

李 志,袁颖丹,张学玲,等. 不同干扰程度对山地草甸土壤有机质及酸度的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):285-288.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.068

# 不同干扰程度对山地草甸土壤有机质及酸度的影响

李 志<sup>1</sup>,袁颖丹<sup>2</sup>,张学玲<sup>1</sup>,盛可银<sup>1</sup>,牛德奎<sup>1</sup>,张文元<sup>1</sup>,龚 霞<sup>1</sup>,郭晓敏<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学林学院,江西南昌 330045; 2. 南京林业大学林学院,江苏南京 210037)

**摘要:**针对亚热带山地草甸生态系统极端脆弱性、敏感性和人为干扰严重等问题,选择武功山主峰(金顶)周围(海拔 1 880~1 913 m)为研究区,依据因人为干扰所造成的植被覆盖度相对百分数的减少率(%),设置无干扰、轻度干扰、中度干扰、重度干扰等 4 种处理,运用土壤养分系统研究法(简称 ASI),开展不同干扰程度下不同土层深度(0~20 cm 和 20~40 cm)土壤有机质及酸度含量测定与分析。结果表明:(1)武功山山地草甸土壤为强酸性或极强酸性土壤,随着干扰程度的增加,上、下层土壤活性酸度逐步增强;交换性酸含量范围为 1.8~3.4 cmol/L,呈现与活性酸相似的分佈趋势;有机质含量丰富,不同处理土壤有机质含量范围为 2.71%~4.15%,且上层土含量高于下层。(2)重度干扰土壤 pH 值与其他干扰水平具有显著差异( $P<0.05$ );不同干扰水平土壤交换性酸含量无显著差异;重度和轻度干扰水平有机质含量在上层土壤中含量差异显著。不同深度土壤 pH 值无显著差异,在轻度干扰水平下不同土层深度土壤交换性酸及有机质差异显著。(3)土壤活性酸与有机质含量呈现负相关;土壤交换性酸则与有机质含量呈极显著正相关,二者之间的线性方程为  $y=0.343x+1.477(r^2=0.444)$ 。

**关键词:**干扰程度;山地草甸;有机质;酸度

**中图分类号:** S153;X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0285-04

在土壤当中含有碳的有机物质被称为土壤有机质,如动物或植物的残体,也包括微生物体以及被微生物分解、合成的所有有机物质,土壤的肥力、生态环境的保护,以及可持续发

展等各个方面都受到土壤有机质的作用 and 影响<sup>[1-3]</sup>。土壤酸碱度同样对土壤有机质周转有着十分重要的影响<sup>[4-5]</sup>,是土壤肥力和生产力的限制因子之一,而土壤酸化也是土壤退化的重要表现形式<sup>[6]</sup>。在土壤酸度研究中,一般包含活性酸和潜性酸,土壤活性酸用 pH 值表示,土壤潜性酸通常用交换性酸度或者水解性酸度来表示<sup>[7-9]</sup>。土壤 pH 值影响着土壤演化过程中的化学反应或过程,尤其对氧化还原、溶解沉淀以及配合反应起支配作用<sup>[10]</sup>。地球上的三大碳库为草地、森林、大海,而在陆地生态系统中草地的面积最大<sup>[11]</sup>,具有很大的碳储存能力,是重要的可更新自然资源,所以如何保护并改良现有草地系统,使其能够保持健康、稳定的状态,是实现人类

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360177、31560150);国际植物营养研究所合作项目(编号:IPNI-JX29);江西省研究生创新专项资助项目(编号:YC2013-B029)

作者简介:李 志(1987—),河南方城人,博士研究生,主要从事水土保持与生态修复、流域管理研究。E-mail:lizhi876@163.com。

通信作者:郭晓敏,博士,教授,博士生导师,主要从事植被修复、经济林栽培、林木养分管理等研究。E-mail:gxmjxau@163.com。

[4] Hu R G, Kusa K, Hatano R. Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2001, 47(3): 621-627.

[5] 高金芳,周 波,马 涛,等. 半干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 89-93.

[6] Kellman L, Beltrami H, Risk D. Changes in seasonal soil respiration with pasture conversion to forest in Atlantic Canada [J]. Biogeochemistry, 2007, 82(1): 101-109.

