

中国南方红壤丘陵马尾松林下侵蚀坡面的土壤特性

汪邦稳¹, 夏小林¹, 段剑²

[1. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088;
2. 江西省水土保持科学研究院 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029]

摘要: [目的] 探清土壤侵蚀对土壤分布与特性的影响机制, 为防治该地区的林下水土流失和土地退化提供科学依据。[方法] 基于调查取样和分析测试获取的数据, 采用统计和灰色关联度等方法分析红壤丘陵区马尾松林地侵蚀坡面的土壤特性。[结果] 红壤丘陵区马尾松林地侵蚀坡面土壤养分相对较低, 理化指标基本处于 4 级以下水平; 红壤丘陵区马尾松林地侵蚀沟的土壤指标与坡面土壤的相应指标存在显著性差异, 18 个土壤指标中, 侵蚀沟的土壤有 10 个指标显著优于坡面土壤的相应指标, 侵蚀沟与土壤特性关联度更高, 侵蚀沟土壤指标间的显著相关数量更少。[结论] 红壤丘陵区马尾松林地的土壤侵蚀对林下土壤特性和分布产生了显著的影响, 但侵蚀沟对土壤特性的影响机制尚需进一步研究。

关键词: 土壤侵蚀; 红壤丘陵区; 土壤; 马尾松林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0013-05

中图分类号: S714.2

文献参数: 汪邦稳, 夏小林, 段剑. 中国南方红壤丘陵马尾松林下侵蚀坡面的土壤特性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 13-17. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.004

Soil Properties of Eroded Slope Under *Pinus Massoniana* Forest in Hilly Red Soil Area of Southern China

WANG Bangwen¹, XIA Xiaolin¹, DUAN Jian²

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Hefei, Anhui 230088, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Key Laboratory for Soil Erosion and Prevention, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

Abstract: [Objective] To investigate the influences of soil erosion on the distribution and properties of soil in order to provide scientific basis for controlling soil erosion and land degradation in *Pinus massoniana* forestry. [Methods] Soil properties of eroded slope in *P. massoniana* forestry in the hilly red soil area of Southern China were studied based on statistics and the grey relational degree methods. The data was obtained by field surveying and sampling. [Results] Soil nutrients of the eroded slope were poor. Most of the soil physical and chemical indices were at or below level 4. There were significant differences in the soil index between soil on the slope and soil in the erosion gully. Among eighteen soil indices, ten soil indices of soil erosion gully were better than the corresponding indicators of soil on the slope. Compared with slope, the correlation between erosion gully and soil properties was higher, and the number of significant correlation indices of soil was less in erosion gully. [Conclusion] Soil erosion had a significant impact on the properties and distribution of soil on eroded slope in *P. massoniana* forest in the hilly red soil area of Southern China. Nevertheless, the mechanisms of the effect of erosion on soil properties needs to be further studied.

Keywords: soil erosion; the hilly red soil area of Southern China; soil; *Pinus massoniana* forest

水土流失是中国生态环境问题的集中体现^[1-2], 在南方红壤丘陵区尤为明显^[3]。南方红壤丘陵区是中国水土流失严重的区域之一^[4], 该区的林下水土流

失问题日益突出^[5-6]。马尾松林是南方红壤丘陵区的主要次生林, 约占林地面积的 30.5%^[7], 其林下土壤侵蚀模数达到 2 700~6 000 t/(km²·a)^[8], 严重威

胁着当地的生态安全^[5]。目前,南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失和植被恢复逐渐得到关注,林下水土流失规律^[9]、影响因素^[10]、植被特征^[11]、植被恢复限制性因子^[12-14]及恢复途径^[15]都得到了不同程度的研究;但林下土壤侵蚀对土壤特性及分布的影响与机制研究彰显不足。

土壤作为植被生长的重要物质基础,不仅影响土壤侵蚀^[16],同时,其分布和发育也受土壤侵蚀的影响。红壤丘陵区的降雨径流对土壤进行剥离、搬运、沉积的过程,不仅改变了原有土壤的物质组成,同时也改变了土壤的分布特征^[17]。红壤丘陵区马尾松林分布面积广,林下植被稀少,水土流失和土地退化严重^[6,11]。因此,探清该地区马尾松林下土壤侵蚀对土壤理化性质、微生物和土壤酶活性及其分布的影响,探寻植被恢复潜在的土壤条件,对该地区的植被重建和生态恢复具有重要的意义。本研究拟针对南方红壤丘陵区马尾松林下的侵蚀坡面,基于野外调查取样和室内分析测试获取的数据,利用统计分析方法,探析坡面土壤与侵蚀沟(浅沟或细沟)土壤的特性差异,探讨坡面、侵蚀沟土壤特性指标间的相关性,以及土壤特性与坡面、侵蚀沟的关联度,从而揭示侵蚀对土壤特性及分布的影响,以期防治该地区的林下水土流失和土地退化提供科学依据。

