

红壤侵蚀退化地不同生态恢复措施对土壤养分影响研究^{*}

黄少燕

(1. 福建师范大学 地理研究所, 福州 350007; 2. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007)

摘 要: 以长汀县河田红壤严重侵蚀退化地为研究区, 通过野外调查和室内分析, 探讨了不同生态恢复措施对红壤侵蚀退化地土壤养分的影响。结果表明: 采取 6 种生态恢复措施之后, 改善了土壤的养分状况, 土壤有机质、全氮、全磷含量较对照都有明显的提高, 其中乔灌木混交、生态果园措施对提高土壤有机质和全氮的效果最好, 条沟+ 草灌措施对提高全磷的效果较好; 条沟+ 草灌措施和施肥治理措施对提高土壤全钾含量有一定效果; 统计分析表明, 不同生态恢复措施对土壤养分的改善效果大小顺序为: 乔灌木混交> 条沟+ 草灌> 生态果园> 全坡面播草> 封禁> 施肥措施。

关键词: 红壤侵蚀退化地; 生态恢复措施; 土壤养分

中图分类号: S157; S153.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0038-05

Effects of Different Ecological Restoration Measures on Soil Fertility in Red Soil Eroded Degradation Land

HUANG Shao-yan

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Fuzhou 350007, China)

Abstract: This paper chooses Hetian town as the study area, which is the serious red soil eroded degradation ground in Changting county. By the means of field investigation and laboratory analysis, the paper studied the effects of soil fertility in red soil eroded degradation land under different ecological restoration measures. The results show that: the soil fertilities were improved after adopting the six kinds of ecological restoration measures. Soil organic matter, total N, total P was improved obviously by comparison of normal control. The best effects of improving organic matter and total N are the measures of the mixed plantation of tree, shrub and grass and ecological orchard. Plantation of grass and shrub in ditches can make better effect on improving soil total N; the measures of plantation of grass and shrub in ditches and fertilization have certain effects of improving soil total P. By statistical analysis, the order of the effects of improving soil fertility in the different ecological restoration measures is the mixed plantation of tree, shrub and grass> plantation of grass and shrub in ditches> ecological orchard> plantation grass on total slopeface> forsook> fertilization.

Key words: red soil eroded degradation land; ecological restoration measures; soil fertility

南方红壤地区总面积 218 万 km², 占全国土地面积的 22.7%^[1], 红壤区已成为我国水土流失范围最广、程度较高的地区, 其严重程度仅次于黄土高原^[2], 红壤的侵蚀退化已成为限制这一地区农业持续发展的障碍因素, 严重威胁着区域生态环境和可持续发展^[3]。

福建省长汀县是我国典型的花岗岩红壤侵蚀区, 长期的水土流失导致生态环境恶化, 山地植被稀疏, 表土冲刷殆尽, 砂砾满坡, 土壤肥力极差, 干热化程度异常, 人工马尾松生长极为缓慢, 植被自然恢复相当困难, 土壤处于逆向演替过程中, 生态系统极为脆弱^[4], 严重制约着当地生态环境和社会经济的可持续

^{*} 收稿日期: 2009-03-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2007CB407207); 国家自然科学基金项目 (40571095); 福建省自然科学基金项目 (D0810008)

作者简介: 黄少燕 (1960-), 女, 福建省泉州市人, 工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

发展,引起许多学者的关注。20 世纪 80 年代初,省政府就组织八大单位联合攻关,为了彻底根治河田的水土流失,2000 年起福建省委、省政府将“以长汀为重点的水土流失综合治理”列为为民办实事项目之一,开展了新一轮的大规模水土流失治理,加大了水土流失治理力度,实行以生物措施为主,工程措施和农业技术措施为辅,采取了以草灌先行,乔灌草结合,以封为主,封、造、管结合等多种措施进行水土保持生态恢复工作,使长汀的水土流失得到初步控制,退化生态系统得到一定程度的恢复^[5-6],取得了阶段性成果。土壤养分是评价生态恢复措施效应的重要指标,在生态恢复研究中广泛使用。因此,本文通过对长汀红壤严重侵蚀退化地采取封禁、条沟+ 草灌、施肥、全坡面播草、生态果园、乔灌草混交 6 种生态恢复措施的土壤养分状况进行研究,以揭示不同生态恢复措施对土壤养分的影响,旨在为南方红壤区严重侵蚀退化地的治理及生态恢复提供重要的科学参考依据。

