

## 广西凤山县退耕还林土壤效应及生态效益评价研究

牛辉, 庄嘉\*, 胡冬冬, 王倩, 招礼军 (广西大学林学院, 广西南宁 530005)

**摘要** [目的]为退化土壤的生态系统恢复与重建和石漠化治理提供依据。[方法]对广西凤山县土石山丘陵2种不同退耕还林类型(核桃、八角)进行调查,研究退耕林地0~40 cm 土层的理化性质,并以未退耕地(农田)作为对照。[结果]退耕还林10年后,退耕林地土壤剖面结构逐渐完善,土壤容重减小,总孔隙度、饱和含水量和田间持水量增大;土壤有机质含量增加16.6%;土壤有机质平均含量从大到小依次为八角、核桃、农田,土壤速效氮含量以大到小依次为八角、核桃;土壤全氮平均含量从大到小依次为核桃、八角。从拦蓄保护水资源价值与森林保持水土价值2个方面计算,凤山县退耕还林工程土壤生态效益价值超过2.8亿元。[结论]退耕还林的潜在价值巨大,所以有必要加强退耕还林工程的建设力度。

**关键词** 退耕还林;凤山县;土壤理化性质;生态效益

**中图分类号** S157.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)05-02054-04

### Evaluation of Soil Effects and Ecological Benefits of Returning Farmland to Forest in Fengshan County, Guangxi Zhuang Autonomous Region

NIU Hui et al (College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005)

**Abstract** [Objective]The research aimed to provide the basis for the recovery and the reconstruction of degraded soil ecosystem. [Method]The effects of two kinds of returning farmland to forest (walnut and star anise)on soil characteristics were investigated in mountain of rocky and hilly, Fengshan County, Guangxi Zhuang Autonomous Region. The physicochemical properties of the soils (0-40 cm) were studied, and the farmland was taken as contrast. [Result]The soil profile structure was gradually improved, the soil bulk density reduced, and the total porosity, saturated water content increased after returning farmland to forest. Meanwhile, the soil organic content increased by 16.6%. The average content of the soil organic showed star anise > walnut > farmland, and the average available nitrogen content showed star anise > walnut, and the total nitrogen content showed walnut > star Anise. The ecological benefit value was more than 0.28 billion yuan in protection of water resource and the value of soil and water conservation. [Conclusion]The potential value of returning farmland to forest was huge, so it was necessary to strengthen the construction force of the engineer of returning farmland to forest.

**Key words** Returning farmland to forest; Fengshan Country; Physicochemical property of soil; Ecological value

广西为典型的喀斯特地貌类型,特别是在桂西北地区,水土流失、石漠化十分严重,区域生态极为脆弱。土地石漠化往往是由农户对脆弱的生态环境不合理利用所造成<sup>[1-4]</sup>。随着退耕还林工程建设的推行,有关退耕还林林地土壤理化性质评价的研究逐渐成为热点课题。有研究表明,退耕还林可以改善土壤理化性质<sup>[5-8]</sup>。退耕还林还草后土壤结构得到改善,土壤养分在不同程度上得到恢复。但是,不同类型植被恢复对土壤理化性质的改善程度会有一定的差异。田昆等<sup>[9-11]</sup>研究表明,不同植被类型对土壤全量养分和速效养分的影响不同,对速效养分的影响更大些。以广西凤山县为例,笔者对凤山县退耕还林工程建设的土壤改良效果进行评价,有利于退化土壤的生态系统恢复与重建和石漠化治理,并且可为完善退耕还林工程的监测管理体系提供依据。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 凤山县地处广西西北部(24°15'~24°49'N, 106°45'~107°16'E) 盘阳河和拉英河流经境内。地势由西北向东南倾斜,山多地少,典型的喀斯特岩溶地貌,自然旅游资源异常丰富,70%面积为大石山区,30%面积为土山区,耕地面积6 781.73 hm<sup>2</sup>。该地区属亚热带季风气候区,雨量充沛,光照充足,温和湿润。该地区年平均气温20.1℃,年均降雨量1 564.0 mm,年均蒸发量1 209 mm,平均相对湿度为

80%以上,降雨量主要集中在4~9月,无霜期362 d。研究区内成土母岩主要有沙页岩、页岩、石灰岩等。土壤为砂岩发育的紅壤、黄壤,土层厚度1 m左右。主要恢复植被有八角(*Illicium verum*)、核桃(*Juglans regia*)、香椿(*Toona sinensis*)、油茶(*Camellia oleifera*)等。