1 研究区概况

研究区选择在江西赣县大田乡(25°52′—25°52′N, 115°06′—115°06′)的低山丘陵区,土壤为花岗岩发育的砖红壤,海拔 150~186 m,坡度 8~30°;气候为亚热带丘陵季风气候,年均降水量 1 423.4 mm,年均温度 19.4 °C,≥10 °C 积温为 5 528 °C,年均无霜期 289 d^[17]。研究区马尾松林为 20 世纪 80 年代末飞播造林,林龄约 20 a,>2 m 的马尾松平均树高在 2.9~5 m^[11]。林地退化明显;林下草被稀疏^[18],阳坡半阳坡植被盖度仅为 36.9%^[11],灌木稀少,草被植物主要为芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和白茅(*Imperata cylindrica*)^[17];林下土壤侵蚀严重,细沟、浅沟密度>20 km/km²,侵蚀坡面的侵蚀沟面积占 20.9%,侵蚀沟造成的坡面流失的土壤厚度就达 71.2 mm^[11]。

2 材料与方法

2.1 调查和取样方法

调查和采样时间为 2013 年 4 月中下旬和 10 月中旬。在样地区选择 5 个具有代表性的坡面,分别沿坡面方向随机布设 1 条样带,分上、中、下坡位各设 1

个面积 10 m×10 m 样地。为尽可能的做到采样条件一致,采样时确保研究区 2 个星期没有下雨^[18]。在布设的样地里,土壤水分数据利用便携式土壤水分探测仪随机对 9 个点的表层土壤(0—15 cm)进行探测获取,土壤样品是对表层土壤(0—15 cm)随机采集 5 点组成的混合样。如果坡面样地有侵蚀沟(细沟或浅沟)^[11],采用与上述相同的方法,另外采集土壤水分数据和土壤样品。土壤样品采集后,去除较大的石砾和植物根叶等,每个样品分成 2 份,一份放于冰箱 4 °C 冷藏,另一份避光风干,过筛后备用。

2.2 土壤特性的测定

依照鲁如坤^[19]版的《土壤农业化学分析方法》测定土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾和土壤颗粒组,采用环刀法测土壤容重。依照关松荫^[20]和周礼凯^[21]的分析方法测蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的土壤酶活性。依据稀释平板法测土壤微生物数量^[20, 22];细菌、真菌和放线菌的测定分别选用牛肉膏蛋白胨培养基、PDA 培养基和高氏 I 号培养基,每一浓度梯度设置 3 个重复。

2.3 数据处理

坡面和侵蚀沟的土壤特性差异评价采用配对样本 *t* 检验方法,各指标间的相关性分析采用简单相关分析(Pearson)法,土壤特性与坡面和侵蚀沟的关联度采用灰色关联度分析法^[23-24]。所有数据统计在 SPSS 19.0 和 Excel 2007 中完成。

3 结果与分析

3.1 侵蚀坡面的土壤特性

3.1.1 土壤理化特性 如表 1 所示,除全磷、速效钾和土壤颗粒组成外,侵蚀沟的其他各土壤理化指标与坡面的相应指标存在着显著性的差异。侵蚀沟的有机碳、全氮、全钾、碱解氮和速效磷显著高于坡面,分别高 30.9%,58.3%,13.2%,39.6%和 123.1%;侵蚀沟的土壤容重和水分显著低于坡面,分别低 6.1%和 28.6%。

依据全国第二次土壤普查推荐的土壤养分含量分级标准(表 2),研究区的马尾松林下侵蚀坡面的土壤养分等级都较低。土壤有机质都<10 g/kg,处于 5 级水平;土壤全氮都<0.5 g/kg,处于 6 级水平;侵蚀沟的速效氮>60 mg/kg,处于 4 级水平,坡面的速效氮为 43.99,处于 5 级水平;速效磷都<3 mg/kg,处于 6 级水平;速效钾都<30 mg/kg,处于 6 级水平。说明红壤丘陵区马尾松林侵蚀坡面的土壤养分贫瘠,土壤肥力较差。

表 1 侵蚀坡面的土壤理化性质

位置	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
坡面	7.50±0.73 ^a	0.24±0.03 ^a	0.08±0.01 ^a	25.07±1.86 ^a	43.99±4.93 ^a	0.13±0.05 ^a
侵蚀沟	9.82±0.94 ^b	0.38±0.05 ^b	0.08±0.01 ^a	28.37±2.45 ^b	61.42±6.68 ^b	0.29±0.08 ^b

