

# 金安桥水电站弃渣场不同部位土壤质量定量对比

姚红胜,陈奇伯\*,黎建强,贺莉莎,姜文达

(西南林业大学 环境科学与工程学院,云南 昆明 650224)

**摘要:**选取金安桥水电站2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>弃渣场不同部位土壤为研究对象,以其周边灌草地土壤作为参照,在土壤理化性质分析基础上,选定土壤质量评价指标,运用相关系数法确定评价指标的权重,对土壤质量进行定量评价与分析,以期弃渣场的植被恢复提供理论依据。土壤理化性质分析结果表明,弃渣场土壤有机质、全氮、水解氮含量与周边灌草地土壤相比都相对较低;全磷、有效磷、全钾含量,弃渣场与灌草地无显著性差异;速效钾含量,2<sup>#</sup>弃渣场与灌草地差异显著,3<sup>#</sup>弃渣场与灌草地差异不显著;2弃渣场的土壤均为弱碱性土。土壤质量综合评价结果表明,2<sup>#</sup>弃渣场的边坡中部>平台>边坡上部>边坡下部,3<sup>#</sup>弃渣场的平台>边坡上部>边坡中部>边坡下部;弃渣场平台的土壤质量相对较好,边坡下部最差;弃渣场各个部位土壤质量均低于附近灌草地土壤质量,除2<sup>#</sup>弃渣场边坡上部和3<sup>#</sup>弃渣场边坡下部表层土壤质量较下层差外,弃渣场不同部位上层土壤质量均优于下层土壤。

**关键词:**金安桥水电站;弃渣场;灌草地;土壤质量

**中图分类号:**S151.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2013)03-0172-05

## Quantitative Comparison on the Soil Quality of Different Parts of Abandoned Dreg Field in Jin'anqiao Hydropower Station

YAO Hong-sheng, CHEN Qi-bo\*, LI Jian-qiang, HE Li-sha, JIANG Wen-da

(College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis for vegetation restoration of abandoned dreg field, soils from different parts of No. 2 and No. 3 abandoned dreg fields in Jin'anqiao Hydropower Station were selected as the research objects, soils from the surrounding shrub-herb lands were used as the control. Based on the analysis of soil physical and chemical properties, indices for the soil assessment were determined and weighted by the correlation coefficient method to be used to evaluate analyze the soil quality. The results of analyses of the soil physical and chemical properties showed that the contents of soil organic matter, total nitrogen, and hydrolyzed nitrogen in abandoned dreg fields were relatively low compared with the soils from surrounding shrub-herb lands. However, differences in the contents of total phosphorus, available phosphorus, total potassium between those from shrub-herb land and abandoned dreg fields were not significant. Differences in the contents of available potassium between the soils from No. 2 field and shrub-herb land was significant, but not significant between No. 3 field and shrub-herb land. Soils from abandoned dreg fields were weak alkaline earth. The results of soil quality comprehensive evaluation showed that in No. 2 field, soil from the middle part of the slope was the best, worst from slope bottom. In No. 3 field, soil from the platform was the best, slope bottom was the worst. Soil quality of platform in two abandoned dreg fields was relatively good, surface layer was better than sub layer. In addition, soil quality of all parts

收稿日期:2012-10-13 修回日期:2012-11-06

基金项目:国家自然科学基金(31060093);西南林业大学生态学重点学科建设项目(XKX200902)。

作者简介:姚红胜,男,在读硕士,研究方向:土壤侵蚀。E-mail:409332081@qq.com

\*通信作者:陈奇伯,男,教授,博士,研究方向:水土保持及生态修复。E-mail:chengqb@swfu.edu.cn

of abandoned dreg fields was lower than the soil quality of shrub-herb land. The quality of upper soil was better than lower soil in different parts of abandoned dreg fields except for those from upper slope in No. 2 field and slope bottom from No. 3 field.