**1.2 试验材料及标准样地设置** 试验地选在广西凤山县中部石山区的林龄为10年的不同林种的退耕还林地,其立地类型基本相同(坡向东南、坡度26°~29°,海拔高度843 m,土壤类型紅壤)。设置面积为400 m<sup>2</sup>(20 m×20 m)的标准样地,并以未退耕地(农田)作为对照。每种退耕还林地选取3个标准样地。在标准样地内按“S”形线路布设3个典型地段,挖取土壤剖面,对0~20和20~40 cm土层采集土样,同时用体积为100 cm<sup>3</sup>环刀采集原状土壤,分析土壤理化性质。

## 1.3 指标测定与方法

**1.3.1 土壤物理性质。**土壤的物理性质是评价土壤肥效水平的重要指标。其中,土壤孔隙分布是土壤基质最重要的特征之一,是土壤肥力的重要指标<sup>[12-14]</sup>。土壤孔隙状况可以用土壤总孔隙度、非毛管孔隙度和毛管孔隙度来表达。土壤毛管孔隙可以保持土壤中的水分。非毛管孔隙可以保持土壤的通气状况。总孔隙度则反映土壤孔隙容积的比例,是土壤的基本物理性质之一。采用烘干称重法,测定土壤含水量、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度。

**1.3.2 土壤化学性质。**土壤化学性质在同一时段的变化幅度可以用来作为反映植被因子等对土壤改良作用和速率的一个重要指标<sup>[5]</sup>。采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机质;采用重铬酸钾-硫酸消化-凯氏定氮法测定土壤全

**基金项目** 广西退耕还林工程建设效益监测(AE180056)。

**作者简介** 牛辉(1987-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向:森林生态与水土保持。\*通讯作者,副教授,硕士,硕士生导师,从事森林生态与水土保持方面的研究, E-mail: zzhj100@163.com。

**收稿日期** 2013-01-21

氮;采用氢氟酸-高氯酸消化-钼锑抗比色法测定土壤全磷;采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定全钾;采用碱解扩散法测定土壤速效氮;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷;采用乙酸铵浸提-火焰分光光度法测定土壤速效钾<sup>[16]</sup>。

**1.3.3 土壤生态效益价值计量评价方法。**凤山县实施退耕还林工程造林树种以核桃、八角、油茶和香椿等经济树种为主。退耕 10 年来,广西凤山县退耕还林工程发挥水土保持效益的价值核算林地累积总面积为  $1.45 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 森林覆盖率为 80.1%。

### 1.3.3.1 森林保护水资源价值( $W$ )。

(1)森林涵养水源价值( $W_1$ )。凤山县退耕还林林地贮水量可以用林地土壤非毛管孔隙饱和含水量来计算。李晶等<sup>[17]</sup>研究表明,退耕还林林地土壤蓄水  $492.75 \text{ t/hm}^2$ 。退耕还林地涵养水源价值可以采用影子工程法计算。影子工程法又称为替代工程法,即把森林涵养水源的价值等效于一个蓄水工程,而且该工程的价值是可以计算的,则该工程的修建费用可以替代为森林涵养水源价值。

(2)净化水质价值( $W_2$ )。凤山县退耕还林工程净化水质价值核算方法可根据拦蓄降水总量乘以单位水净化的成本来计算。污水净化费用采用国家污水处理的平均成本价。

**1.3.3.2 森林保持水土价值( $V$ )。**实施退耕还林工程建设后,经过林冠的截留、地表植被、林地土壤的良好渗透以及枯枝落叶层的防护,地表径流和雨水对土壤表层的冲刷力大大减弱,地表径流减弱,在一定程度上降低了土壤侵蚀对造林地的破坏和土壤肥力的丧失,减轻了泥沙对湖泊、河流的淤积。从林区森林资源的实际出发,在保持水土价值核算时森林面积应为现有退耕林地面积。

(1)减少泥沙淤积价值( $V_1$ )。结合我国主要江河泥沙运动的规律,全国一般土壤侵蚀流失的泥沙有 24% 左右淤积于水库、江河和湖泊。这在一定程度上相应地减少了库容。根据蓄水成本,计算减少泥沙淤积价值。

