

# 神府矿区复垦土地土壤微量元素有效性影响因素研究

武钦萍<sup>1</sup>, 张廷元<sup>2</sup>, 张 洋<sup>3</sup>, 宋 炜<sup>4</sup>

(1. 黄河万家寨水利枢纽有限公司, 太原 030001; 2. 四川省宜汉县林业局, 四川 宜汉 636150;

3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 4. 山东省水利勘测设计院, 济南 250013)

**摘 要:** 为了研究矿区不同复垦条件下, 复垦土地土壤中有效微量元素与土壤环境的关系, 采用实地试验与实验室分析相结合的方法, 研究了不同复垦时间和复垦措施条件下土壤有效铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn) 4 种微量元素有效态含量与土壤环境之间的关系。结果表明, 研究区内土壤有效微量元素含量总体属于极低水平; 土壤环境整体呈碱性, 土壤 pH 值均在 8.5 以上, 且变异系数属于小变异; 土壤有机质无论是在不同恢复年限条件下, 还是在不同治理措施条件下, 其变异系数均属于高度变异。土壤环境与土壤有效微量元素相关关系分析结果表明, 土壤 pH 值与土壤有效微量元素呈负相关关系, 有效锰、有效铜与土壤 pH 值的相关性较高; 土壤有机质与土壤有效微量元素呈正相关关系, 其中有效锌、有效铜与土壤有机质含量的相关性较高。

**关键词:** 有效微量元素; 土壤 pH 值; 总有机碳; 复垦土地

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)05-0153-05

## Research on the Relationship between Soil Environment and Available Trace Elements on Restoration Land in Shenfu Coal Mine Region

WU Qin-ping<sup>1</sup>, ZHANG Ting-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Yang<sup>3</sup>, SONG Wei<sup>4</sup>

(1. Wanjiashai Limited Liability Company of Hydro-junction Engineering, Taiyuan 030001, China;

2. Forestry Bureau of Yihan County, Yihan, Sichuan 636510, China; 3. Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 4. Shandong Survey and Design Institute of Conservancy, Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** Based on field sampling and laboratory analysis, relationships between soil environment and soil available trace element, including Cu, Fe, Mn, and Zn were studied. Results indicated contents of these 4 soil available trace elements were lower generally. Soil pH value was over 8.5, and the variation coefficient belonged to small variability. Variation coefficient of soil total organic carbon(TOC) under different restoration year and management conditions belonged to higher variability. Analysis of soil environment and soil available trace element indicated that negative correlation was existed between soil pH and available trace element, among which coefficients of Mn and Cu were higher. Positive correlation was existed between soil TOC and soil available trace elements, among which coefficients of Zn and Cu were higher.

**Key words:** available trace element; soil pH value; total organic carbon; restoration land

土壤中的微量元素是植物生态环境因子中的重要因子之一<sup>[1-3]</sup>。大量的研究证实, 对植物真正有效的是那些能够被植物吸收的部分, 即元素的生物有效性与其在土壤中的化学存在形态有关<sup>[4-8]</sup>, 因此元素的有效性研究也引起了人们越来越多的重视。元素的生物有效性受多种因素影响, 如 pH、氧化还原条件、质地、有机质、土壤矿物组成、温度等<sup>[9-10]</sup>。Kaba-

ta-Pendias<sup>[10]</sup>总结了不同土壤条件下部分元素的有效性, 认为在氧化条件的酸性土壤中, 许多微量元素, 尤其是 Cd 和 Zn, 容易活动, 具有较强的生物有效性; 而在还原的中性或碱性土壤中, 元素的生物有效性较低。因此无论是微量有益元素还是有害元素, 其生物可利用性并不仅仅取决于总量, 而在更大程度上决定于它们在土壤中的赋存状态以及由土壤固相转入土

收稿日期: 2012-05-22

修回日期: 2012-07-21

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“黄土坡面土壤养分流失特征与控制机理”(2011CB411903); 国家自然科学基金“植被格局对坡沟水蚀过程调控机理研究(41071182)”; 国家科技支撑计划课题“农田水土保持工程与耕作关键技术研究(2011BAD31B01)”