1 研究区概况

实验地位于长汀县河田镇,河田处于长汀县东南,东经 116°18′- 116°31′,北纬 25°33′- 25°48′,属中亚热带海洋性季风气候向南亚热带过渡性气候。年均气温 19℃,7 月份极端最高气温 39.8℃,地表

极端最高温达 76.6℃;年均降水量 1 628.2 mm,其中 4- 6 月降雨量占全年的 52.2%,且降雨强度大;土壤为花岗岩风化发育的山地丘陵红壤,含砂量大(> 1 mm 石砾占 41% 左右),风化层深厚;现有植被主要是马尾松、灌丛及荒草坡等人工植被和次生植被。由于长期的土壤侵蚀,大部分表土层丧失殆尽,区内严重侵蚀退化“老头松”林地广布,植被恢复难度大。

2 试验材料与方法

2.1 样地布设

选取土壤类型、地貌、母质相近的严重侵蚀退化地作为实验区,试验地土壤侵蚀严重,土壤层露出,立地条件差,植物以马尾松小老头树和少量芒萁及野古草为主,地表近于光板地,部分马尾松根系裸露。试验共设 7 种处理,包括 6 种不同生态恢复措施区和 1 个对照区。6 种生态恢复措施分别为封禁(Ⅰ)、条沟+ 草灌(Ⅱ)、施肥(Ⅲ)、全坡面播草(Ⅳ)、生态果园(Ⅴ)、乔灌草混交(Ⅵ),其中乔灌草混交措施于 1982 年实施,其余治理措施于 2001 年实施。2007 年进行野外调查和采样,在每项措施试验地上设置标准地,标准地面积 20 m×20 m。7 种处理样地的情况见表 1。

表 1 不同措施样地基本情况

处理 编号	措施	坡度/ (°)	覆盖度/ %		侵蚀程度		措施处理
			治理前	治理后	治理前	治理后	
I	封禁	17	21	76	极强度	轻度	封禁和补植措施,然后自然生态恢复
II	条沟+ 草灌	15	17	82	极强度	微度	沿等高线布设条沟,种植草灌,沟上宽 50 cm,下宽 30 cm,深 30 cm,沟长 4 m,沟间距 3 m,呈品字形排列。
III	施肥	19	18	68	极强度	轻度	在马尾松树冠投影的上坡挖穴施肥,每穴施入复合肥 0.25 kg,后覆土踩实。
IV	全坡面播草	15	16	90	极强度	微度	松土散播百喜草,不整地前三年每年追肥 1 次,其后不再进行管理,自然生长。
V	生态果园	13	15	70	极强度	微度	将侵蚀劣地改造成标准梯田,形成“前埂后沟”形。在埂及梯壁上种植百喜草。
VI	乔灌草混交	16	17	93	极强度	微度	小水平沟整地,面宽 0.6 m,深 0.4 m,底宽 0.4 m,沟内种枫香、胡枝子宽叶雀比樟,施底肥。
CK	对 照	17	18	25	极强度	极强度	没有采取任何措施的侵蚀退化地

2.2 研究方法

土壤样品采集: 2007 年 9 月 10 日在已设置的 7 个试验地进行土壤样品采集,在标准样地内选取具有代表性的部位,调查取样点的植被种类、覆盖度、生物生长量等,挖取土壤剖面,分层(0- 10 cm,10- 20 cm,20- 40 cm,40- 60 cm)取样,记录各剖面层次的颜色,根系分布等,按多点采样的原则取同剖

面,同深度层不同点的土样,把土样混合分取 1 kg 左右,同时分别在每个标准地的上、下坡位采用 S 型布点法取(0- 20 cm)的土样,分别放入聚乙烯袋中,带回实验室后将土壤风干、研磨过筛,进行土壤养分的测定。
土壤有机质: 重铬酸钾- 浓硫酸氧化法;土壤全氮: 凯氏定氮法;土壤全磷: 氢氧化钠熔融- 钼锑抗