**Key words:**Jin'anqiao Hydropower Station; abandoned dreg field; shrub-grass land; soil quality

水电资源开发对经济和社会的发展产生了巨大的影响,但同时随之出现的环境污染、遗留废渣堆积等问题也严重影响了当地生态环境、经济和社会的健康发展。水电站工程建设过程中形成大量的岩土渣场,这些弃渣场主要由废弃块石、碎石和覆盖层风化物堆积而成,具有土壤极少、水分及养分渗漏快等特点,由于不具备植物生长所需的基本条件,不仅造成水土流失,同时影响沿河群众生产、生活安全和河流水系安全<sup>[1]</sup>。因此,根据金安桥水电站弃渣场的具体条件了解其土壤状况,对于采取何种有效措施恢复植被,促进土壤结构与肥力的恢复,减少水土流失,改善区域小气候和生态环境具有重要意义<sup>[2]</sup>。选取金安桥水电站 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 弃渣场不同部位土壤为研究对象,以周边灌草地土壤作为参照,进行土壤质量定量对比研究,以期为弃渣场的植被恢复提供理论依据。

### 1 研究区概况

金安桥水电站位于云南省丽江市境内,工程区周边属亚热带季风气候区,光照充足、热量充沛,干湿季分明,河谷区“焚风效应”明显。多年平均降水量 938 mm,最大日降水量 127.6 mm,多年平均蒸发量 2 200 mm,多年平均气温 13℃ 左右,全年无霜。岩石主要有碳酸盐岩、碎屑沉积岩、板岩、大理岩和变质火山岩。周边土壤类型主要有红壤、棕壤和紫色土。自然地带性植被为暖温性针叶林和稀树灌木草丛,以紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、山黄麻(*Trema tomentosa*)、接骨木(*Sambucus williamsii*)、矮黄栌(*Cotinus nana*)、滇榄仁(*Terminalia franchetii*)、滇虎榛(*Ostryopsis nobilis*)等为主。

2<sup>#</sup> 渣场位于坝址下游 3.5 km 的右岸岸坡台地上,有效容积为 310×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,主要堆置导流洞洞身开挖、导流洞出口明渠等工程的土石方开挖弃渣及下游土石围堰拆除弃渣,边坡坡度约 34°。3<sup>#</sup> 渣场位于坝址下游约 4.9 km 的左岸岸坡台地上,有效容积 410×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,主要堆置砂石料场剥离土石方、砂石加工系统开挖及进场交通洞身开挖的弃渣,边坡坡度约 40°。2 渣场内的植被分布极为稀疏。

## 2 研究方法

### 2.1 土样采集及测定

由于弃渣场的特殊环境,加上雨水淋溶及地表径流的作用,其土壤不同部位上下层可能存在一定的差异,因此在弃渣场边坡上部、中部、下部、坡下平台以及附近灌草地的土壤剖面对 0~10、10~20 cm 土层进行采样,各点重复 3 次取样,并进行土壤理化性质的测定。

土壤理化性质采用常规方法进行测定,pH 值用电位电极法,有机质用重铬酸钾氧化外加热法,全氮用硫酸-高氯酸消化-碱解扩散法,水解氮用碱解扩散法,全磷用酸溶钼锑抗比色法,速效磷用碳酸氢钠浸提分光光度法,全钾用碱溶火焰光度法、速效钾用乙酸铵浸提火焰光度计法测定<sup>[3]</sup>。

### 2.2 土壤质量评价方法

在土壤理化性质分析基础上,参照前人研究成果<sup>[4-8]</sup>,结合金安桥水电站弃渣场的实际情况选取有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、pH 值作为基本评价指标。其次运用相关系数法确定评价指标的权重,具体的计算方法为:首先计算单项指标之间的相关系数,然后求某项指标与其他指标间相关系数的平均值,并以该平均值占有评价指标相关系数平均值绝对值的总和的比作为该项评价指标的权重<sup>[9-10]</sup>。再确定评价指标所属的隶属度函数并计算相应的隶属度值,以此来表示各评价指标的状态值<sup>[6]</sup>,根据研究区的实际情况,氮、磷、钾、有机质都属于戒上型隶属度函数,表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中最小值  $x_1$  和最大值  $x_2$  为函数的转折点。pH 值隶属度的确定不能简单地用戒上型或戒下型隶属度函数来确定,因为土壤的 pH 值在 6.5~7.5 之间最适宜作物生长,过高或过低都会抑制农作物的生长,所以,采用经验法计算 pH 值的隶属度<sup>[11]</sup>。

最后根据评价指标的权重和隶属度计算各采样部位土壤质量指标分值,表达式为:

$$IQI = \sum W_i \times N_i \quad (2)$$

式中  $W_i$  指标权重值, $N_i$  指标隶属度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤理化性质定量分析

