

# 坡位对土壤水分及植被空间分布的影响

田 迅<sup>1</sup>, 高 凯<sup>1</sup>, 张丽娟<sup>1</sup>, 于永奇<sup>1</sup>, 韩国栋<sup>1,2</sup>

(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] 探讨微地形对土壤含水量和生物量的影响, 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沙地样地为研究对象, 对坡底、坡顶、阴坡和阳坡等坡位的植被和土壤水分等指标的测定, 对其进行方差分析和相关性分析。[结果] 坡底以多年生杂类草占优, 阴坡以灌木、半灌木及多年生禾草为主, 阳坡以灌木、半灌木、多年生禾草及 1、2 年生植物为主, 坡顶以多年生禾草和 1、2 年生草本植物为主; 0—50 cm 土壤平均含水量的大小顺序为: 坡底 > 阴坡 > 阳坡 > 坡顶, 生物量顺序与土壤平均含水量一致; 坡顶、坡底、阳坡和阴坡各层土壤水分变异系数由大到小的顺序因土层和坡位的不同而表现出一定的差异性, 0—50 cm 各层平均变异系数坡顶最大, 坡底次之, 阳坡最低; 生物量和各层土壤含水量均呈现正相关关系, 其中 0—5, 5—10 和 20—30 cm 土壤含水量与生物量之间表现为极显著线性正相关 ( $p < 0.01$ )。[结论] 微地形对植被种类和土壤含水量具有一定影响, 且土壤含水量和植物生物量呈现正相关关系。

**关键词:** 微地形; 生物量; 含水量; 变异系数; 沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0012-05

中图分类号: S152.7, Q948.11

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.068

## Effects of Slope Position on Spatial Distribution of Soil Water and Vegetation in Sandy Land

TIAN Xun<sup>1</sup>, GAO Kai<sup>1</sup>, ZHANG Lijuan<sup>1</sup>, YU Yongqi<sup>1</sup>, HAN Guodong<sup>1,2</sup>

(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] To study the impacts of micro-topography on plant functional groups, biomass and soil water content in order to provide theoretical reference for environmental construction and reasonable development in the Hunshadake sandy land area. [Methods] The investigations were conducted in sandy land, in Inner Mongolia grassland ecosystem research station (IMGERS). Soil water content, biomass and plant functional groups were investigated under different micro-topographic conditions. [Results] The bottom of hill was dominated by perennial grass, while the top of hill was dominated by perennial grasses and annual or biennial herb. Shrub, subshrub and perennial grasses were distributed on the north-facing slopes, while shrub, subshrub, perennial grasses and annual or biennial herb were distributed on the south-facing slopes. The soil water content (0—50 cm) was showed as follows: bottom of the slope > north-facing slope > south-facing slope > top of the slope, and same trend was showed in biomass. Coefficient of variation of soil water content (0—50 cm) was the greatest at the top of the slope, while it was the lowest at the bottom of the slope. Aedbetween biomass and soil water content, and significant linear correlation existed between biomass an soil water content in top soil (0—5 cm), soil at the depth of 5—10 cm and 20—30 cm ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Micro-topography influences soil water content and florisitics, and there is a significant positive correlation between soil water content and biomass.

**Keywords:** micro-topography; biomass; water content; coefficient of variation; sandy land

收稿日期: 2014-06-15

修回日期: 2014-08-02

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”(2013 MS0525); 内蒙古自治区重大科技项目(20101405); 国家自然科学基金项目(31360574)

第一作者: 田迅(1970—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 副教授, 研究方向为草地资源与利用。E-mail: tianxun168@163.com。

通信作者: 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研究。E-mail: gaokai555@126.com。

生境条件与植被生物量和土壤含水量之间关系密切,尤其在非地带性环境因子起主导作用或在较小尺度上,局部环境条件的变化则成为改变植被生物量和土壤含水量的重要因素<sup>[1]</sup>。微地形通过地表起伏等形态的变化促使光、热、土壤水分及各类营养物质在空间上重新分配,从而引起植物生物量和土壤基本理化性质发生相应的变化<sup>[2-3]</sup>。