[7] 周小刚,张彦军,南雅芳,等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1026-1033.

[8] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in desert shrub land of *Artemisia ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China[J]. Journal of Forestry Research, 2007, 18(3): 231-235.

[9] 张 赛,王龙昌,周航飞,等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6244-6255.

[10] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlation and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-

90.

[11] 苏永红,冯 起,朱高峰,等. 土壤呼吸与测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 57-65.

[12] Wang W, Gao J X. The contribution of root respiration to soil CO<sub>2</sub> efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 697-703.

[13] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, et al. Dependence of the Q<sub>10</sub> values on the depth of the soil temperature measuring point[J]. Plant and Soil, 2007, 29(1/2): 171-179.

[14] 马 骏,唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化[J]. 植物生态学报, 2011, 35(2): 167-175.

[15] 齐玉春,董云社,刘立新,等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(3): 341-351.

[16] 师广旭,耿浩林,王云龙,等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3408-3416.

社会与生态经济可持续发展的重要基础。

武功山的地理位置是在江西省西部地区,其山脉走向及位置对于我国华东地区的植被区划具有重要意义,是划分亚热带范围内东部湿润区域常绿阔叶林的中部亚地带以及北部亚地带天然的分界线<sup>[12-13]</sup>。山地草甸在山岳型旅游景点的要素构成中是难得的景观类型,自 2004 年以来,武功山景区的游客已达 45 万人次;自 2008 年以来,每年一届的武功山国际帐篷节也吸引了越来越多来自全国各地的游客登山、探险和宿营,随着旅游规模的扩大和游客游程范围的延伸,对包括山地草甸在内的多种植被和特殊景观的负面影响也日趋增大,游客的任意践踏以及废弃物的排放,均在很大程度上造成草甸群落组成和生产力的退化,山地草甸逐渐破碎化现象日渐明显<sup>[13-14]</sup>。针对这些问题,笔者所在的研究团队已经开展了部分科研工作,袁颖丹等针对不同海拔高度土壤的含氮量与物理性质之间的关系进行分析,结果表明土壤的总孔隙度与碱解氮含量、全氮含量呈显著正相关<sup>[15]</sup>。袁知洋等的研究表明,草甸区内不同植被群落的土壤有机质含量与微生物量碳含量以及易氧化态碳的含量呈显著正相关,而不同干扰程度对碱解氮的影响不显著<sup>[16-17]</sup>。邓邦良等的研究表明,在不同海拔梯度上,土层深度对有机质含量影响显著<sup>[18]</sup>。但是针对不同退化程度酸度与有机质含量,尤其是交换性酸与活性酸及有机质含量关系的研究还尚未开展。因此,本试验主要基于山地草甸生态系统对外界干扰所呈现的敏感性以及脆弱性等特征,通过对不同干扰程度下山地草甸土壤不同土层深度所含有机质及酸度进行分析,探究其差异程度及分布规律,研究结果可为建立科学的南方地区山地草甸生态脆弱度评价体系提供理论参考,也可为合理开展退化山地草甸生态修复工作提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概括

武功山分布于罗霄山脉北部,吉安、宜春和萍乡 3 个地级市行政区划的接壤区域(27°25′~27°35′ N,114°10′~114°17′ E),是湘江水系及赣江水系的分水岭,绵延大约 120 km,总面积约 970 km<sup>2</sup>,年平均气温为 14~16℃,夏季的最高温为 23℃,年均日照时长为 1 580~1 700 h,年均蒸发量为 1 360~1 700 mm,年均湿度值为 70%~80%,年均降水量为 1 350~1 570 mm,武功山山体岩石类型主要为花岗岩和片麻岩,主峰白鹤峰(金顶)海拔 1 918.3 m<sup>[19]</sup>。武功山草甸分布区的土壤主要是亚热带山地草甸土,由于枯枝落叶丰富以及积水、低温等因素,有机物腐烂分解缓慢,土层浅薄,色泽黝黑,干后成块。武功山山体垂直,海拔较高,且山势陡峻,导致气候、土壤、植被的垂直地带性分异明显,在江西省境内,除武功山外,其他山体(庐山、井冈山等)均不具典型的山地草甸植被类型。在天然草地上,主要有禾本科的野古草(*Arundinella anomala*)、芒类(*Miscanthus sinensis*)、茅根(*Perotis indica*)等,还有少量蓼科(Polygonaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、唇形科(Labiatae)和十字花科(Cruciferae)植物<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 2013 年 10 月下旬,到达武功山主体景区(金顶风景区)进行试验样地设置及样品采集。因为人们的