各评价因子的测定数据(表 1)看出,坡下平台土壤有机质含量相对于其他部位较高,上下层土壤有机质的含量存在一定差异,上层比下层最多高1.41倍;与附近灌草地土壤相比,弃渣场各部位土壤有机质都较低,2<sup>#</sup>弃渣场上层为 5.00%~16.51%,下层为 3.80%~15.23%,3<sup>#</sup>弃渣场上层为 18.73%~29.87%,下层为 9.24%~13.53%。弃渣场土壤有机质含量低对植被恢复具有很大限制作用。

与附近灌草地土壤相比,弃渣场各部位土壤全氮、水解氮的含量都极低,2<sup>#</sup>弃渣场上层分别为 7.95%~13.64%、7.83%~14.28%,下层分别为

12.50%~20.83%、5.87%~20.94%,3<sup>#</sup>弃渣场上层分别为 27.03%~55.41%、25.31%~40.74%,下层分别为 5.26%~15.79%、8.40%~16.60%。弃渣场土壤不能满足植被正常生长的氮素需求。

土壤磷、钾也是评定土壤肥力的重要指标,对植物生长具有极其重要的作用。全磷、有效磷、全钾含量方面,弃渣场各部位土壤与周边灌草地土壤差异不显著;速效钾含量方面,3<sup>#</sup>弃渣场各部位土壤与其周边灌草地差异不显著,2<sup>#</sup>弃渣场各部位土壤与灌草地土壤差异显著,上层为灌草地土壤的12.76%~26.58%,下层为 21.09%~30.45%。说明,弃渣场土壤速效钾含量会影响其植被正常生长。

2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>弃渣场的土壤 pH 值平均分别为 8.23 和 8.26,2 渣场的土壤都属于弱碱性土。

表 1 各评价指标的测定数据

Table 1 Measured data of evaluation indices

采样部位/cm		有机质 /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 /(g·kg <sup>-1</sup> )	水解氮 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 /(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾 /(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
2 <sup>#</sup> 渣场	坡下平台 0~10	9.21	0.12	4.85	1.93	9.46	15.68	68.15	7.83
	坡下平台 10~20	5.93	0.07	5.39	1.91	9.67	15.57	61.15	8.42
	边坡上部 0~10	2.79	0.07	2.66	1.46	4.07	18.77	32.72	8.13
	边坡上部 10~20	3.23	0.06	7.49	1.46	5.43	19.16	51.36	8.11
	边坡中部 0~10	6.83	0.09	3.13	1.78	6.79	19.78	32.72	7.93
	边坡中部 10~20	5.55	0.10	4.06	1.80	7.05	20.40	56.02	8.03
	边坡下部 0~10	3.57	0.11	2.71	1.74	7.33	19.37	58.82	8.73
	边坡下部 10~20	1.48	0.06	2.10	1.70	4.68	19.01	42.35	8.71
	附近灌草地 0~10	55.79	0.88	33.97	1.41	10.12	22.65	256.44	7.95
	附近灌草地 10~20	38.92	0.48	35.77	1.62	4.27	20.68	200.82	8.16
3 <sup>#</sup> 渣场	坡下平台 0~10	10.73	0.41	13.63	1.86	46.81	20.89	226.14	7.99
	坡下平台 10~20	13.47	0.15	8.96	1.90	31.49	17.21	227.23	8.36
	边坡上部 0~10	12.22	0.21	10.87	2.09	35.52	17.80	256.44	8.16
	边坡上部 10~20	9.58	0.19	8.89	2.04	34.11	21.26	174.87	8.30
	边坡中部 0~10	7.80	0.20	8.47	2.46	15.86	20.24	132.77	8.36
	边坡中部 10~20	9.20	0.08	6.30	2.12	20.50	15.56	120.80	8.40
	边坡下部 0~10	12.44	0.20	9.99	1.49	10.02	19.93	124.07	8.21
	边坡下部 10~20	10.35	0.24	12.46	1.98	8.91	21.38	138.99	8.40
	附近灌草地 0~10	41.65	0.74	33.46	1.32	19.44	23.19	288.12	7.26
	附近灌草地 10~20	99.55	1.52	75.04	1.04	7.05	12.71	126.41	7.69