作者简介: 武钦萍(1976—), 女, 宁夏回族自治区石嘴山市人, 主要从事水库水情自动化测报信息与生态环境管理等工作。E-mail: wuqp5166@tom.com

通信作者: 张洋(1986—), 男, 陕西省陇县人, 主要从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail: peace-eternity@163.com

壤溶液的难易程度<sup>[11]</sup>。

在干旱半干旱地区,微量元素研究一直较少。研究人员对新疆<sup>[12]</sup>、甘肃<sup>[11]</sup>等地微量元素分布特征的研究表明,尽管当地微量元素的平均水平与全国相当,但是由于空间变异程度大,耕地土壤中微量元素含量不足。就有效微量元素的空间分布特征来说,绿洲等耕作土壤中的微量元素稍高一些<sup>[13]</sup>;海拔及草地类型等都会对有效微量元素的含量产生影响<sup>[14]</sup>。

本研究以地处生态脆弱区的陕北能源重化工基地为研究对象,采取时间序列与空间序列互代的方法,选取煤炭资源煤矿开发过程中不同复垦时间以及不同复垦措施治理条件下的土地,对其主要土壤环境指标(pH 值、有机质含量)和铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)的有效态进行分析,探讨矿区土地复垦恢复过程中,土壤环境与土壤有效微量元素之间的关系,为开发建设项目土地修复、利用与管理等提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于乌兰木伦河流域,陕西省神木县大柳塔镇境内。当地多年平均气温 8.4℃,多年平均降雨量 434.2 mm,年内分配不均,其中 7—9 月 288.4 mm,占降水的 66.4%,无霜期 130 d。神府东胜煤田一、二期工程主要位于该流域,这里地下煤炭资源虽然丰富,但地表生态环境却很脆弱,区内土地贫瘠,植被稀少,气候干燥,风沙肆虐,水土流失严重。

### 1.2 样品采集与分析

本研究选取神府矿区不同恢复年限和不同矸石场恢复措施的土地,根据调查采样类型分为矿区风沙立地类型区、绿化美化区、排矸场等 4 种类型。在每个样地上,各样方按“S”形多点混合取样法采集土样,采样过程中,用铁锹挖掘剖面,木刀整理剖面后逐层取样。土样带回实验室后进行自然风干,过筛后处理以供分析测定。土壤有效态微量元素含量用 DT-PA 浸提,浸出液中微量元素含量用原子吸收分光光度计进行测定,样地点概况见表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复条件下土壤有效态微量元素分布情况

在土壤科学研究中,可根据土壤性质的变异系数对其变异程度进行分类:变异系数在 0~15%之间的为小变异,16%~35%之间的为中等变异,>36%的为高度变异<sup>[10]</sup>。

对矿区不同恢复条件下土壤有效态微量元素分布情况的分析结果(表 2)表明,不同恢复年限条件下,铁元素的变异系数属于高度变异,铜、锰和锌元素等属于中度变异;而矸石场不同恢复方式条件下,锰元素属于高度变异,铜与铁元素属于中度变异,而锌元素属于小变异。从土壤有效态微量元素丰缺的角度来说,矿区土壤有效态微量元素含量均属于极低水平,需要进一步改善和提高土壤中有效微量元素的含量,也从侧面说明目前矿区复垦土壤中的微量元素处于安全水平,没有对环境造成危害。