位置	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤颗粒组成			土壤水分/%
			砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	
坡面	21.61±2.73 ^a	1.39±0.02 ^a	59.96±3.93 ^a	22.33±4.53 ^a	17.71±1.69 ^a	12.82±0.46 ^a
侵蚀沟	22.17±3.00 ^a	1.31±0.03 ^b	62.43±4.20 ^a	18.58±3.02 ^a	18.98±2.12 ^a	9.97±0.57 ^b

注:同列不同字母表示 $p < 0.05$ 水平差异显著,平均值±标准误。下同。

表 2 土壤养分分级标准

级别	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
1	>40	>2.0	>150	>40	>200
2	30~40	1.5~2.0	120~150	20~40	150~200
3	20~30	1.0~1.5	90~120	10~20	100~150
4	10~20	0.75~1.0	60~90	5~10	50~100
5	6~10	0.5~0.75	30~60	3~5	30~50
6	<6	<0.5	<30	<3	<30

表 4 侵蚀坡面的土壤酶活性

位置	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹)	酸性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹)	过氧化氢酶/ (ml·g ⁻¹)
坡面	24.54±1.83 ^a	0.06±0.01 ^a	0.16±0.02 ^a	0.77±0.11 ^a
侵蚀沟	25.18±2.78 ^a	0.11±0.01 ^b	0.17±0.01 ^a	1.06±0.09 ^a

3.1.2 土壤微生物特性 土壤微生物与土壤肥力和植物营养关系密切^[22]。土壤中的细菌、真菌和放线菌通常作为森林土壤生物活性高低的重要标志,其分布与数量直接影响土壤的肥力,进而影响植被的生长^[25]。

如表 3 所示,除放线菌外,侵蚀沟的土壤细菌、真菌和微生物总量显著大于坡面土壤的相应指标,侵蚀沟的土壤细菌、真菌和微生物总数分别比坡面土壤相应指标高 186.2%,110.4%和 90.2%。说明相对坡面,侵蚀沟的微生物状况要好于坡面。

表 3 侵蚀坡面的土壤微生物特征

位置	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	微生物总数
坡面	8.20±1.30 ^a	3.36±0.44 ^a	8.65±1.33 ^a	20.21±2.87 ^a
侵蚀沟	23.47±3.13 ^b	7.07±0.90 ^b	7.89±1.21 ^a	38.43±3.71 ^b

3.1.3 土壤酶特性 土壤酶活性是表征土壤质量的重要指标,它参与土壤的所有生化反应^[20]。蔗糖酶是指示土壤生物活性的一种重要水解酶,促进有机质的转化,反映土壤的肥力状况;脲酶是水解尿素转化为氨的水解酶,表征土壤的氮素状况;酸性磷酸酶能够促进有机磷转化为植物可以吸收的无机磷;过氧化氢酶可以分解土壤中对植物有害的过氧化氢,能够反映土壤腐殖质的再合成强度^[20,22]。

如表 4 所示,测定的 4 种土壤酶在侵蚀沟土壤中的活性要明显高于在坡面土壤中,但只有脲酶达到显著水平。侵蚀沟的土壤脲酶活性比坡面脲酶酶活性高 83.3%。说明侵蚀沟的土壤环境更有利氮的转化。

3.2 侵蚀坡面的土壤理化性质与土壤微生物和酶活性之间的关系

土壤理化性质与土壤微生物和酶活性关系密切^[17,20],分析坡面和侵蚀沟的土壤理化性质与土壤微生物和酶活性的关系,可以阐明相应环境的土壤特性状况;同时,通过比较坡面和侵蚀沟土壤特性状况,可以揭示坡面和侵蚀沟两种侵蚀环境对土壤特性的影响。

3.2.1 坡面土壤理化性质与土壤酶和微生物的相关性 如表 5 所示,在坡面的土壤中,只有全磷、碱解氮和土壤水分与土壤酶或微生物显著相关。全磷与细菌、真菌、放线菌及微生物总量极显著正相关,相关系数分别为 0.819,0.730,0.875,0.888,这与微生物具有解磷作用相一致^[22]。说明坡面全磷虽然含量较低,但对微生物的种类和数量极其重要。碱解氮与土壤脲酶极显著正相关,这与脲酶具有分解氮素作用相一致^[20]。土壤水分与土壤酶和微生物呈负相关关系,其中与脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶极显著或显著负相关,相关系数分别为-0.698,-0.548和-0.574。这主要是坡面的土壤水分低,导致生长有植被的土壤比地表裸露的土壤水分更低^[11],所以,坡面的土壤水分相对较高的都是地表裸露处,而裸露的地表因没有植被生长使得土壤微生物较少,土壤酶活性较低^[13]。