#### 3.2 不同部位土壤质量对比评价

利用相关系数法求得的各评价指标之间的相关系数平均值和各评价指标的权重见表 2。氮、磷、钾各指标隶属度曲线转折点取值见表 3,然后利用公式(1)求得相应的隶属度。pH 值的隶属度值见表 4。再利用公式(2)求得 2 弃渣场及周边灌草地土壤不同部位及层次的土壤质量分值(表 5)。

土壤质量分值的高低即代表土壤质量的高低。在土壤质量方面,2<sup>#</sup>弃渣场土壤上层:坡下平台>边坡中部>边坡上部>边坡下部,下层:边坡中部>边坡上部>坡下平台>边坡下部,综合上下层:边坡中部>坡下平台>边坡上部>边坡下部。3<sup>#</sup>弃渣场土壤上层:坡下平台>边坡上部>边坡中部>边

表 2 各评价指标的相关系数平均值和权重系数

Table 2 Average correlation coefficients and weight values of soil evaluation indices

评价指标	相关系数平均值	权重系数
有机质	0.553 0	0.174 7
全氮	0.534 7	0.168 9
水解氮	0.544 3	0.172 0
全磷	0.403 9	0.127 6
有效磷	0.202 8	0.064 1
全钾	0.147 4	0.046 6
速效钾	0.385 7	0.121 9
pH	0.394 2	0.124 2

坡下部,下层:边坡上部>坡下平台>边坡下部>边坡中部,综合上下层:坡下平台>边坡上部>边坡中

部>边坡下部。由于弃渣场的特殊环境,其土壤受  
边坡坡度、坡长、地理位置、降雨量、地表径流及人为  
因素等的综合作用,养分分布被影响,而导致弃渣场  
各部位上下层土壤环境及土壤质量存在一定差异。

表 3 隶属度曲线转折点取值

Table 3 Turning point values of membership curve

评价指标	有机质	全氮	水解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
	/( g · kg <sup>-1</sup> )	/( g · kg <sup>-1</sup> )	/( mg · kg <sup>-1</sup> )	/( g · kg <sup>-1</sup> )	/( mg · kg <sup>-1</sup> )	/( g · kg <sup>-1</sup> )	/( mg · kg <sup>-1</sup> )
<i>x</i> <sub>1</sub>	1.48	0.06	2.10	1.04	4.07	12.71	32.72
<i>x</i> <sub>2</sub>	99.55	1.52	75.04	2.46	46.81	23.19	288.12

表 4 pH 值的隶属度值

Table 4 Memberships values of pH value

pH	<6.50	6.50~7.00	7.01~7.50	7.51~8.00	8.01~8.25	8.26~8.50	>8.50
隶属度	0.5	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1

表 5 各采样部位土壤质量分值

Table 5 Soil quality scores of sampling sites

2# 弃渣场	土壤质	3# 弃渣场	土壤质
各采样部位/ cm	量分值	各采样部位/cm	量分值
坡下平台 0~10	0.305 4	坡下平台 0~10	0.490 1
坡下平台 10~20	0.229 2	坡下平台 10~20	0.363 7
边坡上部 0~10	0.212 2	边坡上部 0~10	0.445 0
边坡上部 10~20	0.233 5	边坡上部 10~20	0.370 1
边坡中部 0~10	0.280 2	边坡中部 0~10	0.354 5
边坡中部 10~20	0.270 8	边坡中部 10~20	0.294 6
边坡下部 0~10	0.208 7	边坡下部 0~10	0.311 1
边坡下部 10~20	0.183 5	边坡下部 10~20	0.330 3
附近灌草地 0~10	0.588 6	附近灌草地 0~10	0.596 2
附近灌草地 10~20	0.476 2	附近灌草地 10~20	0.682 8

弃渣场坡下平台的土壤质量相对较好,边坡下部最差,这与刘世梁<sup>[19]</sup>等研究的结果类似,从地形方面来看,坡下平台的位置不同于上中下坡位,其他坡位的养分经过淋溶等,集中到坡下平台,导致土壤养分如全氮、水解氮、有效磷、速效钾在坡下平台处的含量高,所以其土壤质量分值也相对高于其他部位。

除 2# 弃渣场边坡上部和 3# 弃渣场边坡下部上层土壤质量较下层差外,弃渣场其他部位上层土壤质量均优于下层土壤。这是由于除 2# 弃渣场边坡上部、3# 弃渣场边坡下部外,弃渣场其他部位均为多数指标值上层比下层高。

