

沙地土壤 pH 值、养分含量对微地形变化的响应

高凯¹, 张丽娟¹, 于永奇¹, 韩国栋^{1,2}

(1. 内蒙古民族大学 农学院, 内蒙古 通辽 028043; 2. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 针对浑善达克沙地土壤 pH 值、碳、氮、磷含量的微地形变异性进行研究, 系统分析浑善达克沙地不同微地形条件下土壤营养物质含量的变化规律, 为浑善达克沙地环境建设和合理开发利用提供理论参考。[方法] 以内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场境内的中国科学院内蒙古草原生态系统定位站长期围封的沙地样地为研究对象, 测定坡位对土壤 pH 值、碳、氮、磷含量。[结果] 不同坡位 pH 值平均值大小顺序为: 阳坡 > 坡底 > 阴坡 > 坡顶; 有机碳含量平均值大小顺序为: 坡底 > 阴坡 > 阳坡 > 坡顶; 全磷含量平均值大小顺序为: 坡底 > 阴坡 > 坡顶 > 阳坡; 土壤含氮量阴坡和坡底显著高于坡顶和阳坡。[结论] 不同微地形条件下各层土壤 pH 值、全碳和全磷含量的变异系数均表现为阳坡和坡顶高于阴坡和坡底; 同一坡位不同土层营养物质含量变异系数大小关系没有规律可循, 因坡位和土层不同而表现出不同的大小关系。

关键词: 微地形; 土壤养分; 变异系数; 沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0088-05

中图分类号: S151.9

文献参数: 高凯, 张丽娟, 于永奇, 等. 沙地土壤 pH 值、养分含量对微地形变化的响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 88-92. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.016

Effects of Micro-topography on Soil pH Value, Nutrient Content in Sandy Land

GAO Kai¹, ZHANG Lijuan¹, YU Yongqi¹, HAN Guodong^{1,2}

(1. College of Agriculture, Inner Mongolia University for Nationalities,

Tongliao, Inner Mongolia 028043, China; 2. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] We aimed to study the effects of slope on soil pH value, carbon, nitrogen, phosphorus content in sandy land in order to reveal the variation of soil nutrients under different micro-topographical conditions, and provide a theoretical reference for environmental construction in sandy land. [Methods] The plots were selected from sandy land in Inner Mongolia grassland ecosystem research station (IMGERS). The effects of micro-topographical position on pH value, carbon, nitrogen and phosphorus content of soil were investigated. [Results] The pH values in different micro-topographical position showed as: sunny slope > slope base > shady slope > top of slope; The organic carbon content average showed as: slope base > shady slope > sunny slope > top of slope; The content of phosphorus showed as: slope base > shady slope > top of slope > sunny slope. Nitrogen content at the slope base and shady slope was higher than that at the top and sunny slope. [Conclusion] The variable coefficient of pH value, nitrogen, phosphorus content at top and sunny slope was higher than that at the base and shady slope. The variable coefficient of soil nutrient varied significantly among different micro-topographical positions.

Keywords: micro-topography; soil nutrient; coefficient of variation; sandy land

土壤是地球表面植物生长的立地条件, 其理化性质受到成土母质、气候条件、植被类型、地形条件以及人为因素的共同影响^[1], 在上述因素的影响下促使土壤理化性质在较大尺度上具有较高的空间异质性。而在较小尺度上土壤理化性质则因地形的变化表现出一定的空间变化规律^[2-6]。微地形对土壤营养物质

的影响, 主要通过坡位的变化对土壤营养物质含量产生不同的影响规律^[7-9]。在坡向研究过程中学者们发现, 在同一海拔高度带, 阳坡有机质要低于阴坡^[10-11]。还有研究表明在表层土壤有机质含量与坡向具有一定的正相关, 坡向越朝北, 有机碳含量越高, 同时坡向对土壤氮的含量影响较大, 土壤全氮与坡向之间存在

收稿日期: 2015-03-27

修回日期: 2015-05-11

资助项目: 内蒙古自然科学基金项目“生物和环境因子对植被生态恢复的影响及其互作机理”(2013MS0525); 内蒙古自治区重大科技项目(20101405)

第一作者: 高凯(1979—), 男(汉族), 吉林省农安县人, 博士, 教授, 主要从事草地资源与利用方面研究。E-mail: gaokai555@126.com。