大量踩踏行为,致使草甸分布区出现大面积的植被覆盖度下降的现象。本研究参照国家质检总局 2004 年颁布的《天然草地退化、沙化盐渍化的分级指标》国家标准(GB 19377—2003)<sup>[22]</sup>和孙小弟等对退化草地分级标准的研究结果<sup>[23-24]</sup>,选择武功山主峰(金顶)周围(海拔 1 880~1 913 m)为研究区,依据因人为干扰所造成的植被覆盖度相对百分数的减少率(%),设置无干扰(contrast check,缩写为 CK,0~10%)、轻度干扰(slight disturbance,SLD,11%~20%)、中度干扰(medium disturbance,MD,21%~30%)、重度干扰(severe disturbance,SD,>30%)等 4 种处理,每种处理设置 3 个 10 m×10 m 的重复样地,作为研究不同干扰程度下山地草甸土壤酸度及有机质含量差异的采样区域。

1.2.2 样品采集与测定方法 运用 5 点采样法在样地内分上(0~20 cm)、下(20~40 cm)层进行取样,将每一个样地内相同土层的土样混合均匀,在采样现场运用四分法获取约 500 g 土壤样品装入样品保鲜袋,把样品及时带回实验室,并晾晒在土壤样品架上,经过自然风干之后,仔细拣去样品当中的动植物残体以及石块等杂质,把样品研磨、粉碎,通过 2 mm 筛孔进行待测样品制备。土壤活性酸 pH 值、交换性酸(AA)含量、有机质(OM)含量等指标在中国农业科学院中-加合作土壤植物测试实验室采用高效土壤养分系统研究法测定,该研究方法是美国佛罗里达国际农化服务中心(Agro Services International Inc.,简称 ASI)的 Hunter 博士在总结了前人土壤测试工作的基础上,吸收了美国北卡罗莱那州立大学的 Waugh、Gate 和 Nelson 的研究结果提出的评价土壤养分状况的实验室化学分析方法,在中-加钾肥农学项目实施中引进中国,并在中国农业科学院建立了中-加合作土壤植物测试实验室<sup>[25]</sup>。

1.2.3 数据处理 使用 Microsoft Office 2016 对初始数据进行编排整理,运用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析及检验,用 SigmaPlot12.5 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 武功山金顶风景区山地草甸土壤酸度及有机质总体特征

土壤学中常根据土壤的 pH 值,将土壤的酸碱性分为若干级,根据土壤酸度理论<sup>[26]</sup>,武功山主峰景区草甸土壤 pH 值总体呈强酸性,波动范围为 4.05~4.83,平均值为 4.56。交换性酸(AA)含量的范围为 1.71~4.97 cmol/L,平均含量 3.36 cmol/L。结合第二次全国土壤普查的土壤养分含量分级指标,武功山草甸土壤有机质(OM)含量较丰富,达到二级水平,范围为 1.8%~3.4%,平均含量为 2.63%。变异系数(CV)主要是说明指标参数变异的程度,通常情况下,CV<0.1 为弱变异性,CV 在 0.1~1.0 之间被认为是中等程度的变异,如果 CV>1.0,则为强变异性<sup>[27]</sup>。由表 1 可知,武功山山地草甸土壤酸度计有机质的变异性总体上不强烈,其中,土壤活性酶 pH 值呈弱变异性,而 AA 含量和 OM 含量都是中度变异。