关于微地形与植被特征之间相关性的研究中中外学者做了大量工作。其中对丘陵地区微地形进行了识别和分类,并对植被空间分布格局与微地形之间关系进行了细致的研究,其认为坡面是影响植被的基本单元,上部坡面和下部坡面之间植物的种类组成、优势植物分布情况以及个体的大小均有显著差异,微地形各组分之间亦有显著差异,但在植被变化过程中是一种渐变式的而非跃变,即植被变化具有一定的连续性<sup>[4]</sup>;同时学者在对微地形的研究过程中证实微地形对植被的盖度、密度也具有显著影响,且坡度也是微地形影响植被分布的重要因素之一<sup>[5]</sup>。中国微地形和植被特征关系方面研究主要集中于海拔、坡度、坡向等中小尺度基础上,从地理位置来看主要集中在东部亚热带丘陵地区<sup>[6]</sup>。例如:在浙江天童山国家森林公园进行的微地形单元与植被格局相关性的研究过程中,认为上部坡面和谷头凹地尽管缺乏乔木层但林分密度较高,且下部坡面各微地形单元林分密度虽低于上部坡面,但具有复杂的垂直结构<sup>[7]</sup>;还有学者通过对陕北黄土区浅沟地貌与植被之间关系的研究后得出,浅沟的盖度、地上生物量和枯落物重均显著高于对照坡面,但两者之间表征多样性的因子却无明显差异<sup>[8]</sup>。关于微地形土壤水分变化的相关研究也是微地形研究过程中的重点内容,国内学者分别从坡面尺度、小流域尺度及集水区尺度和区域尺度等 3 个尺度对土壤水分时空分布规律进行了研究,其研究内容包括坡向、坡位、海拔、坡度等对土壤含水量的影响<sup>[9-12]</sup>。

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下,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。在生态环境建设过程中,植被特征和土壤水分方面的研究是必不可少的,而地形条件的变化是影响植被特征和土壤含水量的主要因素。而关于沙地植被特征和土壤含水量方面的研究多集中于大尺度,针对沙地微地形植被特征和土壤含水量方面的研究相对较少。本项目拟针对浑善达克沙地植被生物量和土壤含水量微地形变

异性进行研究,全面系统的分析浑善达克沙地不同微地形植被特征及土壤含水量的变化规律,以期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

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,地理坐标为: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 月平均气温分别为 -21.3 和 18.6 °C,无霜期 91 d。草原植物生长期约 150 d。多年平均降水量约为 350 mm,其中 5—9 月的降水量占年降水量的 86%。主要植物为沙鞭(*Psammochloa villosa*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)等。

### 1.2 取样方法

将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。其中坡顶位是沿着脊线的缓坡,占据了坡面的最上面区域,阴坡与阳坡则是略低于坡顶,坡底则是微地形中凹地积水区。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,取样点间距离为 30 m,于 2013 年 8 月 15 日在每个取样点上利用 2.5 m×2.5 m 的样方进行植被调查和土壤取样。植物进行不分种取样,带回实验室在 105 °C 下杀青 30 min,75~80 °C 下烘干称重,同时针对 0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40 和 40—50 cm 等 6 个土层,利用土钻在每个取样点上随机取 5 钻,将同层土壤进行混合,再利用四分法进行土壤取样,带回实验室利用烘干法进行土壤水分测定。

### 1.3 相关计算与数据统计方法

1.3.1 微地形土壤水分变异系数 变异系数( $C_v$ )表示土壤水分在空间变异的程度,是各层土壤水分标准差与均值的比值,它的大小反映了各层水分的稳定性。 $C_v$  越大,说明样点含水量变化越剧烈; $C_v$  值越小,土壤含水量越稳定。

1.3.2 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 不同微地形条件对群落功能群组成的影响

地形条件对群落的物种组成和生活性均有一定

影响。从研究结果可以看出,坡底以多年生杂类草占优,其次是灌木、半灌木;阴坡以灌木、半灌木及多年生禾草为主;阳坡以灌木、半灌木、多年生禾草及 1,2 年生植物为主;坡顶多年生禾草和 1,2 年生草本植物略占优势(表 1)。