正相关关系^[12]。在对林地和灌木林研究过程中,学者们发现下坡土壤碳、氮含量高于阴坡,土壤养分与坡向呈现负相关关系^[13-15]。坡位的不同首先将会影响到土壤的物理性质,已有研究表明坡位的变化将促使土壤物理性质(如容重、含水量、硬度等),呈现显著的空间异质性,同时对土壤的扩散和养分流失均有重大影响^[16-17]。高雪松等通过对坡位与土壤养分变化的研究,其研究结论也表明土壤养分向下坡位汇集,并且养分含量高于中坡位和上坡位^[18]。其他学者在对坡位与土壤物理性质及养分特征研究过程中,均得出类似结论。即:坡底养分含量最高,坡顶和坡面养分具有向坡地流失的趋势^[19-21]。

浑善达克沙地地处干旱半干旱地区,具有降雨量少、蒸发量大、地形地貌错综复杂、土壤风蚀严重等特点,加之受人类利用过度等因素影响,出现水土流失严重、植被覆盖率低、土地退化等一系列问题,致使浑善达克沙地成为中国生态环境最为脆弱的地区之一,植被恢复成为该地区的首要任务,而土壤营养物质含量是植被恢复的重要条件。学者们在对地形变化与土壤理化性质之间关系的研究过程中已经证实坡位、坡向等地形的变化对土壤理化性质具有一定的影响^[18,19],浑善达克沙地的地形地貌错综复杂、高低起伏,这种地形变化势必对土壤理化性质产生影响,而土壤理化性质的差异又是决定在对其改良过程中植物种类选择的重要基础条件。然而针对浑善达克沙地地形变化与土壤理化性质之间关系的研究较少。因此,本项目拟针对浑善达克沙地土壤 pH 值、碳、氮、磷含量的微地形变异性进行研究,系统分析浑善达克沙地不同微地形条件下土壤营养物质含量的变化规律,为浑善达克沙地环境建设和合理开发利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 自然概况

本研究地点位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位站沙地样地,地理位置为 43°26′—44°08′N, 116°04′—117°05′E,海拔 1 200 m 左右,属温带草原区典型草原栗钙土亚区。气候属中温带半干旱草原气候,冬季受蒙古高压控制,寒冷干燥,夏季受海洋性季风的一定影响,较为温和湿润。3—5 月份常有大风,月平均风速达 4.9 m/s。年均温为 0.6 °C,1 和 7 月份平均气温分别为 -21.3 和 18.6 °C。阴坡植物种类:小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、冷蒿(*Stipa grandis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、褐沙蒿(*Artemisia halodendron*)、地梢瓜(*Cynanchum*

the-sioides)、羊茅(*Festuca ovina*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、沙鞭(*Psammochloa villosa*)、早熟禾(*Poa pratensis*)等;阳坡植物种类:小叶锦鸡儿、冷蒿、地梢瓜、沙芦草、隐子草(*Cleistogenes serotina*)、沙鞭、花旗杆(*Dontostemon dentatus*)等;坡底:褐沙蒿、黄蒿(*Artemisia annua*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、草地麻花头(*Serratula centauroides*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、凤毛菊(*Saussurea japonica*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等;坡顶:小叶锦鸡儿、褐沙蒿、沙芦草、大针茅(*Stipa baicalensis*)、隐子草、沙鞭等。

1.2 取样方法

将取样样地根据微地形特点划分为坡顶、坡底、阴坡和阳坡 4 个坡位,其中阳坡和阴坡取样位置均为坡中部,在每一个坡位上选取植物群落组成基本一致的 10 个取样点,于 2013 年 8 月 15 日在每个取样点设置 5 个间距 10 m 的样方,在每个样方内打 5 钻,将各钻相同土层的土壤进行混合,利用四分法进行取样,将所取样品放在阴凉通风处自然风干,带回实验室粉碎、保存。土层深度为 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40 和 40—50 cm。

1.3 测定指标与方法

pH 值:便携式 pH 计。

全碳测定:用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法测定。

全氮测定:采用开氏定氮法进行测定。

全磷测定: $HClO_4-H_2SO_4$ 法。

1.4 相关计算与数据统计方法

1.4.1 变异系数 变异系数(C_v)表示土壤养分在空间变异的程度,是各层土壤养分标准差与均值的比值,它的大小反映了各层土壤养分的稳定性。 C_v 越大,说明样点养分变化越剧烈; C_v 值越小,越稳定^[2]。