3.2.2 侵蚀沟土壤理化性质与土壤酶和微生物的相关性 如表 6 所示,侵蚀沟土壤中只有速效磷与真菌显著性相关,相关系数为 0.617。与坡面相比,侵蚀沟的土壤理化性质与土壤微生物和酶活性的显著相关性指标明显减少,说明侵蚀沟的形成影响了土壤指标间的相互作用关系。

表 5 坡面土壤理化性质与土壤酶和微生物的相关性

理化指标	蔗糖酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	微生物总量
有机碳	-0.224	0.184	-0.240	-0.043	0.230	0.211	0.213	0.236
全氮	0.306	0.306	-0.106	0.068	0.257	0.232	0.345	0.309
全磷	0.254	0.148	-0.278	-0.130	0.819**	0.730**	0.875**	0.888**
全钾	0.387	0.200	-0.331	-0.252	0.326	0.277	0.269	0.318
碱解氮	0.018	0.669**	0.386	0.399	-0.128	-0.064	-0.036	-0.087
速效磷	-0.160	-0.037	-0.265	0.257	0.243	0.114	0.193	0.218
速效钾	-0.054	0.148	-0.402	-0.231	0.136	0.117	0.110	0.132
土壤水分	-0.487	-0.698**	-0.548*	-0.574*	-0.083	-0.093	-0.039	-0.072

注: * 表示相关性达到显示水平($p < 0.05$); ** 表示相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。

表 6 侵蚀沟土壤理化性质与土壤酶和微生物的相关性

理化指标	蔗糖酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	微生物总量
有机碳	0.305	0.276	0.024	0.138	-0.026	0.103	-0.072	-0.028
全氮	0.211	0.148	0.059	0.002	-0.091	-0.119	-0.175	-0.152
全磷	0.291	-0.015	-0.374	0.054	0.427	0.280	0.023	0.395
全钾	-0.078	-0.139	-0.490	0.072	0.260	0.215	0.110	0.280
碱解氮	0.011	-0.365	-0.320	0.005	-0.066	0.023	0.064	-0.027
速效磷	0.289	0.184	0.004	0.350	0.214	0.617*	0.329	0.385
速效钾	-0.195	-0.322	-0.280	-0.068	0.095	-0.011	-0.054	0.055
土壤水分	-0.512	-0.256	0.418	-0.242	-0.378	-0.427	-0.051	-0.390

3.3 侵蚀坡面与土壤特性的关系

为进一步分析土壤特性对侵蚀的响应,选取研究区土壤特性指标中的最优指标作为参比序列,坡面和侵蚀沟的土壤特性指标作为比较序列,采用灰色关联度分析法分析土壤特性与侵蚀坡面的关联度,结果见表 7。从表 7 可以看出,土壤特性与坡面的关联度为 0.373,与侵蚀沟的关联度为 0.456。说明相比坡面,侵蚀沟对红壤丘陵区马尾松林下侵蚀坡面的土壤特性影响更大。

表 7 土壤特性指标与坡面和侵蚀沟的关联度

指标	坡面	侵蚀沟
有机碳	0.333	0.382
总氮	0.333	0.503
总磷	0.352	0.333
总钾	0.333	0.446
碱解氮	0.333	0.439
速效磷	0.333	0.438
速效钾	0.333	0.337
土壤容重	0.333	0.474
土壤水分	0.424	0.333
蔗糖酶	0.333	0.361
脲酶	0.333	0.458
酸性磷酸酶	0.333	0.397
过氧化氢酶	0.333	0.446
细菌	0.333	0.624
真菌	0.333	0.507
放线菌	1.000	0.726
微生物总量	0.333	0.646
关联度	0.373	0.456