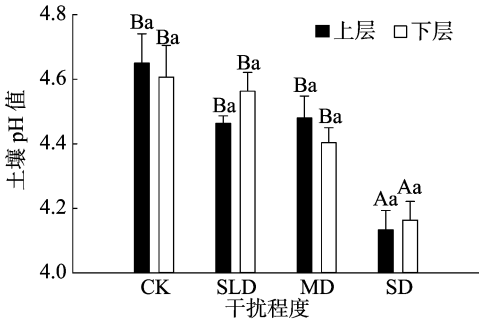
### 2.2 不同干扰程度对土壤酸度及有机质的影响

2.2.1 不同干扰程度及不同土层深度的土壤 pH 值 土壤的 pH 值影响着土壤中养分存在的状态、转化及其有效性,是土壤质量的重要指标,植被生长也有其比较适宜的 pH 值范

表 1 武功山草甸土壤酸度及有机质

指标	pH 值	AA 含量 (cmol/L)	OM 含量 (%)
全距	0.78	3.26	1.6
极小值	4.05	1.71	1.8
极大值	4.83	4.97	3.4
均值	4.43	3.36	2.63
标准差	0.21	0.69	0.36
变异系数	4.69%	20.70%	13.60%

围,如果超出这一范围,则植被生长也将会受到一定影响<sup>[26]</sup>。从图 1 可以看出,上、下层土壤 pH 值均受人干扰的影响,随着干扰程度加重,土壤 pH 值降低,活性酸度增强,在重度干扰水平下与其他水平呈现显著差异,轻度、中度干扰和无干扰草甸土壤 pH 值差异不显著,不同土层间的 pH 值无显著差异。



大写字母代表在不同干扰程度之间相同土层深度的差异特征,小写字母代表在同一干扰程度不同土层深度的差异特征,不同字母代表处理之间具有显著差异 ( $P<0.05$ )。下同

图 1 不同干扰程度及不同土层土壤 pH 值

2.2.2 不同干扰程度及土层深度对土壤交换性酸的影响  
在土壤胶体的表面所吸附的交换性氢离子和铝离子总量是土壤交换性酸,一般被认为是土壤的潜在酸,可以和溶液中的氢离子(活性酸)保持动态的平衡,作为土壤酸度容量的指标之一,土壤的交换性酸决定着土壤的活性酸<sup>[6]</sup>。从图 2 可以看出,不同干扰程度对山地草甸交换性酸有一定的影响,但是显著性不强。总体来看,随着人为干扰程度增强,土壤中的交换性酸含量呈降低趋势,与 pH 值的分布规律相近。在轻度干扰水平的土壤交换性酸含量比中度干扰水平相对稍低,可能是山地草甸土壤交换性酸含量对干扰响应较为敏感,但是,随着干扰增加,可能人们会带来一定的外来物质,对交换性酸的含量有所影响。不同土层土壤交换性酸的含量,上层土壤总体高于下层,土壤在轻度干扰水平上、下土层土壤交换性酸含量差异显著,其他干扰水平下,不同土层间土壤交换性酸含量差异不显著。

2.2.3 不同干扰程度及土层深度对土壤有机质含量的影响  
土壤有机质含量是评价土壤肥力的一项重要指标,一般情况下,土壤有机质只占土壤质量的 1%~5%,但对土壤的保肥供肥性、土壤结构的形成和稳定性、土壤物理化学过程及重金属与农药等污染物的降解等生态过程起十分重要的作用<sup>[3,28]</sup>。从图 3 可以看出,山地草甸土壤有机质含量在重度和轻度干扰水平的上层土壤之间差异显著,而不同干扰水平下层土壤有机质含量差异不显著。不同土层深度土壤有机质