比色法;土壤全钾:氢氧化钠熔融-火焰光度计法;pH 值:采用 pH 计测定^[7]。

运用 SPSS 软件进行相关性分析和主成分分析。对不同治理措施和对照地的上下层土壤化学特性进行 *t* 检验,分析各化学特性在垂直空间变化上差异是否显著;变量之间的相关分析以皮尔逊相关系数表达,以了解变量之间的关联程度;主成分分析可以直观地比较不同治理措施的效益。

3 结果与讨论

3.1 不同生态恢复措施对土壤有机质的影响

土壤有机质是评价土壤质量的一个重要指标,它既是植物矿质和有机营养的源泉,又是土壤微生物的能源物质。它不仅能增加土壤的保肥和供肥能力,提高土壤养分的有效性,而且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,增加土壤的抗蚀性等。

从图 1 可以看出,未采取任何措施的侵蚀退化地(对照)的土壤有机质含量最低,0-10 cm 层含量仅 3.60 g/kg,而且上下层之间的变化不大。但是采取不同的生态恢复措施后,各层土壤有机质含量均有不同程度的提高。尤其是表层土壤有机质含量增加较为明显。其中处理 I、II、III、IV、V、VI 表层(0-10 cm)土壤有机质含量分别是对照(CK)的 2.75 倍、4.13 倍、2.75 倍、3.72 倍、5.07 倍、5.50 倍。有机质含量最高的是乔灌木混交措施(VI),表层含量达到 19.8 g/kg,且各土层的有机质含量都比较高。该措施应用生物多样性原理,经过 20 多年的恢复,建立起了立体生态系统,对土壤有机质有显著的增加。林地枯落物的增加,有效地补充土壤有机质来源,也促进植物的生长,使侵蚀退化地逐渐向良性方向发展。

生态果园措施和条沟+草灌措施的土壤有机质含量也有显著提高,分别比对照高 407% 和 313%。有研究表明^[8],果园覆草使土壤中的转化酶与脲酶活性增大,加速秸秆的转化及有机物的代谢,使土壤中的速效养分增加。另外地表覆盖稻草起到对雨滴的缓冲作用,土壤侵蚀强度减弱,同时增加了土壤有机质的含量。可以发现植被对土壤有机质的提高和稳定起着至关重要的作用,一方面植物残体通过凋落物、残根以及根的分泌物和脱落物等被微生物分解进入土壤转变成有机质;另一方面土壤养分能够直接供应林木生长发育。

从剖面土壤有机质看(图 1),侵蚀退化地(CK)剖面土壤有机质含量为 1.37~3.60 g/kg,其剖面垂直分布上变化不大。但是通过治理后各项措施表

层(0-10 cm)土壤有机质含量均明显大于下层(10-60 cm),土壤有机质主要集中在 0-20 cm,约占 0-60 cm 土层的 65% 以上,说明土壤有机质主要来源于地被物。不同生态恢复措施的土壤有机质在剖面垂直分布上也存在着差异,其中乔灌木混交措施提高最明显,整个剖面(0-60 cm)各土层的土壤有机质含量均大于对照,各土层土壤有机质含量分别是对照的 5.5 倍、2.9 倍、4.9 倍、7.6 倍。生态果园措施各土层有机质含量也有一定提高。条沟+草灌、施肥和全坡面播草三种措施对心土层有机质的改善作用则不明显。

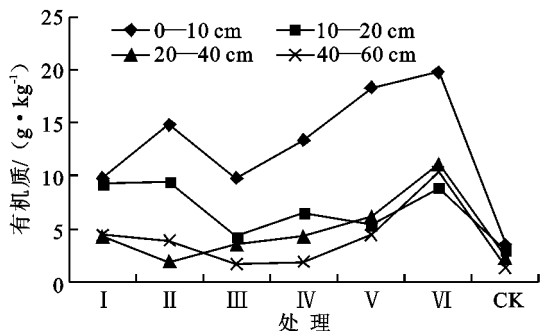


图 1 不同治理措施有机质含量比较

3.2 不同生态恢复措施对全氮的影响

土壤全氮包括所有形式的有机和无机氮素,是标志土壤氮素总量和供应植物有效氮素的源和库,综合反映了土壤的氮素状况^[9]。土壤中氮是生物作用的结果,随死亡的有机体进入土壤,以有机形态储存起来,成为植物生长必需的大量元素之一,并对土壤肥力产生深刻的影响。因此氮素与有机质的关系较为密切。