4 讨论与结论

4.1 讨论

红壤丘陵侵蚀区马尾松林下侵蚀坡面的土壤养分相对贫瘠,这主要是历史和人为的原因造成的,尤其在 20 世纪 50—60 年代,原有植被遭到毁灭性破坏,加剧了水土流失发生,导致表土流失殆尽,心土层甚至母质层裸露,生态环境恶化^[5]。尽管相对贫瘠,但侵蚀沟与坡面的土壤理化特征表现出了显著性差异,主要原因是侵蚀剥离、搬运和沉积作用,形成了侵蚀沟,侵蚀沟的形成又影响着泥沙过程,从而影响着土壤的特征与分布^[26-27]。主要表现在侵蚀沟的大部分土壤指标显著优于坡面的相应指标,例如,土壤理化性质指标中的有机碳、全氮、全钾、碱解氮、速效磷、土壤容重 6 个指标,土壤微生物的细菌、真菌、微生物总量 3 个指标,以及土壤酶中的脲酶指标;侵蚀沟与土壤特性的关联度(0.456)明显大于坡面与土壤特性的关联度(0.373)。说明在因水土流失造成母质层裸露的红壤丘陵侵蚀区种植的马尾松林,侵蚀沟的形成改变了水土流失过程,影响了光热条件,促进了局部地形处的土壤形成,从而为植被恢复创造了有利的条件^[11,19]。但是,侵蚀沟土壤特性指标间的显著相关数量明显低于坡面,进一步说明侵蚀沟对土壤特性状况产生了明显的影响,但其原因和机制尚需进一步的研究。

4.2 结论

(1) 红壤丘陵区马尾松林下侵蚀坡面土壤养分

相对较低,理化指标基本处于4级及以下水平;但侵蚀沟土壤的大部分指标显著优于坡面土壤的相应指标。

(2)红壤丘陵区马尾松林下的侵蚀沟对侵蚀坡面的土壤特性和分布产生了明显的影响。主要表现在18个土壤指标中,侵蚀沟的土壤有10个指标显著优于坡面土壤的相应指标,侵蚀沟与土壤特性的关联度更高,侵蚀沟土壤指标间的显著相关数量更少;但侵蚀沟对红壤丘陵区马尾松林下侵蚀坡面的土壤特性影响原因和机制尚需进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 李锐. 中国水土流失基础研究的机遇与挑战[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 6-11.
- [2] 李锐. 中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 1-6.
- [3] Liang Yin, Li Decheng, Su Chunli, et al. Soil erosion assessment in the red soil region of Southeast China using an integrated index[J]. Soil Science, 2009, 174(10): 574-581.
- [4] Liang Yin, Li Decheng, Lu Xixi, et al. Soil erosion changes over the past five decades in the red soil region of southern China[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7(1): 92-99.
- [5] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 1-8.
- [6] 赵其国, 张桃林, 鲁如坤, 等. 我国东部红壤区土壤退化的时空变化、机理及调控对策[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 2-13.
- [7] 曾思齐, 余济云, 肖育檀, 等. 马尾松水土保持林水文功能计量研究: (I) 林冠截留与土壤贮水能力[J]. 中南林业学院学报, 1996, 16(3): 1-8.
- [8] 李钢, 梁音, 曹龙熹. 次生马尾松林下植被恢复措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 25-31.
- [9] Cao Longxi, Liang Yin, Wang Yi, et al. Runoff and soil loss from *Pinus massoniana* forest in Southern China after simulated rainfall[J]. Catena, 2015, 129(2): 1-8.
- [10] 何圣嘉, 谢锦升, 杨智杰, 等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 65-70.
- [11] 汪邦稳, 段剑, 王凌云, 等. 红壤侵蚀区马尾松林下植被特征与土壤侵蚀的关系[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 9-16.
- [12] 马志阳, 查轩. 南方红壤区侵蚀退化马尾松林地生态恢复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 188-196.
- [13] 梅杰, 周国英. 不同林龄马尾松林根际与非根际土壤微生物、酶活性及养分特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 46-49.
- [14] 何圣嘉, 谢锦升, 周艳翔, 等. 南方红壤侵蚀区马尾松林下植被恢复限制因子与改造技术[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 118-124.
- [15] 郭晓敏, 牛德奎, 刘苑秋, 等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复与重建措施[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 878-884.
- [16] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 47-52.
- [17] 赵汝东, 樊剑波, 何美球, 等. 坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 2857-2862.
- [18] Xu Xianli, Ma Keming, Fu Bojie, et al. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry warm river valley, SW China[J]. Catena, 2008, 75(2): 138-145.
- [19] 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, 2000: 12-13.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 275-276.
- [21] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 267-268.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 85-176.
- [23] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 100-105.
- [24] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 361-366.
- [25] 龚霞, 牛德奎, 赵晓蕊, 等. 植被恢复对亚热带退化红壤区土壤化学性质与微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1094-1100.
- [26] Dubayah R, Loechel S. Modeling topographic solar radiation using GOES data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(2): 141-154.
- [27] Dessalegn D, Beyene S, Ram N, et al. Effects of topography and land use on soil characteristics along the toposequence of Ele watershed in Southern Ethiopia[J]. Catena, 2014, 115(4): 47-54.