1.4.2 方差分析 数据分析采用 SAS 8.0 软件对数据进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 微地形对 pH 值的影响

由表 1 可知,不同坡位 pH 值平均值顺序为:阳坡>坡底>阴坡>坡顶;同一土层不同坡位,0—5 cm 土层各坡位之间没有显著差异,5—10 和 10—20 cm 土层阳坡和阴坡 pH 值显著高于坡顶和坡底($p < 0.05$),20—30 cm 坡顶 pH 值显著低于阳坡、阴坡和坡底($p < 0.05$),30—40 cm 阳坡和坡底显著低于坡顶和阴坡($p < 0.05$),40—50 cm 阳坡和坡底显著低于阴坡和坡顶($p < 0.05$);同一坡位不同土层,坡顶

各层土壤 pH 值随土层深度增加逐渐降低,其中 0—5,5—10 和 10—20 cm 这 3 层显著高于 20—30,30—40 和 40—50 cm,20—30 cm 层土壤 pH 值显著高于 30—40 和 40—50 cm。阳坡 20—30 和 30—40 cm 土层 pH 值显著高于其他各层($p < 0.05$)。坡底下 3 层土壤 pH 值显著高于上 3 层($p < 0.05$),而上 3 层和下 3 层之间没有显著差异。阴坡 10—20 和 20—30 cm 土层 pH 值显著高于其他各层($p < 0.05$)。

表 1 土壤 pH 值特征值

土层/cm	坡顶	阳坡	坡底	阴坡
0—5	7.46±0.01 ^{Aa}	7.53±0.04 ^{Ca}	7.33±0.04 ^{Ba}	7.45±0.02 ^{Ca}
5—10	7.43±0.02 ^{Ab}	7.72±0.01 ^{Ba}	7.42±0.02 ^{Bb}	7.59±0.01 ^{Ba}
10—20	7.43±0.02 ^{Ac}	7.70±0.02 ^{Ba}	7.52±0.01 ^{Bb}	7.74±0.01 ^{Aa}
20—30	7.39±0.03 ^{Bb}	7.90±0.02 ^{Aa}	7.71±0.02 ^{Aa}	7.75±0.02 ^{Aa}
30—40	7.18±0.04 ^{Cc}	7.84±0.01 ^{Aa}	7.89±0.02 ^{Aa}	7.54±0.01 ^{Bb}
40—50	7.23±0.02 ^{Cb}	7.71±0.01 ^{Ba}	7.88±0.01 ^{Aa}	7.37±0.03 ^{Cb}
平均值	7.35	7.73	7.63	7.57

注:不同大写字母表示同一坡位不同土层之间在 0.05 水平差异显著;小写字母表现同一土层不同坡位之间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2 微地形对有机碳 C 含量的影响

由表 2 可知,不同坡位有机碳含量平均值顺序为:坡底>阴坡>阳坡>坡顶;同一土层不同坡位,0—5 cm 土层有机碳含量顺序为:坡底>阴坡>阳坡>坡顶,且坡位之间差异显著($p < 0.05$)。5—10,10—20 和 20—30 cm 这 3 层土壤有机碳含量变化一致,阴坡显著高于阳坡、坡底和坡顶($p < 0.05$),阳坡最低。30~40 和 40~50 cm 变化规律一致,其中坡

底最高,显著高于阴坡、阳坡和坡顶($p < 0.05$),阴坡显著高于阳坡和坡顶($p < 0.05$),阳坡和坡顶之间差异不显著。同一坡位不同土层,0—5 cm 土壤有机碳含量显著高于其他各层($p < 0.05$),其中阴坡、阳坡和坡顶各层土壤均随土层深度增加有机碳含量逐渐降低,坡底土壤有机碳略有差异,土壤有机碳含量最低值出现在 10—20 cm,且该层土壤有机碳含量显著低于其他各层($p < 0.05$)。