弃渣场各个部位上下层土壤的土壤质量均低于附近灌草地的土壤质量。有机质、全氮、水解氮的权重系数位列前 3 位,总权重系数为 0.515 6(表 2),然而弃渣场土壤这 3 个指标的含量又极低,其为导致 2 弃渣场各部位上下层土壤质量低的主要原因。另外,2# 弃渣场土壤速效钾含量低也是导致其土壤质量低的主要原因。

4 结论与讨论

土壤理化性质直接影响土壤质量,它的好坏直接影响着土壤的水、肥、气、热等状况,进而影响植物

的生长发育<sup>[12]</sup>。土壤有机质是评价土壤质量的一个重要指标,它能增加土壤的保肥和供肥能力,提高土壤养分的有效性,可促进团粒结构的形成,改善土壤的透水性、蓄水能力及通气性,增加土壤的缓冲性<sup>[13]</sup>。全氮量通常用于衡量土壤的基础肥力,与有机质存在显著线性相关关系<sup>[14]</sup>,而可供植物直接吸收的土壤水解氮的含量则体现了土壤中的氮素供应水平<sup>[15-16]</sup>。土壤溶液的 pH 是影响土壤养分的重要因素之一,它直接影响土壤中养分存在的状态、转化和有效性<sup>[17]</sup>。碱性土壤易结皮,水力特性较差,通透性不良,较易发生水土流失现象<sup>[18]</sup>,而加剧植被恢复的难度。

弃渣场土壤有机质、全氮、水解氮含量与周边灌草地土壤相比都相对较低;全磷、有效磷、全钾含量,弃渣场与灌草地无显著性差异;速效钾含量,2# 弃渣场与灌草地差异显著,3# 弃渣场与灌草地差异不显著;pH 值,2#、3# 弃渣场土壤分别为 8.23 和 8.26,均为弱碱性土。

弃渣场平台的土壤质量相对较好,边坡下部最差,2 弃渣场各部位上下层土壤的质量均低于附近灌草地的土壤质量,2 弃渣场多数部位上层土壤质量比下层土壤质量好。土壤有机质、全氮、水解氮含量低为 2 弃渣场各部位上下层土壤质量差的主要原因,速效钾含量低也是 2# 弃渣场各部位上下层土壤质量相对较差的主要原因。

弃渣场土壤质量分值高低也说明了其植被恢复的难易程度,分值越高越易于植被恢复,分值越低植被恢复越困难。要加速弃渣场植被与生态环境恢复必须综合考虑边坡坡度、坡长、地理位置、降雨量、地表径流等因素的相互作用,针对导致弃渣场土壤质量差的主要原因、植被恢复的难易程度,结合当地的实际情况采取相应有效的措施进行基质改良,尽量减少人为活动的干扰,逐步改善土壤理化性质,提高土壤质量,恢复植被,实现生态系统良性循环,从而