表 1 取样点概况

地名	恢复年限	植被
补连塔矿区绿化	恢复 1 a	油松 160 cm 高,株距 2 m;沙棘 250 cm;群落 2 m×1 m;沙蒿 30 cm×10 cm
哈拉沟煤矿	恢复 3 a	黄蒿高 60 cm,5 株/cm <sup>2</sup> ;梨树 1.5 m 行距;沙棘群落 30 cm×40 cm
大柳塔西山	恢复 8 a	主要群落油松、杨树、沙棘,高 70 cm;12 株/cm <sup>2</sup> ,沙蒿 9 株/cm <sup>2</sup>
上湾煤矿建矿初期煤矸场	恢复 13 a	沙棘 1 株,高 89 cm,群落 40 cm×18 cm;沙蒿 7 株,23 cm 高;苜蓿 4 株,5 cm 高;群落 10 cm×5 cm,30,40,50 cm 深处见煤矸石
石圪台 1# 排矸场	人工治理	苜蓿,主群,48 cm 长,群落 30 cm×40 cm。沙蒿 16 株/cm <sup>2</sup> ;土样 50 cm 时见煤矸石。煤矸石,土层混合堆砌,土层覆盖厚度约 0.5~1 m
石圪台 2# 排矸场	封禁治理	苜蓿 5 株,高 3 cm,群落 20 cm×20 cm;三叶草 1 簇,高 8 cm,群落 8 cm×10 cm;茵陈蒿 2 株,高 5 cm;沙蒿 52 株,高 27 cm;土样 50 cm 深时见煤矸石
石圪台 2# 排矸场	未治理/火烧	植被多被烧死。5# 样地未完全封禁治理,有煤矸石排放,土样 10 cm 深时见煤矸石
马家塔露天矿	无措施	该区域为开采矿后的弃置区,无植被覆盖
自然地	原貌对照	沙棘主群 38 cm 高、群落 20 cm×30 cm 蒿沙

对比两种恢复条件下微量元素有效态的含量及变异水平与变化规律可以发现,矸石场不同治理措施对于铜元素、铁元素及锰元素有效态含量的影响,明显大于不同恢复年限条件下的土壤元素含量。变异系数可表示土壤中微量元素含量受人类活动干扰的

程度,由此可以说在矿区土地复垦前期,治理措施对于土壤有效微量元素的影响远大于恢复年限的影响。因此从矿区土地恢复与治理的角度的出发,在矿区土地复垦的前期,应该更加重视选择合理的治理措施以加快土壤环境的恢复与重建。

根据本研究的结果,在情况允许时,矸石堆覆土辅助以合理的灌草植被恢复,可以有效地改善和提高土壤有效微量元素的含量;在条件有限的情况下,采取封禁和适当的人为干预(火烧或者覆土)措施,也能够较大程度上改善和提高土壤有效微量元素的含量。

表 2 矿区不同恢复年限与恢复方式条件下土壤有效态微量元素统计分析

恢复条件		统计指标	铜	铁	锰	锌
不同恢复年限		均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.094	2.244	2.105	0.246
		标准差/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.020	0.980	0.536	0.045
		变异系数/%	21.277	43.672	25.463	18.293
矸石场不同恢复方式		均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.099	1.907	2.309	0.189
		标准差/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.033	0.657	0.923	0.030
		变异系数/%	33.333	34.452	39.974	15.873

2.2 不同恢复条件下土壤环境指标分布特征

对土壤环境特征的分析结果(表 3)表明,就总体而言,研究区的土壤环境呈碱性,pH 值在 8.5 以上。对土壤 pH 值在各土层上的变异系数进行分析可知,无论是在不同恢复年限条件下,还是在不同治理措施条件下,其变异系数均属于小变异。表明在整个研究区,土壤酸碱度的变化幅度不大,基本保持一致,因而其对土壤有效微量元素的影响也是一致的。就土壤 pH 值在不同土层深度的变化趋势可以看出,其随着土层深度的增加而增加,这与土地恢复过程中,在降雨淋溶作用下,土壤中的 Ca,Mg 等离子逐渐向深层运移,造成深层土壤 pH 值增大有关。

表 3 不同恢复年限与恢复方式条件下土壤有环境指标特征

土壤环境指标		土壤酸碱度		土壤总有机碳	
土层深度/cm	统计特征	不同恢复年限	不同治理措施	不同恢复年限	不同治理措施
0—10	均值	8.56	8.58	2.15	3.22
	标准差	0.27	0.12	1.95	1.49
	变异系数/%	3.14	1.36	90.98	46.41
10—20	均值	8.66	8.70	1.30	1.86
	标准差	0.20	0.12	0.92	1.77
	变异系数/%	2.33	1.32	70.48	95.19
20—30	均值	8.73	8.80	1.63	1.88
	标准差	0.21	0.17	1.79	1.78
	变异系数/%	2.38	1.91	109.99	94.44
30—40	均值	8.70	8.88	1.44	3.64
	标准差	0.25	0.18	1.22	1.75
	变异系数/%	2.83	1.97	85.19	48.17
40—50	均值	8.70	9.01	4.11	2.08
	标准差	0.23	0.19	4.21	1.34
	变异系数/%	2.67	2.10	102.31	64.53