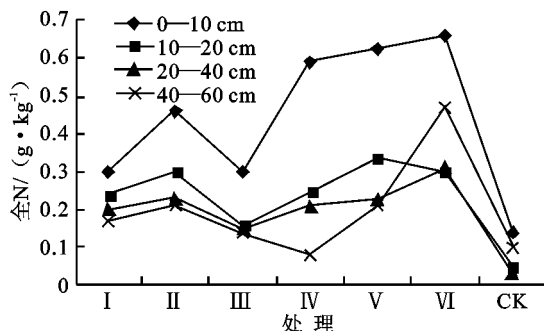


图 2 不同治理措施全 N 含量比较

从图 2 看出,采取不同治理措施后对土壤全氮含量都有所提高,表层土壤含氮量达到 0.3 g/kg 以上。其中乔灌木混交、生态果园、全坡面播草三项措施表层土壤全氮含量较高,分别是对照的 4.7 倍、4.5 倍、4.2 倍。这与乔灌木混交林地在长达 20 余年的恢复过程中,植被已得到良好的覆盖;果园开发治理,每年有丰富的枯枝落叶补充土壤养分有关;全坡面播种百喜草措施表层土壤全氮含量较高,这主要

是因为地表覆盖率达 90% 以上,有效阻止了氮素的流失。

比较各措施剖面的全氮含量可以看出,各措施的表层土壤全氮含量高于下层,土壤全氮含量在各剖面土层的大小顺序为: 0- 10 cm 表土层 IV> V> VI> II> III> I; 20- 40 cm V> VI> II> I> III; 20- 40 cm IV> V> VI> I> III> II; 40- 60 cm IV> V> I> III> II> VI。乔灌木混交和生态果园措施各土层的全氮含量较其它措施高,各土层全氮含量是对照的 5 倍左右,效果明显。封禁和施肥措施各土层的全氮含量均有较小提高。

3.3 不同生态恢复措施对全磷影响

磷素是一种沉积型矿物,在植物需要的各种营养元素中,磷在风化壳中的迁移是最小的。磷素的风化、淋溶、富集、迁移是成土过程中各种元素共同作用的结果。在成土过程中,生物的富集、迁移是磷素累积的主导性因素。土壤全磷含量主要受到母质中的矿物成分、土壤质地、剖面层次及耕作管理措施等因素影响。土壤对磷的固定作用是红壤地区磷肥肥效降低的主要原因,也是土壤磷素肥力退化的主要标志。土壤全磷主要闭蓄在细小的土壤黏粒中^[10],如强度侵蚀退化地的 0- 20 cm 土壤全磷含量不到 0.04 g/kg,这与表层细小黏粒的流失有很大关系。

土壤全磷含量在不同处理之间的差异较明显,由图 3 可以看出,通过恢复治理,土壤的全磷含量都得到不同程度的增加。表层土壤全磷含量较多的是处理 II 和 V,分别为 0.130 g/kg、0.159 g/kg。各项措施土壤剖面全磷含量平均值大小顺序为: VI> V> II> I> IV> III。乔灌木混交措施土壤中全磷含量平均值最高,是对照的 4.3 倍,施肥措施的全磷平均含量仅是对照的 110%。

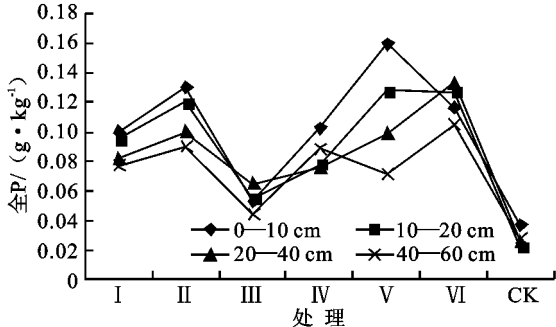


图 3 不同治理措施全 P 含量比较

从不同措施剖面土壤全磷含量看,侵蚀劣地表层和底层基本相同,变化范围只有 0.015 g/kg,整体含量最低只有 0.028 g/kg。采取治理措施后各层土壤全磷含量有所提高,但是没有明显的层次性。只有条沟+ 草灌与生态果园措施中土层全磷含量表现出从

