

铜川市三里洞煤矸石堆积地风化土壤 重金属污染及植物富集特征

闫宝环, 李凯荣, 时亚坤

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 研究煤矿矸石地的土壤污染及植物对有毒元素的吸收可为污染治理和植被恢复提供科学依据。对铜川市三里洞煤矸石堆积地土壤污染和草本植物中重金属含量进行了研究。运用地质累积指数法和综合富集系数分别对土壤污染和草本植物富集重金属元素的能力进行了分析评价。结果表明, 该区土壤中和草本植物中 Cu, Cd, Zn, Mn, Ni, Pb, Cr 元素均明显高于背景值; 草本植物中 Cu, Cd, Ni 元素超出正常范围。土壤中重金属元素 Cd 为强度污染, Ni, Cu, Zn, Pb, Cr 元素为轻度污染。不同植物中小飞蓬、铁杆蒿和野艾蒿对重金属元素的富集能力最强, 其次为猪毛蒿和曼陀罗, 狗牙根最差。

关键词: 煤矸石; 土壤重金属污染; 植物富集

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0047-04

中图分类号: X173

Heavy Metal Contamination of Weathered Soil and Enrichment Characteristics of Plants at Sanlidong Coal Gangue Site in Tongchuan City

YAN Bao-huan, LI Kai-rong, SHI Ya-kun

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Research on soil contamination and plant absorption of toxic elements at coal gangue site can provide a scientific basis for pollution control and vegetation restoration. Soil pollution and heavy metal content in herbaceous plants are studied at Sanlidong coal gangue site in Tongchuan City. Moreover, soil pollution and the enrichment capacity of heavy metals in herbaceous species are analyzed and evaluated using geo-accumulation index and complex accumulation coefficient. Results show that all the elements of Cu, Cd, Zn, Mn, Ni, Pb and Cr in both of the soil and plants obviously exceed their background values and the Cu, Cd and Ni elements in herbaceous species are beyond their normal range. Heavy metal element Cd in soil is in the most serious pollution grade and the elements of Ni, Cu, Zn, Pb and Cr are in the slight pollution grade. For the different plants, the heavy metal enrichment capacities of *Conyza canadensis* (L.) Cronq., *Artemisia sacrorum* Ledeb. and *Artemisia lavandulaefolia* D. C. are the strongest, followed by *Artemisia scoparia* Waldst. et Kit and *Datura Stramonium* Linn. The enrichment capacity of *Cynodon dactylon* (Linn.) Pers. is the worst.

Keywords: coal gangue; soil heavy metal contamination; plant enrichment

煤炭开采产生大量的煤矸石, 它不仅占压农田, 影响周围景观, 最重要的是含有大量的重金属元素。一些重金属元素可以通过土壤—植物系统, 经由食物链进入人体, 危害人类健康^[1-3]。植物修复技术作为污染土壤修复的一种方法, 它是利用绿色植物来吸收、转移或转化污染物, 从而消除其对环境的危害。因其具有廉价且环保等优点而备受人们关注。

本文调查了三里洞煤矿矸石堆积地表层风化土壤(以下简称风化土壤)及其上自然定居的植物, 测定主要优势植物及其所在土壤的重金属元素含量, 分析不同采样区土壤重金属元素的污染状况和不同草本植物对其的富集特征, 以期筛选出对重金属元素富集能力强的草本植物, 为我国煤矿矸石堆积地污染土壤治理和生态恢复提供科学依据。

收稿日期: 2011-07-18

修回日期: 2011-09-09

资助项目: 林业公益性行业科研专项“污染立地植被恢复技术研究”(201104002-4)

作者简介: 闫宝环(1986—), 女(汉族), 陕西省华阴市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态工程研究。E-mail: huanbaoyan-333@163.com。

通信作者: 李凯荣(1955—), 男(汉族), 陕西省扶风县人, 教授, 主要从事水土保持与生态工程研究。E-mail: lkr.888@163.com。

1 研究区概况

铜川市位于陕西省中部,是关中经济带的重要组成部分。位置介于东经 108°34′—109°29′,北纬 34°50′—35°34′。三里洞煤矿矸石堆积地位于陕西省铜川市东南部印台区境内,属暖温带大陆性季风气候,冬寒夏热,干旱、暴雨、连阴雨、霜冻、大风、低温、干热风等灾害性天气较多,年均降水量 589~650 mm,年均日照 2 345.7 h,年平均气温 10~11 ℃。无霜期为 160~210 d,极端最高气温 34.3 ℃,极端最低气温 -21.1 ℃。该区矸石堆积散乱无序,最长停止排矸年限达 40 a