(2)减少土壤肥力损失价值( $V_2$ )。退耕还林后,水土保持作用使林地土壤受到的侵蚀程度大大降低,使水土流失得

到有效的控制,在一定程度上减少土壤肥力流失。因而,通过增加使用化肥的费用来代替土壤中的有机质和 N、P、K 等元素的价值,计算出减少土壤肥力损失价值。

根据土壤普查结果,得土壤中 N、P、K 的纯含量,分别换算成标准化肥尿素和磷酸二氢钾之量,再乘以相应的化肥价格。为了充分体现森林的水土保持效益,在森林价值核算中,对于减少土壤养分的计算,统一使用全量养分计算。减少土壤 N、P、K 肥力损失的价值可采用下式计算:

$$V_b = D \times S \sum P1_i \times P2_i \times P3_i$$

式中, $V_b$  为退耕林地保肥效益经济价值(万元); $D$  为单位面积水土流失量( $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ ); $S$  为退耕还林 10 年效益核算累积总面积( $\text{hm}^2$ ); $P1_i$  为森林土壤中氮、磷、钾含量(%); $P2_i$  为纯氮、磷、钾折算成化肥的比例; $P3_i$  为各类化肥的销售价( $\text{元}/\text{t}$ ); $D$  为退耕前土壤年侵蚀模数-退耕后年土壤侵蚀模数。

## 2 结果与分析

**2.1 不同退耕模式对土壤物理性质的影响** 退耕还林工程不同的植被恢复模式使土壤的物理性质变化不尽相同。采用 2 种退耕模式(八角和核桃),同时以未退耕的农田作为对照,对退耕林地的土壤容重、土壤孔隙度、饱和含水量和田间持水量等指标进行了比较。由表 1 可知,不同退耕模式土壤腐殖质层的平均厚度从大到小依次为八角、核桃、农田,表明实施退耕后,林地土壤的腐殖质层厚度有所增加,土壤 A 层有所发育。退耕还林后林地的非毛管孔隙度和总孔隙度分别增加了 4.9%、4.0%,含水量和持水量分别增加了 3.8%、3.5%;退耕地土壤容重大于对照组农田,说明土壤容重随着恢复年限的增长而降低,表层土壤变得疏松,容重开始下降;土壤孔隙度、土壤含水量和持水量均大于农田,表明退耕林地的土壤孔隙优于退耕农田;土壤含水量和土壤孔隙度增大,土壤透气性增强,土壤毛管持水能力增大,田间总持水量增加,土壤的物理性质也得到一定的改善。同时,土壤有机质的不断积累对土壤的孔隙状况和土壤持水量产生很大的影响。

表 1 不同退耕模式下各层次土壤物理性质的比较

退耕模式	土层 cm	腐殖质层 厚度//cm	容重 $\text{g}/\text{cm}^3$	孔隙度//%			持水量 %
				总孔隙度	非毛管	毛管	
八角	0~20	0.3	0.92	67.4	42.0	25.4	49.9
	20~40		1.21	60.6	47.5	13.1	39.1
核桃	0~20	0.2	0.96	69.8	44.5	25.3	47.1
	20~40		1.16	58.5	46.9	11.6	38.7
农田	0~20	0.1	1.14	56.1	32.9	23.2	40.8
	20~40		1.33	51.8	42.8	9.0	39.8

**2.2 不同退耕模式对土壤化学性质的影响** 有机质含量的增加可以在一定程度上增强林地土壤保肥和供肥能力,从而提高土壤养分的有效性。由图 1 可知,退耕 10 年后,不同恢复模式的林地土壤有机质含量不同,退耕地不同恢复模式有机质平均含量从大到小依次为八角、核桃、农田。2 种退耕

模式林地的有机质含量均有所增加,平均比农田增加 16.6%。这表明随着退耕年限的增长,林地的植物生长时间越长,土壤有机质积累越多,退耕林地的育土培肥的效果越好,退耕后林地土壤肥力得到很大程度上的改良。