对土壤总有机碳(TOC)的统计分析结果表明,无论是在不同恢复年限条件下,还是在不同治理措施条件下,其变异系数均属于高度变异,表明不同恢复年限和治理措施条件下,土壤有机质之间存在较大差异。这是因为土壤有机碳含量是生态系统与土壤系统之间物质交换的结果,在矿区土地恢复过程中,不同采样点上的恢复时间及恢复方式不同,植被生长过程中的枯落物归还量、根系分布等均有所不同,所以向土壤中补充的有机物质数量不同,造成不同采样点上有机质含量表现出较大差异。

比较不同恢复年限和变异恢复方式下的有机质的分布特征可以发现,在不同恢复年限条件下,有机

质的变异系数明显大于不同恢复方式下有机质含量的变异系数,这说明恢复年限对于有机质含量的影响较大;深层有机质含量高且变异系数高的原因是由于在恢复 1 a 条件下,土壤深层有机质含量高,结合现场调查记录可知,在该样点的土壤中有枯草等存在,可能有由于复垦过程中把原有表层的杂草翻到深层所致。不同恢复方式下的有机质含量明显高于不同恢复年限下的土壤有机质含量,进一步说明了在矿区土地恢复过程中,合理人为干预活动,对于加快土壤质量恢复具有重要作用。

2.3 土壤环境与土壤有效微量元素关系

2.3.1 土壤 pH 值与土壤有效微量元素关系 土壤

pH 值与土壤有效微量元素关系(图 1)说明,pH 与 5 种微量元素含量均成负相关,即随着 pH 的升高,元素的含量有降低趋势。这可能是因为 pH 较大时,土壤中  $\text{OH}^-$  较多,对金属的吸持和固定作用强,金属微量元素会与  $\text{OH}^-$  形成氢氧化物沉淀,金属以沉淀态和矿物残留态存在的含量所占比例大,造成土壤有效微量元素的含量降低,迁移活性降低。从 4 种微量

元素与土壤 pH 值的相关性分析可知,4 种有效微量元素与土壤 pH 值的相关性都不是特别高,这主要是因为影响微量元素有效性的因素很多,并且不同元素的特性也有差异。其中有效锰、有效铜与土壤 pH 值的相关性较高。在干旱区的已有的研究表明<sup>[11]</sup>,土壤 pH 值与有效铜和有效锰的相关性较高,这与本研究的结果是一致的。