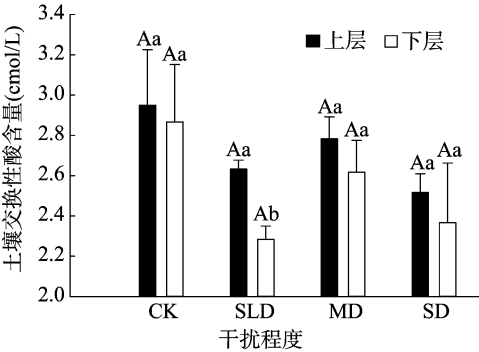


图 2 不同干扰程度及不同土层草甸土壤交换性酸

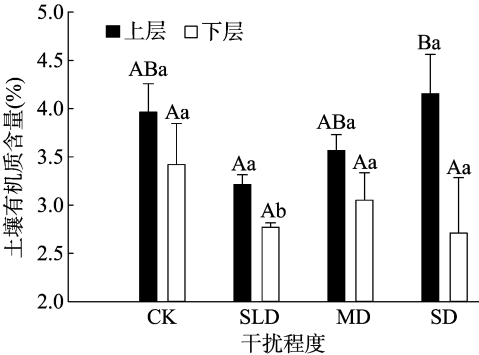


图 3 不同干扰程度及不同土层草甸土壤有机质

含量在轻度干扰水平差异显著,该结果与土壤交换性酸的差异特征较为一致,其他干扰水平下不同深度土壤有机质含量差异不显著。

2.3 土壤有机质与土壤酸度关系分析

武功山山地草甸土壤酸度、有机质的相关性分析见表 2,结果表明:土壤 pH 值与土壤交换性酸呈正相关,而与有机质含量呈负相关,土壤交换性酸则与有机质含量呈极显著正相关,二者的相关模型为  $y = 0.343x + 1.477 (r^2 = 0.444)$ 。

表 2 土壤酸度、有机质的相关性分析

指标	相关系数		
	pH 值	AA	OM
pH 值	1	0.121	-0.114
AA		1	0.666 **
OM			1

注:“\*”表示显著相关( $P<0.05$ ),“\*\*”表示极显著相关( $P<0.01$ )。

3 讨论

本研究认为,人为干扰会进一步增强土壤酸性,造成植被覆盖度下降,在干扰初期导致土壤有机质含量降低,但是在后期随着干扰强度增加,可能是带来了较多的外界物质,使土壤有机质含量有所增加。戴万宏等利用中国第二次土壤普查的实测土壤数据,研究了全国及不同地区地带性土壤表层有机质含量与土壤酸碱度的关系,认为中国地带性土壤表层有机质含量有明显随 pH 值升高而降低的趋势,二者间呈显著负相关<sup>[1]</sup>,与本研究结论相似。江慧华等对武夷山地区的土壤有机质、全氮等养分指标研究,发现 0~20 cm 的表层土壤有机质含量比下层土壤要高,并且在旅游区土壤有机质含量有

回升的趋势<sup>[29]</sup>,也与本研究的结论相似。在一些研究中,土壤酸碱度与有机质之间的关系存在一些不确定的情况,有学者认为出现关系不明确的原因不完全是由土壤 pH 值所造成的,其他方面如土壤有机质周转的影响因子(土壤的质地、环境气候及土壤微生物数量、种群结构等)也是可能致使出现这种差别的重要原因<sup>[30]</sup>。在武功山草甸分布区,因为干扰造成植被退化,覆盖度降低,势必会造成土壤侵蚀加剧,如何能够利用土壤酸度与有机质的特性,来改善区域环境,保持好南方地区这一最大的“云间草原”则是需要进一步深入探讨的内容。

#### 4 结论

武功山山顶风景区山地草甸土壤为强酸性或极强酸性土壤,随着干扰程度的增加,上、下层土壤活性酸度逐步增强;交换性酸含量呈现与活性酸相似的分布趋势;土壤有机质的含量较为丰富,上层土壤的有机质含量要高于下层。重度干扰水平与其他干扰水平上、下层土壤活性酸含量具有显著差异,不同干扰水平之间土壤交换性酸含量的影响不显著,重度和轻度干扰水平上层土壤有机质含量有显著差异,下层土壤有机质含量影响不显著。不同土层深度土壤 pH 值无显著差异,在轻度干扰水平上不同土层土壤交换性酸和有机质含量差异显著( $P < 0.05$ )。土壤活性酸与有机质含量具有负相关关系;而土壤交换性酸则与有机质含量具有极显著正相关关系,二者之间的线性方程为  $y = 0.343x + 1.477$  ( $r^2 = 0.444$ )。