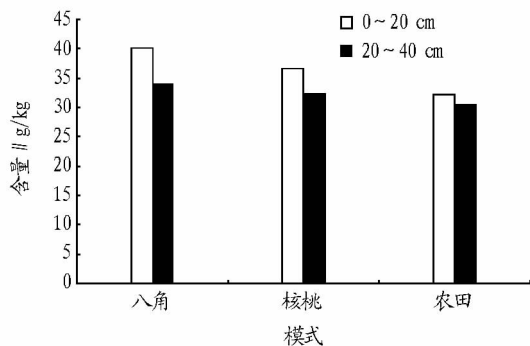


图1 不同退耕模式下各层次土壤有机质含量的变化

氮、磷和钾是树木生长发育所需要的三大基本营养元素。三者在土壤中的含量是表征土壤供给林木生长发育营养潜力的指标。土壤全氮90%左右来源于土壤有机质,所以土壤中全氮含量会随着土壤有机质含量的增加而增加,但是由于土壤中有机质类型和腐殖化程度的不同,其含量也不尽相同。由图2可知,土壤全氮平均含量从大到小依次为核桃、八角。由图3可知,不同退耕模式林地的土壤速效氮含量与全氮含量完全不同,核桃恢复模式林地的土壤全氮含量高于八角。这说明退耕后的核桃林地土壤有利于土壤全氮的矿化。这种现象主要是由于农田有人为持续的施肥干扰作用,而农田植被生长对土壤氮素消耗较大,且施肥甚微,以致农田的养分含量高于退耕还林后林地土壤养分含量。另外,在退耕初期,随着林分的生长,退耕林地土壤中被林草所吸收的养分也增加,使得林地全氮含量低于农田地。

从图3还可以看出,农田土壤速效氮含量很高,约为八角林地的2.0倍,是核桃林地的2.2倍左右。这与退耕林地全氮含量的高低顺序不同。八角林地的速效氮含量高于核桃林地,表明退耕后八角恢复模式有利于土壤矿化。2种恢复模式和农田土壤速效钾含量变化不大。土壤中速效钾含量不仅受土壤母质的影响,而且与植被、土壤水分的淋洗有

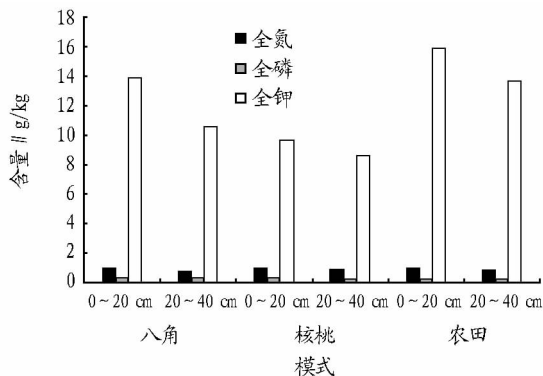


图2 不同退耕模式下各层次土壤全氮、全磷、全钾含量变化

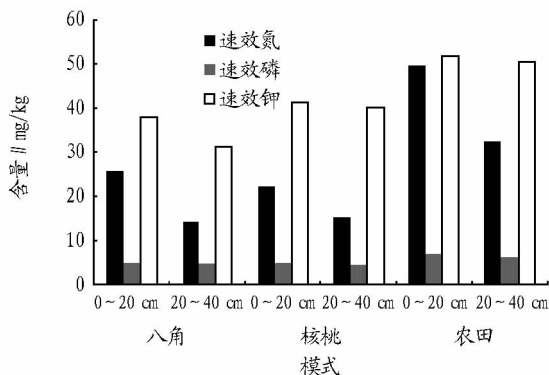


图3 不同退耕模式下各层次土壤速效氮、速效磷、速效钾含量变化

关,说明土壤速效钾的释放和植被呼吸基本平衡。

pH是土壤的重要化学性质。它主要通过土壤有机质的分解、矿质元素的有效状态等因素来影响土壤肥力。由表2可知,不同恢复模式的土壤pH从大到小依次为八角林地、核桃林地、农田,表明退耕后,随着退耕年限的增长,退耕林地土壤pH呈现下降趋势,说明实施退耕还林工程后,干扰减少,退耕林地的树木通过根系的呼吸作用以及枯枝落叶分解对降低林地土壤的pH起到很大的作用。

表2 不同退耕模式下各层次土壤化学性质比较

退耕模式	土层 cm	有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	全钾 g/kg	速效氮 mg/kg	速效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg	pH
八角	0~20	33.98	0.93	0.31	13.87	25.71	5.06	37.64	5.4
	20~40	40.13	0.75	0.28	10.54	14.33	4.79	31.32	5.6
核桃	0~20	36.58	0.97	0.27	9.61	22.26	4.96	41.33	5.5
	20~40	32.35	0.86	0.23	8.59	15.13	4.42	40.12	5.7
农田	0~20	32.11	0.94	0.24	15.85	49.83	6.91	51.78	8.2
	20~40	30.41	0.85	0.21	13.65	32.57	6.32	50.51	8.5