表层到底层逐渐较少的趋势,土壤全磷含量的差异可能主要是来自于地表植被和人为因素。总体来说,治理措施对提高土壤磷素是有一定的作用的,其中条沟+ 草灌措施对土壤全磷含量的影响最为显著。

3.4 不同生态恢复措施对全钾影响

土壤钾元素是植物光合作用、淀粉合成和糖的转化所必需的元素,它能促进碳水化合物的合成和转运,增强植物茎秆的强度,增加植物抗病能力和增强根系的作用。一般来说,由花岗岩发育的红壤、赤红壤的黏土矿物以高岭石为主,而水云母和蛭石的含量较低,因此这些土壤没有显著的固钾能力。

本研究的实验地是花岗岩母质发育而成的红壤,全钾含量普遍较低(图 4),采取生态恢复措施后,土壤中全钾含量都有所增加,但效果各异。全钾含量较高的治理措施是条沟+ 草灌和施肥措施,其土壤中全钾平均含量分别是对照(CK)的 3.2 倍和 2.6 倍。生态果园治理后全钾含量与对照相当,乔灌木混交与封禁措施的土壤中全钾平均含量也只会比对照分别高 30%,41%。同时也有四种处理与对照的全钾含量差异不大,其中有 2 个处理的土壤全钾含量低于对照,可见治理措施对土壤全钾含量的影响不确定。

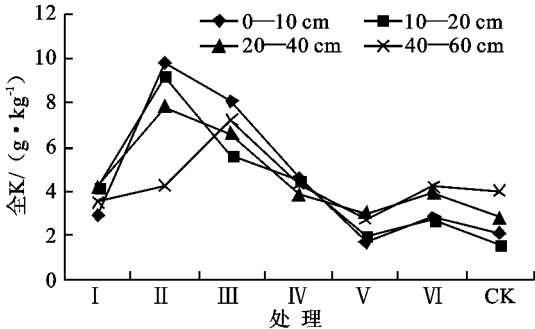


图 4 不同治理措施全 K 含量比较

对比不同措施的剖面土壤的全钾含量变化,6 种措施内随着土层深度的变化其土壤的全钾含量变化不明显。对不同措施土壤全钾垂直空间变异用 SPSS 进行 t 检验,结果表明: 6 种措施全钾含量在垂直空间变化上差异不显著。

3.5 不同生态恢复措施对 pH 值影响

土壤酸碱性的形成决定于盐基淋溶和盐基积累过程的相对强度,受母质、生物气候及农业措施等条件的制约,它是土壤肥力的重要影响因子之一。土壤 pH 值的变化直接影响着土壤中营养元素的存在状态和有效性,而且还能影响土壤离子交换、运动、迁移和转化及土壤微生物的活性等。

由图 5 可看出,各治理措施与对照的土壤 pH 值为 4.3~ 4.8,均小于 5.6,属于酸性土壤。处理

I、III、IV、V 各层土壤 pH 平均值都是 4.5, 比对照的平均值低了 0.2, 处理 II 各土层 pH 值的平均值为 4.8, 处理 VI 各土层 pH 值的平均值为 4.3, 说明除条沟+ 草灌(II) 治理措施外, 通过其它措施的治理都使得土壤 pH 值下降。生态果园开发治理和乔灌草混交措施表层土壤 pH 值只有 4.1。

从土壤剖面 pH 垂直分布看, 土壤表层 pH 值最低, 土壤剖面 pH 值具有从表层到下层逐渐增大的趋势。这可能是由于土壤剖面 0– 20 cm 层最先接受酸沉降和土壤有机质分解带来的 H^+ , 因而土壤 pH 值最低, 但由于表层土壤同时是营养元素的最大受益者(通过枯枝落叶分解而得), 所以在 pH 值低的情况下, 同时拥有相对较高的养分含量, 土壤仍然具有一定的酸缓冲能力^[11]。