表 2 不同坡位和土层土壤有机碳含量变化 g/kg

土层/cm	阴坡	阳坡	坡底	坡顶
0—5	2.01±0.32 ^{Ab}	1.73±0.63 ^{Ac}	2.70±0.59 ^{Aa}	0.72±0.22 ^{Ad}
5—10	1.57±0.22 ^{Ba}	0.86±0.35 ^{Bc}	1.17±0.27 ^{Db}	0.54±0.20 ^{Bd}
10—20	1.75±0.19 ^{Ba}	0.58±0.14 ^{Cc}	0.87±0.26 ^{Eb}	0.57±0.15 ^{Bc}
20—30	1.52±0.13 ^{Ba}	0.37±0.12 ^{Dc}	1.36±0.40 ^{Cb}	0.41±0.18 ^{Cc}
30—40	0.85±0.18 ^{Cb}	0.41±0.18 ^{Dc}	1.51±0.44 ^{Ba}	0.44±0.12 ^{Cc}
40—50	1.42±0.23 ^{Bb}	0.39±0.09 ^{Dc}	1.63±0.80 ^{Ba}	0.28±0.10 ^{Dc}
平均值	1.52	0.72	1.54	0.49

2.3 微地形对全 P 含量的影响

由表 3 可知,同一坡位不同土层全磷含量平均值大小顺序为:坡底>阴坡>坡顶>阳坡;同一土层不同坡位,0—5,20—30 30—40 cm 坡底土壤全磷含量显著高于阴坡、阳坡和坡顶($p < 0.05$),0—5 cm 坡底土壤全磷含量显著高于阴坡、阳坡和坡顶($p < 0.05$),10—20 cm 阴坡土壤全磷含量显著高于阳坡、坡顶和坡底($p < 0.05$),40—50 cm 坡底和阴坡土壤全磷含量显著高于阳坡和坡顶($p < 0.05$);同一坡位不同土层,土壤全磷含量均呈现随着土层的增加逐渐升高的变化趋势,但差异显著性因坡位的不同而略有差异。

表 3 不同坡位和土层对土壤全磷含量的影响

土层/cm	阴坡	阳坡	坡底	坡顶
0—5	0.078±0.000 ^{Cb}	0.065±0.013 ^{Bb}	0.090±0.013 ^{Ba}	0.040±0.009 ^{Cc}
5—10	0.071±0.001 ^{Ca}	0.065±0.008 ^{Bb}	0.079±0.004 ^{Ca}	0.065±0.003 ^{Bb}
10—20	0.074±0.013 ^{Ca}	0.050±0.013 ^{Cc}	0.068±0.008 ^{Cb}	0.060±0.018 ^{Bb}
20—30	0.089±0.010 ^{Bb}	0.062±0.004 ^{Bd}	0.092±0.011 ^{Ba}	0.074±0.004 ^{Bc}
30—40	0.096±0.003 ^{Ab}	0.079±0.009 ^{Ad}	0.112±0.012 ^{Aa}	0.085±0.005 ^{Ac}
40—50	0.084±0.013 ^{Ba}	0.049±0.006 ^{Cc}	0.085±0.023 ^{Ba}	0.062±0.008 ^{Bb}
平均值	0.082	0.062	0.088	0.064

2.4 微地形对全 N 含量的影响

由表 4 可以看出不同坡位土壤含氮量具有显著差异,其中坡顶和阳坡所测定的各层土壤含量除阳坡 0—5 和 10—20 cm 以及坡顶 5—10 cm 外其他各层均为痕量;阴坡土壤全氮含量随着土层的下降呈现逐渐下降的变化趋势,表层 0—5 cm 土壤全氮含量最高,30—40 cm 土壤含氮量最低;坡顶土壤全氮含量也随

着土层的增加呈现逐渐降低的变化趋势,表层 0—5 cm 土壤含氮量最高,40—50 cm 土壤含氮量为痕量最低。

2.5 变异系数

通过计算不同微地形条件下各层土壤 pH 值、有机碳和全磷含量的变异系数(表 5)可知:①各坡位 pH 值变异系数平均值大小顺序为:坡顶>阳坡>坡

底>阴坡;②各取样土层土壤 pH 值变异系数呈现先增加后降低的变化趋势,30—40 cm 土层变异系数最高,0—5 cm pH 值变异系数最小;③阳坡表层 pH 值变异系数最高,30—50 cm 土层 pH 值变异系数最低;④坡底 pH 值变异系数表层最高,10—20 和 40—50 cm 变异系数较低;⑤阴坡 pH 值变异系数 40—50 最高,5—10 cm 最小。