**2.3 退耕还林工程生态效益计量估算** 采用退耕林地土壤生态效益核算方法,得出林地拦蓄降水总量为7 144 875 t。根据目前1 m<sup>3</sup>库容需要投入成本费为5.714元<sup>[18]</sup>计算,W<sub>1</sub>=林地拦蓄降水总量×单位体积水价=4 082.58万元。国家污水处理的成本平均价为0.8元/m<sup>3</sup>,则W<sub>2</sub>=林地拦蓄降水总量×单位体积水的净化费用=571.59万元。所以,凤山县退耕还林林地拦蓄保护水资源总价值W=W<sub>1</sub>+W<sub>2</sub>=4 654.17万元。

减少的淤积量=减少的侵蚀模数×林地面积×24%,其

中,泥沙容重取值为1.65 t/m<sup>3</sup>,研究区域土壤侵蚀厚度为0.55 cm。因此,V<sub>1</sub>=减少的泥沙淤积体积×单位库容造价=182.28万元。根据市场上有机质平均价格为400元/t,可以求出土壤有机质的价值(V<sub>a</sub>)=水土保持林地生产有机物质的单价×水土保持林地土壤有机质总量=330.6万元。根据市场调查,目前尿素和磷酸二氢钾的市场价格分别为0.24万和0.57万元/t,折算成N、P、K化肥的比例分别为60/28、136/31、136/39,可以算出减少土壤N、P、K肥力损失的价值(V<sub>b</sub>)为23 431.28万元,则V<sub>2</sub>=V<sub>a</sub>+V<sub>b</sub>=23 761.88万元。所

以,森林保持水土价值  $V = V_1 + V_2 = 23\ 944.16$  万元。

### 3 结论

通过对广西凤山县 2 种退耕模式的林地和对照农田进行实地调查,分析林地土壤理化性质。在广西凤山县实施退耕还林工程后植被恢复过程中,林地土壤理化性质得到明显改善,林地土壤养分得到提高,土壤有机质、速效氮、速效钾、全氮、表层速效磷含量增加,土壤 pH 降低,氮的矿化能力增强。同时,土壤结构、水分状况得到改善,土壤肥力得到提高,并且促进土壤腐殖化和黏化过程的进行,林地土壤容重减小,总孔隙度、饱和含水量和田间持水量均得到提高。退耕 10 年来,林地土壤有机质含量比退耕前提高了 16.6%,林地土壤中的全氮和速效养分含量低于对照农田。之所以会出现这种现象,很大程度上与人为施肥有关。土壤环境综合指数得到改良,说明随着退耕年限的不断延续,现有退耕林地天然次生林地演替。

总的看来,土壤环境质量的恢复模式效益较好的是八角林地。八角林地土壤有机质含量和全氮含量最高,说明八角林地土壤养分具有较大的潜在含量;核桃林地速效氮含量、土壤孔隙度和持水量较高,则核桃林地土壤比较有利于速效养分的矿化;不同恢复模式的速效磷和速效钾差异表现不是很明显,总体上土壤速效养分含量的变化差异大于土壤全量元素。通过从森林涵养水源的价值和森林保持水土价值 2 个方面来对广西凤山县退耕还林工程土壤生态效益进行计量核算,其生态效益价值约 2.86 亿元。因此,退耕还林的潜在价值是巨大的。政府有必要继续加强退耕还林工程的建设力度。

### 参考文献

[1] SARA B,ZHAO X Y.Rural reform and changes in land management and attitudes:A case study from Inner Mongolia,China[J].AMBIO,2002,31:219-225.

(上接第 2046 页)

和残渣态 Cd 显著升高。生物质炭的施用在改良土壤的同时,促进了可利用 Cd 向难以利用 Cd 的转化。同时,生物质炭是一种优良的土壤改良剂和 Cd 稳定剂,在修复重金属污染方面有很大潜力。

### 参考文献

[1] 王夔.生命科学中的微量元素[M].北京:中国计量科学出版社,2005:56-58.  
 [2] 国家环境保护总局.中东部地区生态环境现状调查报告[J].环境保护,2003,26(8):3-8.  
 [3] 周云龙,王艳,郑麻木.从农产品质量安全看土壤学研究亟待加强的领域[J].世界农业,2008(11):14-17.  
 [4] DUDKA S,MILLER W P.Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfers to human chain[J].J Environ Sci Health,1999,84(4):691-708.  
 [5] 张石棋,傅瓦利,袁波,等.北碚区菜地表层土壤镉的环境地球化学基线与污染程度研究[J].水土保持学报,2012,26(5):186-189.  
 [6] 王玲,王发园.从枝菌根对镉污染土壤的修复研究进展[J].广东农业科学,2012,1(2):51-53.  
 [7] 王林,徐应明,孙国红,等.海泡石和磷酸盐对镉污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J].生态环境学报,2012,21(2):314-320.