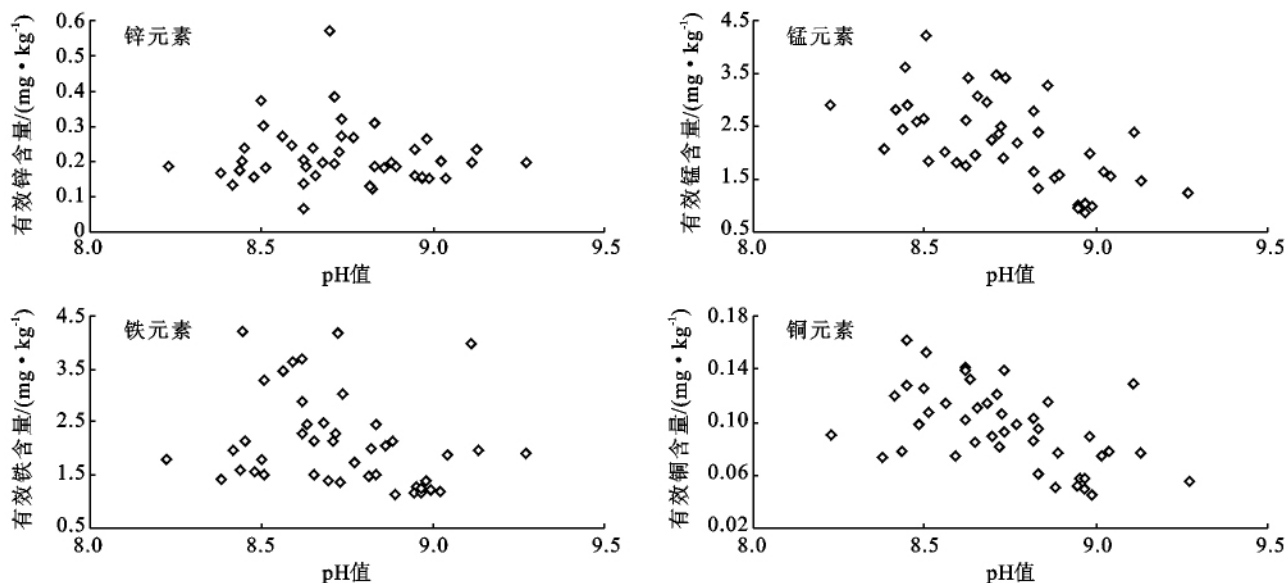


图 1 土壤 pH 值与土壤有效微量元素关系

### 2.3.2 土壤有机质含量与土壤有效微量元素关系

土壤有机质是土壤的重要组分,对土壤的各种物理、化学、生态性状和土壤肥力具有深刻影响。土壤中的有机质易与金属元素形成螯合物,从而截留于土壤表层。通过图 2 可知,有机质与研究区 4 种微量元素全量均成正相关关系。其中有效锌、有效铜与土壤有机质含量的正相关关系较高。已有研究表明<sup>[3]</sup>,有机质对微量元素有效性的影响体现在两个方面,一是有机

质本身会对微量元素的影响,另一方面,有机质分解会调整土壤的 pH 值。土壤有效态微量元素含量与有机质含量之间存在着明显的正相关关系,其中有效态 Fe、B、Cu 与有机质含量之间的关系较高。这与本研究的结果基本一致。从另外一个角度来说,由于研究区域的 pH 值整体呈碱性,可以通过增加土壤有机质含量的办法对土壤 pH 值进行适当调整,以增加土壤中有效微量元素的含量,提高土壤质量。

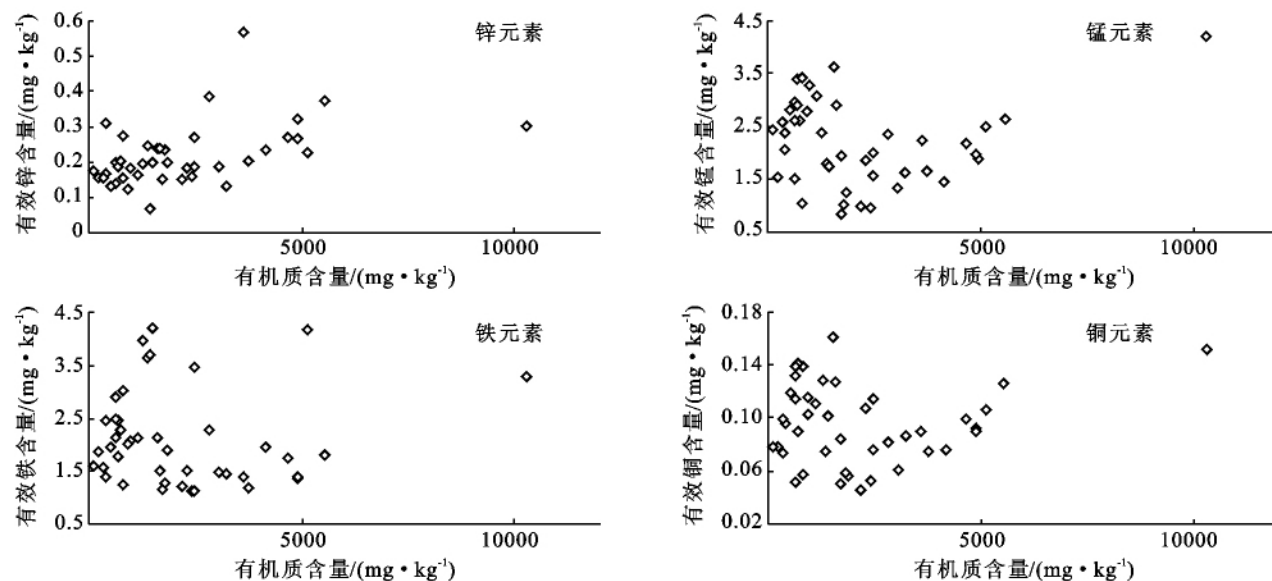


图 2 土壤总有机质与土壤有效微量元素关系

### 3 结论

(1) 研究区土壤有效微量元素含量属于极低水平。不同恢复年限条件下,铁元素的变异系数属于高度变异,铜、锰和锌元素等属于中度变异;而矸石场不同恢复方式条件下,锰元素属于高度变异,铜与铁元素属于中度变异,而锌元素属于小变异。