#### 参考文献:

- [1]戴万宏,黄耀,武丽,等.中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J].土壤学报,2009,46(5):851-860.
- [2]Marks J A,Perakis S S,King E K,et al. Soil organic matter regulates molybdenum storage and mobility in forests[J]. Biogeochemistry, 2015,125(2):167-183.
- [3]陈雅敏,冯述青,杨天翔,等.我国不同类型土壤有机质含量的统计学特征[J].复旦学报(自然科学版),2013,52(2):220-224.
- [4]胡慧蓉,马焕成,罗承德,等.森林土壤有机碳分组及其测定方法[J].土壤通报,2010,41(4):1018-1024.
- [5]Vasenev V I,Prokofeva T V,Makarov O A. The development of approaches to assess the soil organic carbon pools in megapolises and small settlements[J]. Eurasian Soil Science,2013,46(6):685-696.
- [6]范庆锋,张玉龙,陈重,等.保护地土壤酸度特征及酸化机制研究[J].土壤学报,2009,46(3):466-471.
- [7]李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,2001:213-216.
- [8]张效年,赵安珍,章钢娅,等.华南红壤的交换性碱和交换性酸[J].土壤学报,1990,27(3):270-279.
- [9]孔晓玲,季国亮.我国南方土壤的酸度与交换性氢铝的关系[J].土壤通报,1992,23(5):203-204.
- [10]陈明智,吴蔚东,陈占彪,等.不同土地利用方式和种植年限对

- 土壤交换性酸的影响[J].贵州农业科学,2010,38(10):112-115.
- [11]解新明.草资源学[M].广州:华南理工大学出版社,2009:271.
- [12]朱英培,王武文.武功山——天上草原[J].森林与人类,2013(12):176-177.
- [13]赵晓蕊,郭晓敏,张金远,等.武功山山地草甸生态系统土壤无机磷垂直地带性分布特征[J].草业科学,2014,31(9):1610-1617.
- [14]李新君,林燕春,廖铅生,等.武功山生态旅游景区管理模式探讨[J].湖北农业科学,2010,49(12):3264-3267.
- [15]袁颖丹,李志,张文元,等.武功山山地草甸不同海拔土壤氮素分布及其与土壤物理性质的关系[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):108-113.
- [16]袁知洋,邓邦良,刘宇新,等.武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析[J].中南林业科技大学学报,2016,36(2):84-90.
- [17]袁知洋,邓邦良,李志,等.武功山草甸土壤碱解氮含量分布影响因素研究[J].江苏农业科学,2015,43(5):318-320.
- [18]邓邦良,袁知洋,温卫华,等.武功山山地草甸土壤有机质、全氮及碱解氮分布格局及关系[J].江苏农业科学,2015,43(11):414-417.
- [19]袁颖丹,李志,牛德奎,等.武功山山地草甸不同干扰程度土壤机械组成分布特征[J].绿色科技,2015(11):27-28.
- [20]刘珏,叶会寿,谢桂青,等.江西省武功山地区游坑钨矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J].地质学报,2008,82(11):1572-1579.
- [21]程晓.武功山山地草甸植物群落特征及空间分布格局研究[D].南昌:江西农业大学,2014.
- [22]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.天然草地退化、沙化盐渍化的分级指标:GB 19377—2003[S].2004.
- [23]孙小弟,董全民,马玉寿.高寒草甸退化草地分级标准研究现状[J].青海畜牧兽医杂志,2008,38(4):54-55.
- [24]Klimkowska A,Kotowski W,Diggelen R V,et al. Vegetation re-development after fen meadow restoration by topsoil removal and hay transfer[J]. Restoration Ecology,2010,18(6):924-933.
- [25]金继运,白由路,杨俐平.高效土壤养分测试技术与设备[M].北京:中国农业出版社,2006:187.
- [26]吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2006:382.
- [27]赵心苗,王永明,张荣凤,等.冀北山地海拔对华北落叶松人工林土壤养分特征的影响[J].河北农业大学学报,2013,36(4):56-61.
- [28]隋跃宇,焦晓光,高崇生,等.土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究[J].土壤通报,2009,40(5):1036-1039.
- [29]江慧华,李灵,刘瑞来,等.武夷山风景区土壤有机质及全氮含量研究[J].湖北农业科学,2013,52(1):36-38.
- [30]姬钢,徐明岗,文石林,等.不同植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J].应用生态学报,2015,26(9):2639-2645.