[2] HU W. Household land tenure reform in China:it's impact on farming land use and agro-environment[J]. Land Use Policy,1997,14:175-186.  
 [3] FAN S Y,ZHOU L H. Desertification control in China:Possible solution[J]. AMBIO,2001,30:384-385.  
 [4] 宋乃平,张凤荣,李保国,等.禁牧政策及其效应解析[J].自然资源学报,2004,19(3):316-323.  
 [5] 张彦仁,荀素娟,韩恩贤,等.不同退耕还林模式林木生长量及土壤养分的变化[J].陕西林业科技,2007(4):15-17.  
 [6] 李文忠,贺永元,张伟华,等.北川河流域退耕还林(草)对土壤质量影响的评价[J].水土保持研究,2005,12(6):1-3.  
 [7] 罗龙海,胡庭兴,万雪琴.全天县几种退耕还林类型林地土壤理化性质年际动态变化研究[J].浙江林业科技,2006,26(1):18-21.  
 [8] 李生,张守攻,姚小华,等.黔中石漠化地区不同土地利用方式对土壤环境的影响[J].长江流域资源与环境,2008,17(3):384-389.  
 [9] DORMAAR J F,SOMLIAK L.Recovery of vegetative cover and soil organic matter during revegetation of abandoned farmland in a semiarid climate[J]. Journal Range Management,1985,38:487-497.  
 [10] 田昆,RICHTER D D,HEINE P R,等.退耕还林 40 年来森林土壤氮库营养的动态变化研究[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(2):241-247.  
 [11] 焦峰,温仲明.黄土丘陵区退耕地土壤养分变异特征[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):724-730.  
 [12] 杨玉盛,俞新妥,邱仁辉.栽杉留阔模式生产力和土壤肥力的研究[J].林业科学,1999,35(4):9-13.  
 [13] 李文忠,张伟华,张昊,等.青海大通不同退耕还林时间梯度对土壤物理性状的影响[J].干旱区资源与环境,2005,19(3):137-140.  
 [14] 张伟华,李文忠,张昊,等.青海大通退耕还林不同混交配置模式对土壤肥力影响的研究[J].水土保持研究,2005,12(5):259-262.  
 [15] 罗龙海,胡庭兴,万雪琴,等.全天县几种退耕还林类型林地土壤理化性质年际动态变化研究[J].浙江林业科技,2006,26(1):18-22.  
 [16] 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.  
 [17] 李晶,任志远.秦巴山区植被涵养水源价值测评研究[J].水土保持学报,2003,17(4):132-134.  
 [18] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态环境需水量理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2003.  
 [19] 杨万盈.汉江流域安康区退耕还林不同生物生产状况及水土保持情况分析[J].内蒙古农业科技,2011(3):28-30.  
 [20] 何惠琴,李绍才,吴勇刚.四川省宜宾市退耕还林现状及后续产业发展对策[J].畜牧与饲料科学,2010,31(1):108-110.

[8] CUI L,PAN G,LI L,et al.The reduction of wheat Cd uptake in contaminated soil via biochar amendment:A two-year field experiment[J]. Bioresources,2012,7(4):5666-5676.  
 [9] CUI L,LI L,ZHANG A,et al.Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil:A two-year field experiment[J]. Bio Resources,2011,6(3):2605-2618.  
 [10] RAURET G,LÓPEZ-SA'NCHEZ J F,SAHUQUILLO A U,et al.Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of Environmental Monitoring,1999,1(3):57-61.  
 [11] 龚子同.中国土壤系统分类[M].北京:科学出版社,1999:109-192.  
 [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:科学出版社,2000:205-226.  
 [13] 张良运,李恋卿,潘根兴.磷、钾肥处理对降低污染稻田水稻籽粒 Cd 含量的影响[J].生态环境学报,2009(3):909-913.  
 [14] 李瑞美,方玲,王果,等.重金属污染土壤的有机-中性化修复技术试验[J].福建农业学报,2004,19(1):50-53.  
 [15] PEIJNENBURG W,BAERSELMAN R,DE GROOT A,et al.Quantification of metal bioavailability for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils[J]. Environmental Contamination and Toxicity,2000,39:420-430.  
 [16] 史静,李正文,龚伟群,等.2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化:品种、土壤和 Cd 处理的影响[J].生态毒理学报,2007,2(1):32-40.