多,最短仅为 8 a 左右。风化土壤自然植被恢复较好,主要是草本,灌木和乔木有零星分布。

2 研究方法

2.1 野外调查与采样

根据矸石堆积地形、排矸终止时间以及优势植被生长分布情况等,将整个矸石地划分为 7 个区(表 1)。在每个区内按直线法或梅花布点法,随机采集 3 个风化土样(将土样混合,用四分法取样,采集深度为 0—20 cm)。采集每个小区内具有代表性、生长旺盛、数量较多的优势植物,种类为 11 种。

表 1 各采样区基本情况

采样区	地形	优势植物	采样区概况
1	台地	曼陀罗(<i>Datura Stramonium</i> Linn.), 灰菜(<i>Chenopodium album</i> L.)	离矿井较近,因此排放有大量的建筑垃圾和生活垃圾,植被恢复良好
2	坡地	狗牙根[<i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers.]	排矸终止年限稍长,植被恢复较好
3	台地	小飞蓬[<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.], 猪毛菜(<i>Salsola collina</i> Pall.)	排矸终止年限较短,有较大矸石块,加之有车辆碾压痕迹,人为干扰严重,质地坚硬。中部几乎寸草不生,外缘植被覆盖较好
4	台地	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. et Kit.) 铁杆蒿(<i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.)	表层覆有 10 cm 左右厚的黄土,属于恢复区,无人工植被,自然植被恢复较好
5	台地	狗尾草[<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv]狗娃花 [<i>Heteropappus hispidus</i> (Thunb.) Less.]	排矸终止年限较长,自然生长植物种类繁多,覆盖度很大
6	台地	芦苇[<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. Ex Steud.]	林地,位于矸石堆积地北边
7	坡地	野艾蒿(<i>Artemisia lavandulaefolia</i> DC.)	孤立于以上各区,排矸终止年限有 30 a 多,且人为干扰小,已形成林地规模,其中刺槐、臭椿和榆树生长良好

2.2 土壤与植物样品处理分析

土壤样品经室内自然风干后粉碎,过 0.25 mm 孔径尼龙筛。称取 2 g 土壤样品, HCL + HNO₃ + HF + HClO₄ (10 ml + 5 ml + 5 ml + 3 ml) 消解,定容至 25 ml,保存,火焰原子分光光度法测定总 Cu, Cd, Zn, Mn, Ni, Pb 和 Cr^[4]。

用自来水先将植物样品洗净,再用去离子水冲洗 3 次,烘箱 80 ℃ 干燥 24 h,磨碎,过 0.25 mm 筛,称取 1.5 g 样品于瓷坩埚中,在电炉上加热炭化,再移入高温电炉中(550~600 ℃)灰化 4~5 h,冷却后准确加入 1:1 HNO₃ 溶液 5 ml 溶解灰分,定容至 25 ml,保存,用火焰原子分光光度法测定总 Cu, Cd, Zn, Mn, Ni, Pb 和 Cr^[5]。

2.3 污染评价方法

地质累积指数(geoaccumulation index)通常称为 Muller 指数^[6-7]。它最早是由德国海德堡大学沉积物研究所的 Muller 提出,目前,已广泛应用于各种沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量评价工作中。由于它不仅考虑成岩作用等自然地质过程造成的背

景值的影响,而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响,因此,该指数不仅能反映重金属元素分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数。其表达式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times BE_n} \right) \quad (1)$$

式中: I_{geo} ——地质累积指数; C_n ——样品中元素 n 的测定值(mg/kg); BE_n ——地球化学背景值(mg/kg); 1.5——修正指数,考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动。

式(1)表明,地质累积指数除取决于样品的测定值外,还与地球化学背景值的选择有关。由于不同的地球化学背景值具有很大的差异,因此,评价获得重金属的污染程度也有所不同。本文选用中国沉积页岩元素背景值作为三里洞煤矿矸石堆积地表层风化土壤的地球化学背景值进行计算^[8]。

地质累积指数分为 0~6 级 7 个级别,表示污染程度由无污染到极强污染。具体分级标准如表 2 所示。

表 2 地质累积指数分级标准

地质累积指数 I_{geo}	污染级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	无污染—中度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中度污染—强污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强污染—极强污染
$5 \leq I_{geo}$	6	极强污染

3 结果与分析

3.1 风化土壤重金属污染评价

根据测定结果,分别计算出 7 个采样区 7 种重金属元素含量的总平均值如表 3 所示。

从总体来看,矸石地各重金属元素全量范围为:Cu 38.75~78.74, Cd 2.04~2.76, Zn 103.58~153.87, Mn 448.25~802.19, Ni 68.02~115.26, Pb 48.29~82.34, Cr 115.20~181.34 mg/kg。与三里洞煤矿周围未污染土壤的背景值相比,7 种重金属元素均明显超