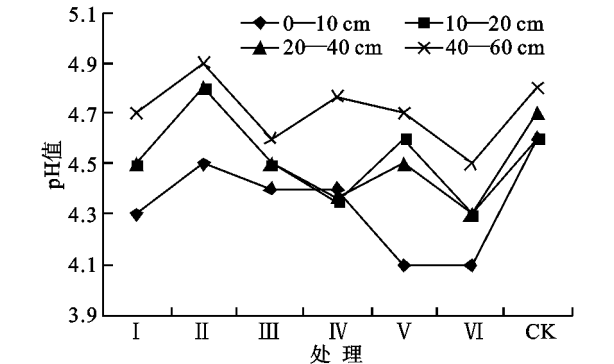


图 5 不同恢复措施 pH 值变化特征

3.6 土壤养分特性的统计分析

对各项土壤养分进行相关分析, 结果见表 2, 从表中可以看出各大部分土壤养分指标之间具有相关性, 有机质、pH 值、全氮和全磷之间的相关性极显著, 而全钾与其它指标的相关性不明显。为了更好地认识各种治理措施的特点, 对各项土壤养分指标进行主成分分析, 结果见表 3 和表 4。

由表 3 知, 因子 1 和因子 2 的累计贡献率达 71.66%, 基本上可以反映各项土壤养分指标的信息和各种治理措施的特点。由表 4 可以看出在因子 1 上, 有机质、全氮、全磷和 pH 值都具有较高的载荷, 且全氮、全磷、pH 值都与有机质有较高的相关性。因此, 因子 1 可认为是“有机质因子”。而全钾在因子 2 上有较高的正载荷, 所以因子 2 可认为是“全钾因子”。

通过主成分分析, 将指标归结为两个因子, 不同治理措施下土壤养分的差异可以通过两个因子值综合体现出来。由以上分析可知, 有机质因子越大, 则全氮、全磷越高; 全钾因子越高, 则全钾越高。因此, 通过这两个因子的综合分析比较可以发现乔灌草混交、条沟+ 草灌和生态果园措施的效果较好, 全坡面种草的效果次之, 封禁和施肥措施的效果一般。

表 2 不同措施土壤养分指标的相关性

统计项	变量	全 K	有机质	pH 值	全 N	全 P
相关系数	全 K	1.000	0.259	0.047	0.197	0.209
	有机质		1.000	- 0.687	0.490	0.551
	pH 值			1.000	- 0.417	- 0.414
	全 N				1.000	0.372
	全 P					1.000
P 值	全 K		0.009	0.337	0.036	0.028
	有机质			0.000	0.000	0.000
	pH 值				0.000	0.000
	全 N					0.000
	全 P					

表 3 不同恢复措施土壤养分指标主成分分析的特征值与负荷量

主成分	特征值	负荷量/ %	累计贡献量/ %
1	2.543	50.860	50.860
2	1.040	20.795	71.655
3	0.633	12.665	84.320
4	0.542	10.840	95.160
5	0.242	4.840	100.000

表 4 不同措施土壤养分指标主因子载荷

指标	因子 1	因子 2
有机质	0.888	- 0.042
pH 值	- 0.776	0.445
全 P	0.739	0.076
全 N	0.710	0.053
全 K	0.317	0.912

4 结 论

(1) 采取 6 种生态恢复措施之后, 改善了土壤的养分状况, 土壤有机质、全氮、全磷含量较对照都有明显的提高, 其中乔灌草混交、生态果园措施对提高土壤有机质和全氮的效果最好, 条沟+ 草灌措施对提高全磷的效果较好; 条沟+ 草灌措施和施肥治理措施对提高土壤全钾含量有一定效果。

(2) 经过统计分析, 提取出影响不同措施恢复效益的主成分, 得出了不同生态恢复措施对土壤养分的改善效果大小顺序为: 乔灌草混交> 条沟+ 草灌> 生态果园> 全坡面播草> 封禁> 施肥措施。

