Metal Pollution in Soil Rice System Near by Baoshan Mines [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘磊, 沈润平, 丁国香. 基于高光谱的土壤有机质含量估算研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 762-766. (LIU Lei, SHEN Run ping, DING Guo xing. Studies on the Estimation of Soil Organic Matter Content Based on Hyper Spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 762-766. (in Chinese))
- [17] 王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 906-912. (WANG Lu, LIN Qi zhong, JIA Dong, et al. Relationship Between Visible Near Infrared Reflectance Spectroscopy and Heavy Metal of Soil Concentration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 11(6): 906-912. (in Chinese))
- [18] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. 利用光谱技术分析北京地区农业土壤重金属光谱特征 [J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 730-734. (LI Shu min, LI Hong, SUN Dan feng, et al. Characteristic and Diagnostic Bands of Heavy Metals in Beijing Agricultural Soils Based on Spectroscopy [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 730-734. (in Chinese))
- [19] 尹业彪, 李霞, 赵钊, 等. 沙质土壤含水率高光谱预测模型建立及分析 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(3): 355-359. (YIN Ye biao, LI Xia, ZHAO Zhao, et al. Predict Model and Analysis of the Sandy Soil Moisture with Hyperspectral [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(3): 355-359. (in Chinese))
- [20] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国科学出版社, 1990: 87-496. (China Environmental Monitoring Master Station. Elemental Background Values of Soils in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 87-496. (in Chinese))
- [21] 徐明星, 吴绍华, 周生路, 等. 重金属含量的高光谱建模反演: 考古土壤中的应用 [J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 109-114. (XU Ming xing, WU Shao hua, ZHOU Sheng lu, et al. Hyperspectral Reflectance Models for Retrieving Heavy Metal Content: Application in the Archaeological Soil [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 109-114. (in Chinese))
- [22] Xie L J, Ying Y B, Ying T J. Rapid Determination of Rthylene Content in Tomatoes Using Visible and Short wave Near infrared Spectroscopy and Wavelength Selection [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2009.

(上接第 55 页)

- [14] WANG Ping, YU Jing jie, Pozdniakov SP, et al. Shallow Groundwater Dynamics and Its Driving Forces in Extremely Arid Areas: A Case Study of the Lower Heihe River in Northwestern China [J]. Hydrological Processes, 2012, DOI: 10.1002/hyp.9682
- [15] WANG Ping, YU Jing jie, ZHANG Yi chi, et al. Groundwater Recharge and Hydrogeochemical Evolution in the Ejina Basin, Northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 72-86.
- [16] 钱云平, 秦大军, 庞忠和, 等. 黑河下游额济纳盆地深层地下水来源的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2006, (3): 25-29. (QIAN Yun ping, QIN Da jun, PANG Zhong he, et al. A Discussion of Recharge Sources of Deep Groundwater in the Ejina Basin in the Lower Reaches of Heihe River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (3): 25-29. (in Chinese))
- [17] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 生态输水影响下地下水化学特征的时空变化分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 734-741. (CHEN Yong jin, CHEN Ya ning, LI Wei hong, et al. Spatial and Temporal Variations of the Groundwater Chemical Characteristics under Ecologic Water Conveyance in the Lower Reaches of Tarim River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 734-741. (in Chinese))
- [18] 武选民, 史生胜, 黎志恒, 等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究 (下) [J]. 水文地质工程地质, 2002, (1): 16-20. (WU Xuan min, SHI Sheng sheng, LI Zhi heng, et al. The Study of Groundwater System in Ejina Basin, Downstream of Heihe River Northwest China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, (1): 16-20. (in Chinese))
- [19] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1299-1304. (CHEN Yong jin, CHEN Ya ning, LI Wei hong, et al. Three Stages of the Groundwater Chemical Properties Reacting on the Intermittent Water Deliveries in Lower Tarim River, China [J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1299-1304. (in Chinese))