标,其中 Cu 元素超出该背景值 64.06%~233.36%, Cd 超出 98.06%~167.96%, Zn 超出 133.24%~246.48%, Mn 超出 60.13%~186.57%, Ni 超出 120.99%~274.46%, Pb 超出 105.66%~250.68%, Cr 超出 126.91%~257.18%。

由表 4 可知,Cu 的地质累积指数范围在 -0.15~0.87,污染级别为 0~1;除 4 区为 0 级污染外,其他各区均为 1 级污染。Cd 的地质累积指数范围在 4.00~4.28,污染级别均为 5 级。Zn 的地质累积指数范围在 -0.26~0.31,污染级别为 0~1;除 4 区和 6 区为 0 级污染外,其他各区均为 1 级污染。Mn 的地质累积指数范围在 -1.03~-0.19,污染级别为 0(即无污染)。Ni 的地质累积指数范围在 0.51~1.27,污染级别为 1~2;除 5 区和 7 区为 2 级污染外,其他各区均为 1 级污染。Pb 的地质累积指数范围在 0.29~1.06,污染级别为 1~2;除 2 区为 2 级污染外,其他各区均为 1 级污染。Cr 的地质累积指数范围在 0~0.66,污染级别均为 1 级。

表 3 各采样区土壤重金属含量

采样区	Cu	Cd	Zn	Mn	Ni	Pb	Cr
1	55.23	2.56	153.87	802.19	86.53	63.39	125.64
2	60.93	2.28	126.37	468.85	84.24	82.34	136.70
3	55.67	2.76	140.34	767.02	86.00	48.29	131.68
4	38.75	2.16	103.58	665.16	68.02	62.16	138.30
5	68.24	2.47	150.67	682.81	115.26	62.79	181.34
6	43.52	2.04	119.94	714.70	74.16	56.20	115.20
7	78.74	2.58	148.94	448.25	109.12	69.84	151.44
土壤背景值	23.62	1.03	44.41	279.93	30.78	23.48	50.77

表 4 不同采样区土壤重金属元素的 I_{geo} 及污染程度

采样区	Cu		Cd		Zn		Mn		Ni		Pb		Cr		平均	
	I_{geo}	级别														
1	0.36	1	4.17	5	0.31	1	-0.19	0	0.86	1	0.68	1	0.13	1	0.90	1
2	0.50	1	4.00	5	0.03	1	-0.96	0	0.82	1	1.06	2	0.25	1	0.81	1
3	0.37	1	4.28	5	0.18	1	-0.25	0	0.85	1	0.29	1	0.20	1	0.85	1
4	-0.15	0	4.22	5	-0.26	0	-0.46	0	0.51	1	0.66	1	0.27	1	0.68	1
5	0.66	1	4.12	5	0.28	1	-0.42	0	1.27	2	0.67	1	0.66	1	1.03	2
6	0.02	1	4.09	5	-0.05	0	-0.36	0	0.64	1	0.51	1	0.00	1	0.69	1
7	0.87	1	4.18	5	0.26	1	-1.03	0	1.19	2	0.82	1	0.40	1	0.96	1
总平均	0.38	1	4.15	5	0.11	1	-0.53	0	0.88	1	0.67	1	0.27	1		

总平均值分析结果显示,煤矸石地土壤中 Cd 的地质累积指数为 4.15,达 5 级,属强污染至极强污染, Ni, Cu, Zn, Pb 和 Cr 地质累积指数范围为 0.11~0.88, 仅达 1 级,属无污染至中度污染, Mn 为无污染,这与张锂等^[9]在甘肃红古煤矿矸石地的研究基本一致。从 7 种重金属元素的 I_{geo} 平均值来看,5 区为

2 级,属中度污染,其他各区均为 1 级,属无污染至中度污染。

3.2 优势植物体内重金属元素含量

由表 5 可知,同一种元素在不同植物体内含量有很大差异,如 Cu 元素在小飞蓬体内含量为 51.77 mg/kg,而在狗牙根体内含量仅为 2.63 mg/kg; Zn 元素在小飞

蓬体内含量为 130.83 mg/kg,而在狗牙根体内含量仅为 9.4 mg/kg。5 种重金属元素在各分区土壤中的含量顺序均为 Mn>Zn>Ni>Cu>Cd,而在不同草本植物体内的含量顺序相差却很大,如小飞蓬为 Zn>Mn>Cu>Ni>Cd,芦苇为 Mn>Ni>Zn>Cu>Cd,而曼陀罗为 Zn>Cu>Mn>Ni>Cd。这是由于不同草本植物积累重金属元素的能力不同,并且植物积累重金属元