(3) 对于南方花岗岩红壤严重侵蚀退化地的生态恢复, 应该采取乔灌草混交或条沟+ 草灌等生物与工程相结合的人工干预强化治理措施, 才可以取得良好的生态恢复效果。

表 4 2000 年山东省土壤侵蚀强度与土壤侵蚀敏感性面积关系

km²

敏感类型	水 蚀						风蚀	工程侵蚀
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	轻度	
不敏感	66144.95	1574.24	2998.92	2099.04	360.76	37.80	1898.56	7.04
轻度敏感	32688.39	2216.48	3463.32	2368.84	564.28	65.16	853.08	7.12
中度敏感	18309.85	1535.68	2159.24	1346.08	404.32	44.04	390.84	5.52
高度敏感	5638.63	1025.44	1191.68	659.40	202.20	26.24	60.76	4.76
极敏感	4693.53	427.96	778.92	421.76	134.40	32.84	51.20	6.72
合 计	127475.35	6779.80	10592.08	6895.12	1665.96	206.08	3254.44	31.16

表 5 山东省不同土壤侵蚀敏感类型发生土壤侵蚀的概率

%

敏感类型	侵蚀强度类型									
	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	极强度及剧烈	强度及以上	中度及以上	工程侵蚀
不敏感	88.05	4.62	3.99	2.79	0.48	0.05	0.53	3.32	7.32	0.01
轻度敏感	77.41	7.27	8.20	5.61	1.34	0.15	1.49	7.10	15.30	0.02
中度敏感	75.67	7.96	8.92	5.56	1.67	0.18	1.85	7.42	16.34	0.02
高度敏感	64.01	12.33	13.53	7.49	2.30	0.30	2.59	10.08	23.61	0.05
极敏感	71.69	7.32	11.90	6.44	2.05	0.50	2.55	9.00	20.89	0.10

5 结 论

采用遥感和 GIS 相结合技术, 显示了以像元数据为基础的定量计算方法的可行性。同传统方法相比, 其突出特点为: 综合评价模型包容了土壤侵蚀的 4 个主导因素, 人为定级的主观影响较小; 遥感和 GIS 技术相结合, 确保了方法的科学性和可操作性, 评价结果克服了以往调查结果与治理规划相脱节的现象。

结果显示, 山东省存在不同程度的土壤侵蚀敏感性。其中以不敏感及轻度敏感程度为主, 轻度敏感占全省总面积的 26.91%; 中度及中度敏感以上占总面积的 25.21%。全省土壤侵蚀极敏感和高度敏感地区, 主要分布在鲁中南山区、胶东低山丘陵区 and 黄泛平原区。从全省 17 市轻度及轻度以上敏感性面积占该市总面积比重上来看, 莱芜市比重最高,

为 55.94%, 其它市的比重一般在 16%~ 36% 之间。加强植被建设和发展生态农业是这些地区有效防止水土流失和促进态环境保护的重要手段。

参考文献:

[1] 国务院西部地区开发领导小组办公室, 国家环境保护总局. 生态功能区划暂行规程[S]. 2002.

[2] 莫斌, 朱波, 王玉宽, 等. 重庆市土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5) : 45-48.

[3] 孙秀美, 孙希华, 冯军华. 沂蒙山区土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3) : 84-87.

[4] 杨广斌, 李亦秋, 安裕伦. 基于网格数据的贵州土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1) : 73-78.

[5] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(上接第 42 页)

参考文献:

[1] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6) : 284-286.

[2] 莫江明, Brown S, 彭少麟, 等. 林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用[J]. 生态学报, 2002, 22(9) : 1407-1413.

[3] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2) : 118-125.

[4] 卢程隆, 杨人群. 福建长汀河田土壤侵蚀的研究(I) [J]. 福建农学院学报, 1981, 10(2) : 39-48.

[5] 杨学震, 钟炳林, 谢小东, 等. 丘陵红壤的土壤侵蚀与治理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 87-95.

[6] 王维明, 陈明华, 林敬兰, 等. 长汀县水土流失动态变化及防治对策研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4) : 73-77.

[7] 杜森, 高祥照. 土壤化学分析技术规范[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 65-68.

[8] 姚胜蕊, 薛炳烨. 多年连续覆草对果园土壤的综合效应研究[J]. 落叶果树, 1998(3) : 1-2.

[9] 孙波, 赵其国. 土壤质量与持续环境: III. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, 29(5) : 225-234.

[10] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environmental in theY-anguangou catdment in the Loess Plateau of China [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3) : 244-246.

[11] 张辉. 土壤环境学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 38-39.