获得更高的环境效益、社会效益和经济效益。

参考文献：

- [1] 李林欣,曾谋. 某水电站弃渣边坡植被恢复工程实例[J]. 四川建筑,2007,(Supp. 1):92-93.
- [2] 彭少麟. 恢复生态学与植被重建[J]. 生态科学,1996,15(2):26-31.  
PENG S L. Restoration ecology and vegetation reconstruction [J]. Ecological Science,1996,15(2):26-31. (in Chinese)
- [3] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [4] 冷疏影,李秀彬. 土地质量指标体系国际研究的新进展[J]. 地理学报,1999,54(2):177-185.  
LENG S Y,LI X B. New progresses of international study on land quality indicators[J]. Acta Geographica Sinica,1999,54(2):177-185. (in Chinese)
- [5] 陈龙乾,邓略中,徐黎华,等. 矿区复垦土壤质量评价方法[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(5):449-452.  
CHEN L Q,DENG K Z,XU L H,*et al.* Method of quantitative evaluation of quality of reclaimed soil [J]. Joural of China University of Mining & Technology,1999,28(5):449-452. (in Chinese)
- [6] 王伟,杨晓东,曾辉,等. 土地整理综合效益评价指标与方法[J]. 农业工程学报,2005,21(10):70-73.  
WANG W,YANG X D,ZENG H,*et al.* Method for comprehensive benefit evaluation of land consolidation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(10):70-73. (in Chinese)
- [7] 张心昱,陈立顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J]. 水土保持研究,2006,13(3):30-33.  
ZHANG X Y,CHEN L D. The progress and prospect of soil quality indicators and evaluation methods[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(3):30-33. (in Chinese)
- [8] 齐伟,张凤荣,牛振国,等. 土壤质量时空变化一体化评价方法及其应用[J]. 土壤通报,2003,34(1):1-5.  
QI W,ZHANG F R,NIU Z G,*et al.* An assessment method of soil quality: spatial-temporal changes and its application[J]. Chinese Journal of Soil Science,2003,34(1):1-5. (in Chinese)
- [9] 李新举,刘宁,张雯雯,等. 黄河三角洲土壤质量自动化评价及指标体系研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):145-148.  
LI X J,LIU N,ZHANG W W,*et al.* Evaluation index systems of soil quality in the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2007,15(1):145-148. (in Chinese)
- [10] 王军艳,张凤荣,王茹,等. 应用指数和法对潮土农田土壤肥力变化的评价研究[J]. 农村生态环境,2001,17(3):13-16,20.  
WANG J Y,ZHANG F R,WANG R,*et al.* Application of integrated fertility index method in evaluating changes in soil fertility [J]. Rural Eco-Environment,2001,17(3):13-16,20. (in Chinese)
- [11] 张雯雯,李新举,陈丽丽,等. 泰安市平原土地整理项目区土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2008,24(7):106-109.  
ZHANG W W,LI X J,CHEN L L,*et al.* Soil quality evaluation of plain land consolidation projects in Taian [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(7):106-109. (in Chinese)
- [12] 方晰,田大伦,谢荣秀. 湘潭锰矿矿渣废弃地植被修复前的土壤诊断[J]. 生态学报,2006,26(5):1494-1501.  
FANG X,TIAN D L,XIE R X. Soil physical and chemical properties of the wasteland in Xiangtan manganese mine[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(5):1494-1501. (in Chinese)
- [13] 王月玲,蔡进军,张源润,等. 半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J]. 水土保持研究,2007,14(1):11-14.  
WANG Y L,CAI J J,ZHANG Y R,*et al.* Soil physical and chemical properties during different ecological restoration or reconstruction in Semi-arid degraded mountain area[J]. Research of Soil and Water Conservation,2007,14(1):11-14. (in Chinese)
- [14] 阿守珍,卜耀军,温促明,等. 黄土丘陵区不同植被类型土壤养分效应研究[J]. 西北林学院学报,2006,21(6):58-62  
A S Z,BU Y J,WEN Z M,*et al.* Research on effect of different types of vegetation on nutrient changes in loess hilly region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(6):58-62. (in Chinese)
- [15] 叶彦辉,宋西德,张永,等. 黄土丘陵区林草景观界面土壤养分分布特征和空间变异性研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(3):1-6.  
YE Y H,SONG X D,ZHANG Y,*et al.* Distribution characteristics and spatial variability of soil nutrients at the forest-land-grassland interface in hilly region of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(3):1-6. (in Chinese)
- [16] 张源润,蔡进军,董立国,等. 半干旱退化山区坡改梯地土壤养分变异特征研究—以宁夏彭阳县为例[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(3):121-124.  
ZHANG Y R,CAI J J,DONG L G,*et al.* Research on variation characteristics of soil nutrient after slope land changed into the terrace in semi-arid degenerated mountainous area—taking Ningxia Pengyang Country as example [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,21(3):121-124. (in Chinese)
- [17] 周永斌,张飞,殷鸣放,等. 白石砭子自然保护区不同森林类型土壤化学性质与养分状况分析[J]. 中国农学通报,2010,26(11):118-122.  
ZHOU Y B,ZHANG F,YIN M F,*et al.* Analysis of the different forest types on soil chemical property and nutrient status in National Nature Reserve of Baishilazi [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(11):118-122. (in Chinese)
- [18] GUARNIERI A,FABBRI A,MOLARI G. Influence of sodicity and salinity on the mechanical properties of two Italian soils [J]. Bio-systems Engineering,2005,91(2):239-243.
- [19] 刘世梁,傅伯杰,吕一河,等. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J]. 生态学报,2003,23(3):414-420.  
LIU S L,FU B J,LU Y H,*et al.* Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope [J]. Acta Ecologica Sinica,2003,23(3):414-420. (in Chinese)