素的量与其在土壤中的贮存状态有关。植物体内重金属正常含量分别为 Cu 5~25,Cd 0.1~2.4,Zn 20~400,Mn 1~700,Ni 0.05~5 mg/kg,与之相比,矸石地植物只有 Mn 元素和 Zn 元素含量全部在正常范围之内,3 区小飞蓬中的 Cd 含量超出了正常范围,大部分植物中的 Cu 含量也超出了正常范围,所有植物中的 Ni 含量都超过了正常范围。

表 5 不同草本植物体内重金属元素含量

mg/kg

草本种类	采样区	Cu	Cd	Zn	Mn	Ni
小飞蓬	3	51.77	2.57	130.83	67.47	20.33
狗尾草	5	2.90	0.37	38.00	34.13	10.67
猪毛蒿	4	19.53	0.47	51.77	45.83	18.40
猪毛菜	3	14.90	0.34	49.63	16.90	19.37
狗娃花	5	17.10	0.47	86.03	39.00	23.23
灰菜	1	12.73	0.57	48.90	34.20	19.37
芦苇	6	7.80	0.17	13.00	87.30	16.47
曼陀罗	1	37.57	0.10	98.10	35.77	21.30
狗牙根	2	2.63	—	9.40	72.00	7.77
野艾蒿	7	45.47	0.57	103.00	94.73	23.23
铁杆蒿	4	35.67	0.83	76.73	104.40	19.37
正常含量		5~25	0.1~2.4	20~400	1~700	0.05~5.00

注:表中所有单种植物的样本数均为 6。

3.3 草本植物对重金属的富集特征

富集系数是指植物地上部分与根区土壤重金属总量的比值,是衡量植物对重金属元素积累能力大小的一个重要指标,能够更明确地反映植物对土壤中重金属元素的吸收转移能力的强弱,同时也可以表征土壤—植物系统重金属元素迁移的难易程度。富集系数越大,其富集能力越强。综合富集系数是植物体各重金属元素富集系数之和^[10]。不同草本植物对重金属元素 Cu,Cd,Zn,Mn,Ni 的综合富集系数见图 1。

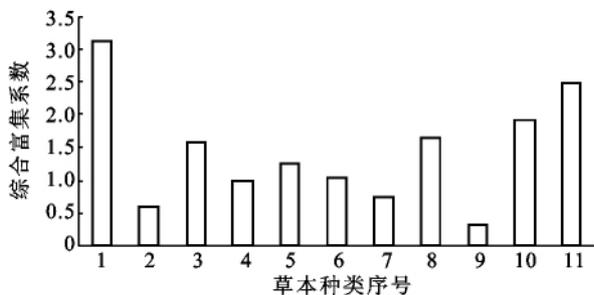


图 1 不同草本植物对重金属 Cu,Cd,Zn,Mn,Ni 的综合富集对比

注:草本种类序号 1 为小飞蓬;2 为狗尾草;3 为猪毛蒿;4 为猪毛菜;5 为狗娃花;6 为灰菜;7 为芦苇;8 为曼陀罗;9 为狗牙根;10 为野艾蒿;11 为铁杆蒿

由图 1 可以看出,不同草本植物对重金属元素的富集能力差异很大,大小顺序为小飞蓬>铁杆蒿>野

艾蒿>曼陀罗>猪毛蒿>狗娃花>灰菜>猪毛菜>芦苇>狗尾草>狗牙根,综合富集系数分别为 3.12, 2.49, 1.91, 1.65, 1.56, 1.27, 1.04, 0.99, 0.72, 0.59, 0.32,其中小飞蓬、铁杆蒿和野艾蒿的富集能力最强,其次是猪毛蒿和曼陀罗,狗牙根最差。

4 结论

(1) 在三里洞煤矸石堆积地中,Cu,Cd,Zn,Mn,Ni,Pb,Cr 这 7 种元素均明显高于该区土壤背景值。

(2) 与沉积页岩元素背景值相比,矸石堆积地风化土壤重金属元素 Cd 污染最为严重,Ni,Cu,Zn,Pb,Cr 元素次之。7 个区中除 5 区为中度污染外,其余各区均为无污染至中度污染。