表 4 坡位和土层对土壤全氮含量的影响 %

土层/cm	阴坡	阳坡	坡底	坡顶
0—5	0.019	0.006	0.015	痕量
5—10	0.017	痕量	0.002	0.001
10—20	0.012	0.001	0.001	痕量
20—30	0.009	痕量	0.004	痕量
30—40	0.006	痕量	0.001	痕量
40—50	0.007	痕量	痕量	痕量

表 5 土壤 pH 值、有机碳、全磷含量变异系数

土层/cm	pH 值变异系数				有机碳含量变异系数				全磷含量变异系数			
	阴坡	阳坡	坡底	坡顶	阴坡	阳坡	坡底	坡顶	阴坡	阳坡	坡底	坡顶
0—5	4.17	4.05	4.09	1.12	1.83	20.13	23.64	14.53	0.159	0.364	0.314	0.216
5—10	5.82	1.28	1.79	1.98	0.75	12.13	24.46	15.02	0.137	0.41	0.377	0.229
10—20	17.03	1.84	0.61	2.35	1.25	26.1	29.76	12.53	0.109	0.241	0.257	0.3
20—30	10.96	2.38	1.8	2.58	1.69	7.08	5.26	12.16	0.087	0.313	0.441	0.295
30—40	13	1.39	1.77	3.95	1.36	11.41	5.37	10.67	0.21	0.445	0.26	0.291
40—50	15	1.24	0.8	1.51	3.09	12.09	13.42	26.48	0.164	0.226	0.343	0.489
平均值	10.99	2.03	1.81	2.25	1.66	14.83	13.65	13.57	0.144	0.333	0.332	0.303

3 结论与讨论

土壤营养物质含量对植物的生长发育具有至关重要的意义,也是草地评价的重要参考指标。在对土壤营养物质研究过程中学者们发现气候因素、植被类型以及人类的活动对土壤营养物质含量均有重要的影响。如,气候因素中的降雨、温度变化是影响植物草地植被生产力的重要因素;同时气候因素还会影响到土壤微生物的活动,促使土壤中各类营养物质及植物凋落物和残体分解,从而影响到土壤中营养物质的数量和有效性;人类活动对草地营养物质的影响主要表现在人类对草地的利用方面。如放牧利用,已有研究表明不同的放牧强度对草地土壤营养物质含量的影响不同,重度放牧使草地土壤营养物质减少,适度放牧能够有效地提高草地营养物质含量^[22-23];植被对草地营养物质含量的影响更为明显,如豆科牧草含量丰富的草地能够有效地固定氮,提高草地土壤氮素的含量,促进植物生长发育,提高凋落物和植物组织脱落组织在草地生态系统中的含量,从而达到提高土壤营养物质的目的。在较小范围内,气候因素、利用方

不同坡位有机碳变异系数平均值大小顺序为:阳坡>坡底>坡顶>阴坡;相同土层不同坡位土壤有机碳变异系数没有规律可循,其中,0—5 和 5—10 cm 土层阳坡土壤全碳变异系数最高,阴坡最低;其他各层土壤有机碳变异系数均以阴坡最低;对于相同坡位不同土层土壤有机碳变异系数没有表现出一致的规律。不同坡位土壤全磷含量变异系数平均值大小顺序为:阳坡>坡底>坡顶>阴坡;阴坡各层土壤全磷含量变异系数下层高于上层,0—5 cm 土层土壤含磷量变异系数最低;阳坡表层 0—5 cm 土壤含磷量变异系数最高,20—30 cm 最低;坡顶 40—50 cm 土壤全磷含量变异系数最高,其他各层变异系数数值比较接近;坡底 0—5,5—10 和 10—20 cm 变异系数比较大,20—30 和 30—40 cm 土层土壤全磷变异系数比较低。