坡顶植物总数为 12 种,坡底植物种类为 11 种,阴坡和阳坡均为 10 种。从组成功能群的物种数量来看:阴坡灌木、半灌木 5 种,阳坡和坡底灌木、半灌木 3 种,坡顶灌木半灌木 2 种,均为豆科和菊科植物;多年生禾草阴坡和坡顶均为 4 种,阳坡 3 种,坡底 1 种,其中沙

芦草为共有种;多年生杂类草坡底 5 种,均为菊科植物,坡顶 2 种,阳坡 1 种,阴坡 0 种;1,2 年生草本植物阴坡 1 种,坡底 2 种,阳坡 3 种,坡顶 4 种(表 1)。

生态功能群中:旱生阴坡 7 种,占物种总数的 70%,阳坡 8 种,占物种总数的 80%,坡底 6 种,占总数的 55%,坡顶 9 种,占总数的 75%;中旱生植物阴坡 1 种,占物种总数 1%,阳坡 1 种,占物种总数 1%,坡底 5 种,占物种总数 45%,坡顶 2 种,占物种总数 17%;中生植物阴坡 2 种,占总数 2%,阳坡 1 种,占总数 10%,坡底 0 种,坡顶 1 种,占总数 8%(表 1)。

表 1 不同微地形条件下群落生活型功能群的物种组成

植物类别	阴坡	阳坡	坡底	坡顶
灌木、半灌木	小叶锦鸡儿( <i>C. microphylla</i> ) <sup>③</sup>	小叶锦鸡儿( <i>C. microphylla</i> ) <sup>③</sup>	褐沙蒿( <i>Artemisia halodendron</i> ) <sup>③</sup>	小叶锦鸡儿( <i>C. microphylla</i> ) <sup>③</sup>
	冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> ) <sup>③</sup>	冷蒿( <i>A. frigida</i> ) <sup>③</sup>	黄蒿( <i>Artemisia annua</i> ) <sup>③</sup>	褐沙蒿( <i>A. halodendron</i> ) <sup>③</sup>
	胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> ) <sup>①</sup>	地烧瓜( <i>Cynanchum thesioides</i> ) <sup>③</sup>	黑沙蒿( <i>Artemisia ordosica</i> ) <sup>③</sup>	
	褐沙蒿( <i>A. halodendron</i> ) <sup>③</sup>			
	地烧瓜( <i>C. thesioides</i> ) <sup>③</sup>			
多年生禾草	羊茅( <i>Festuca ovina</i> ) <sup>②</sup>	沙芦草( <i>A. mongolicum</i> ) <sup>③</sup>	沙芦草( <i>A. mongolicum</i> ) <sup>③</sup>	沙芦草( <i>A. mongolicum</i> ) <sup>③</sup>
	沙芦草( <i>Agropyron</i> ) <sup>③</sup>	隐子草( <i>Cleistogenes serotina</i> ) <sup>①</sup>		大针茅( <i>Stipa grandis</i> ) <sup>③</sup>
	沙鞭( <i>Psammodloa villosa</i> ) <sup>③</sup>	沙鞭( <i>P. villosa</i> ) <sup>③</sup>		隐子草( <i>C. serotina</i> ) <sup>①</sup>
	早熟禾( <i>Poa pratensis</i> ) <sup>①</sup>			沙鞭( <i>P. villosa</i> ) <sup>③</sup>
多年生杂类草		花旗杆( <i>Dontostemon dentatus</i> ) <sup>②</sup>	草地麻花头( <i>Serratula centauroides</i> ) <sup>②</sup>	沙茴香( <i>Ferula bungeana</i> ) <sup>②</sup>
			菊叶委陵菜( <i>Potentilla tanacetifolia</i> ) <sup>②</sup>	苔草( <i>Carex dospalata</i> ) <sup>②</sup>
			星毛委陵菜( <i>Potentilla acaulis</i> ) <sup>②</sup>	
			凤毛菊( <i>Saussurea auriculata</i> ) <sup>②</sup>	
			二裂委陵菜( <i>Potentilla bifurca</i> ) <sup>②</sup>	
1,2 年生草本	狗尾草( <i>Setaira viridis</i> ) <sup>③</sup>	狗尾草( <i>S. viridis</i> ) <sup>③</sup>	狗尾草( <i>S. viridis</i> ) <sup>③</sup>	狗尾草( <i>S. viridis</i> ) <sup>③</sup>
		马唐( <i>Digitaria sanguinalis</i> ) <sup>③</sup>	马唐( <i>D. sanguinalis</i> ) <sup>③</sup>	马唐( <i>D. sanguinalis</i> ) <sup>③</sup>
		猪毛菜( <i>Salsola collina</i> ) <sup>③</sup>		猪毛菜( <i>S. collina</i> ) <sup>③</sup>
			白婆婆纳( <i>Pseudolysimachion incanum</i> ) <sup>③</sup>	