(3) 同一种元素在不同植物体内含量有很大差异,不同植物体内 5 种重金属元素含量顺序也有很大差异,可能与草本植物种类和重金属元素在土壤中的贮存状态有关。

(4) 从综合富集系数来看,小飞蓬、铁杆蒿和野艾蒿对重金属元素的富集能力最强,其次为猪毛蒿和曼陀罗,狗牙根最差。因此,在 Cu,Cd,Zn,Mn,Ni 综合污染的煤矸石地植被恢复中,小飞蓬、铁杆蒿和野艾蒿可以作为首选的草本植物。

(下转第 122 页)

- [J]. Kan. Agric. Exp. Sta. Tech. Bull., 1957, 92: 1-16.
- [6] May K R, Pomeroy N P, Hibbs S. Sampling techniques for large wind borne particles [J]. Journal of Aerosol Science, 1976, 7(1): 53-62.
- [7] Fryrear D W. A field dust sampler [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(2): 117-120.
- [8] Goossens D, Offer Z Y. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1043-1057.
- [9] Stout J E, Fryrear D W. Performance of a windblown-particle sample [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 2041-2045.
- [10] 荣姣凤, 高焕文, 李胜. 风蚀集沙仪的等动力性实验研究 [J]. 中国水土保持, 2004(5): 17-19.
- [11] 李长治, 董光荣, 石蒙沂. 平口式集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1987, 7(3): 49-56.
- [12] 李振山, 倪晋仁, 刘贤万. 垂点阵集沙仪的集沙效率 [J]. 泥沙研究, 2003(1): 24-32.
- [13] 臧英. 保护性耕作防治土壤风蚀的实验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [14] Shao Y, McTainsh G H, Leys J E, et al. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement [J]. Australian Journal Soil Research, 1993, 31(4): 519-531.
- [15] Cornelis W M, Gabriels D. A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(9): 1033-1041.
- [16] 王铁成. 空气动力学实验技术 [M]. 修订版. 北京: 航空工业出版社, 1995: 168-169.
- [17] 高征锐, 赵爱国. 遥测集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1983(1): 32-36.
- [18] 王金莲. 布袋式集沙仪结构参数度集沙效率影响的试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [19] 赵满全, 付丽宏, 王金莲, 等. 旋风分离式集沙仪在风洞内集沙效率的试验研究 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1009-1014.
- [20] 海春兴. 河北坝上土地利用与土壤风蚀的动力学过程研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2003.

(上接第 50 页)

[参 考 文 献]

- [1] 樊有赋, 陈晔, 秦寿发, 等. 超累积植物与重金属污染的植物修复技术 [J]. 河北农业科学, 2007, 11(5): 73-75.
- [2] 李梅, 曾德华. 重金属污染的植物修复研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2007, 35(3): 135-138.
- [3] 王新, 贾永锋, 杨树, 落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(2): 432-436.
- [4] 国家环境保护局、国家技术监督局, 中华人民共和国国家标准. GB/T17138—1997, GB/T17139—1997, GB/T17140—1997 [S]. 北京: 中国环境出版社, 1997.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [6] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [7] Forstner U, Muller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. Geojournal, 1981, 2(5): 417-432.
- [8] 樊金柱. 中国北方煤矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [9] 张铨, 韩国才, 陈慧, 等. 黄土高原煤矿区矸石中重金属对土壤污染的研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1141-1146.
- [10] 栾以玲, 姜志林, 吴永刚. 栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 69-72.

(上接第 85 页)

- [11] 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 439-444.
- [12] 袁宝财, 达海莉, 王琛. 宁夏经济的新亮点: 苜蓿 [J]. 内蒙古畜牧科学, 2001, 22(2): 33-35.
- [13] 杨改河. 旱区农业理论与实践 [M]. 北京: 世界图书出版, 1993: 166-167.
- [14] 荆新海, 田魁祥. 河北省黑龙港地区苜蓿发展与水分生态系统分析 [J]. 农业现代化研究, 1992, 13(4): 218-222.
- [15] 杨文耀. 阴山丘陵旱农区豆科牧草在轮作周期中的用养培肥效应 [J]. 内蒙古草业, 1994(3): 30-33.
- [16] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究 [J]. 草业学报, 2008, 17(3): 31-39.
- [17] 刘孟雨, 但野利秋, 刘会灵. 苜蓿改良的盐碱土壤对小麦的效应研究: 对小麦生长及产量的影响 [J]. 生态农业研究, 1998, 6(2): 58-60.
- [18] 张春霞, 郝明德, 李丽霞. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化 [J]. 草地学报, 2005, 13(1): 66-70.
- [19] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 不同轮作方式对退化苜蓿草地水分影响及产量效益比较研究 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 70-77.
- [20] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区不同草粮轮作方式中前茬对春小麦产量和土壤性状的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 146-152.