式基本一致的情况下,地形的变化也是影响土壤营养物质含量的重要因素。

有学者在岷江丘陵微地形土壤营养物质研究过程中得出:下坡位>上坡位>中坡位,低山微地形土壤营养物质含量则是:下坡位>中坡位>上坡位^[24];而耕地用途为主的丘陵微地形土壤营养物质研究过程中,坡上部土壤有机质和养分贫瘠,而在坡下部相对富集土壤有机质、全甲、碱解氮、有效磷等,且不同坡位之间出现显著差异^[25]。本研究通过对沙地微地形的坡底、阳坡、阴坡和坡顶土壤有机碳、全磷和全氮含量的测定及比较分析得出阴坡和坡底的营养物质含量均要高于坡顶和阳坡,该结论与上述各项的研究结论基本一致。其原因主要有以下两点:第一,植被的影响,在沙地生境条件下阴坡和坡底植被比较丰富,生物量比较高,是土壤表面具有较多凋落物和土壤中存在较多的植物脱落或者死亡的残体,这些物质的分解会提高土壤营养物质含量。同时大量植物的存在也时提高了对地表水土流失数量,其大量的根系也起到防风固沙的作用,从而减少了因风蚀和水蚀作用下营养物质的流失,这是坡底和阴坡土壤营养物质

较高的主要原因^[26];第二,由于阴坡和坡底土壤含水量要高于阳坡和坡顶,这大大改善的土壤的微环境,增加了微生物的种类和数量,也提高了微生物的活力,对枯落物、植物残体和土壤养分的分解提供了相对优良的环境条件,这也是阴坡和坡底营养物质高于坡顶和阳坡的重要原因^[27]。

[参 考 文 献]

- [1] 程先富,史学正,于东升,等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(1):64-67.
- [2] 潘成忠,上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):5-9.
- [3] 宋述军,李辉霞,张建国. 黄土高原坡地单株植物下的微地形研究[J]. 山地学报,2003,21(1):106-109.
- [4] 张宏芝,朱清科,王晶,等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报,2011,31(6):55-59.
- [5] Pennings S C, Grant M B, Bertness M D. Plant zonation in low-latitude salt marshes: Disentangling the roles of flooding, salinity and competition [J]. *Journal of Ecology*, 2005,93(1):159-167.
- [6] Casanova M T, Brock M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities[J]. *Plant Ecology*, 2000,147(2):237-250.
- [7] 张宏芝,朱清科,赵磊磊,等. 陕北黄土坡面微地形土壤化学性质[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):20-25.
- [8] 孟庆香,刘国彬,杨勤科. 黄土高原土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究,2008,15(3):20-22.
- [9] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京:农业出版社,1989:2-22.
- [10] 方江平. 西藏色季拉山土壤的性状与垂直分布山地研究[J]. 山地研究,1997,15(4):228-233.
- [11] Pennock D J. Precision conservation for co-management of carbon and nitrogen on the Canadian prairies [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005(60):396-401.
- [12] 程先富,史学正,于东升,等. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. 地理研究,2004,23(2):211-217.
- [13] 郭然,王效科,刘康,等. 樟子松林下土壤有机碳和全氮储量研究土壤[J]. 土壤,2004,36(2):192-196.
- [14] 张振国,黄建成,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工柠条林土壤养分特征及其空间变异[J]. 水土保持通报,2007,27(5):144-120.
- [15] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, et al. Soil properties associated with landscape position[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993,57(1):235-239.
- [16] Miller M P, Singer M, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988,52(4):1133-1142.
- [17] 郭胜利,刘文兆,史竹叶,等. 半干旱流域土壤养分分布特征及其与地形、植被的关系[J]. 干旱地区农业研究,2004,21(4):40-43.
- [18] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):53-58.
- [19] 赵海霞,李波,刘颖慧,等. 皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状[J]. 生态学报,2005,25(8):2010-2018.
- [20] 刘世梁,郭旭东,连纲. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析:以横山县为例[J]. 水土保持学报,2005,19(5):105-108.
- [21] 葛方龙,张建辉,苏正安,等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 生态学报,2007,27(2):459-464.
- [22] 戎郁萍,韩建国,王培. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地,2001,23(4):41-47.
- [23] 张蕴薇,韩建国,李志强. 放牧强度对土壤物理性质的影响[J]. 草地学报,2002,10(1):74-78.
- [24] 刘世梁,傅伯杰,马克明,等. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(1):26-30.
- [25] 朱德兰,吴发启. 不同地形部位土壤水分的年内变化分析[J]. 水土保持科学,2003,4(1):28-31.
- [26] 何东,魏新增,李连发,等. 神农架山地河岸带连香树的种群结构与动态[J]. 植物生态学报,2009,33(3):469-481.
- [27] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报,2002,22(4):6-9.