(2) 研究区土壤环境整体呈碱性,不同样点上的pH值在8.5以上,且变异系数较小,属于小变异。而土壤有机质无论是在不同恢复年限条件下,还是在不同治理措施条件下,其变异系数均属于高度变异。

(3) 土壤pH值与土壤有效微量元素呈负相关关系,有效锰、有效铜与土壤pH值的相关性较高;土壤有机质与土壤有效微量元素呈正均关,其中有效锌、有效铜与土壤有机质含量的相关性较高。

#### 参考文献:

- [1] 张秀芝,鲍征宇,马忠社,等. 土壤生态系统微量元素的生物有效性研究现状[J]. 地球与环境,2006,34(3):15-22.
- [2] 姜勇. 森林生态系统微量元素循环及其影响因素[J]. 应用生态学报,2009,20(1):197-204.
- [3] 朱先进,宇万. 农田生态系统微量元素循环研究进展[J]. 土壤通报,2009,40(4):962-966.
- [4] Thornton I. Impacts of mining on the environment: some local, regional and global issue[J]. Applied Geochemistry,1996,11(1/2):355-361.
- [5] Ge Y, Murray P, Hendershot W H. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils[J]. Environmental Pollution,2000,107(1):137-144.
- [6] Jeffrey G W, Robert J Z. Mapping soil micronutrients[J]. Field Crops Research,1999,60(1):11-26.
- [7] Maiz I, Arambarri I, Garcia R, et al. Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis[J]. Environmental Pollution,2000,110(1):3-9.
- [8] 葛晓立,李家熙,万国江,等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. 岩矿测试,2000,19(4):1-5.
- [9] Chlopecka A. Assessment of form of Cd, Zn and Pb in contaminated calcareous and gleyed soils in Southwest Poland[J]. The Science of the Total Environment,1996,188(2/3):253-262.
- [10] Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements: an environmental issue[J]. Geoderma,2004,122(2/4):143-149.
- [11] 赵翠翠,南忠仁,刘晓文,等. 绿洲农田土壤主要微量元素的影响因素及分布特征研究:以张掖甘州区和临泽县为例[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(10):127-132.
- [12] 李文先. 从新疆耕地土壤微量元素含量展望施肥的应用[J]. 干旱区研究,1985(2):8-15.
- [13] 马媛,师庆东,杨建军,等. 干旱区典型流域土壤微量元素的空间变异特征研究[J]. 干旱区地理,2006,29(5):682-687.
- [14] 吴彩霞,傅华,裴世芳. 不同草地类型土壤有效态微量元素含量特征[J]. 干旱区研究,2008,25(1):137-144.
- [10] 胡明,马继东. 安塞县土地利用变化与经济发展的关系[J]. 水土保持研究,2008,15(1):182-185.
- [11] 刘京. 基于RS与GIS的土地利用/覆盖及其生态环境质量评价:以黄土高原延河流域为例[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [12] 朱恒峰,赵文武,康慕谊,等. 延河流域土地利用格局时空变化与驱动因子分析[J]. 干旱区资源,2008,22(8):17-22.
- [13] 冉圣宏,张凯,吕昌河. 延河流域土地利用/覆被变化模型的尺度转换方法[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1414-1419.
- [14] 李传哲,王浩,于福亮,等. 延河流域水土保持对径流泥沙的影响[J]. 中国水土保持科学,2011,9(1):1-8.
- [15] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报,2003,58(5):643-650.
- [16] 程磊,徐宗学,罗睿,等. 渭河流域1980—2000年LUCC时空变化特征及其驱动力分析[J]. 水土保持研究,2009,16(5):1-6,30.
- [17] 朱会义,李秀彬,何书金,等. 环渤海地区土地利用的时空变化分析[J]. 地理学报,2001,56(3):253-260.

(上接第152页)