注:①表示中生植物;②表示中旱生植物;③表示旱生植物。

2.2 微地形水分特征分析

2.2.1 不同微地形含水量特征值 由表 2 可知,坡顶、阳坡、坡底和阴坡土壤含水量随着土层深度加深含水量均呈现逐渐升高的变化趋势;平均含水量的大小顺序为:坡底>阴坡>阳坡>坡顶,其中坡底和阴坡显著高于坡顶和阳坡,坡顶显著低于阳坡、阴坡和坡底( $p < 0.05$ );不同土层含水量变化趋势略有差异,没有规律可循,0—5 cm 土层坡底和阴坡含水量显著高于阳坡和坡顶( $p < 0.05$ ),阳坡显著高于坡顶( $p < 0.05$ );5—10 和 20—30 cm 土层阴坡和坡底显著高于阳坡和坡顶( $p < 0.05$ ),阴坡和坡底以及阳坡和坡顶之间没有显著差异;10—20 cm 土层阴坡、坡底和坡顶显著高于阳坡;30—40 和 40—50 cm 土层阳

坡、坡底和阴坡显著高于坡顶,阳坡、坡底和阴坡三者之间没有显著差异。

表 2 土壤含水量特征值 %

土层/cm	坡顶	阳坡	坡底	阴坡
0—5	0.44±0.14 <sup>c</sup>	1.04±0.25 <sup>b</sup>	1.28±0.40 <sup>a</sup>	1.43±0.24 <sup>a</sup>
5—10	1.45±0.33 <sup>b</sup>	1.31±0.52 <sup>b</sup>	1.64±0.20 <sup>a</sup>	1.89±0.49 <sup>a</sup>
10—20	1.76±0.80 <sup>a</sup>	1.46±0.59 <sup>b</sup>	1.76±0.37 <sup>a</sup>	1.78±0.36 <sup>a</sup>
20—30	1.88±0.40 <sup>b</sup>	1.63±0.22 <sup>b</sup>	2.21±0.64 <sup>a</sup>	2.08±0.89 <sup>a</sup>
30—40	1.82±0.26 <sup>b</sup>	2.48±0.32 <sup>a</sup>	2.99±0.53 <sup>a</sup>	2.05±0.79 <sup>a</sup>
40—50	1.90±0.39 <sup>b</sup>	2.51±0.34 <sup>a</sup>	2.14±1.21 <sup>a</sup>	2.26±0.56 <sup>a</sup>
平均值	1.55 <sup>c</sup>	1.74 <sup>b</sup>	2.00 <sup>a</sup>	1.92 <sup>a</sup>

注:不同小写字母表示不同坡位之间在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2.2 不同微地形土壤水分变异系数 通过计算不同微地形条件下各层土壤含水量的变异系数(表 3)可知:阳坡、阴坡和坡底各层土壤变异系数随着土层深度的增加呈现逐渐降低的变化趋势,30—40 和 40—50 cm 层土壤含水量变异系数最小,且变异系数值比较接近,坡顶土壤变异系数呈现随着各层深度的增加呈现先增加后降低的变异系数;不同微地形各土层的土壤水分变细系数由大到小的顺序均不一样,整体上看坡顶土壤变异系数最大,坡底次之,阳坡最低。

表 3 土壤水分变异系数

土层/cm	坡 顶	阳 坡	坡 底	阴 坡
0—5	21.13	23.53	31.09	25.91
5—10	31.52	23.16	39.44	20.73
10—20	45.22	12.45	40.00	20.09
20—30	42.89	13.80	29.12	21.33
30—40	38.54	12.74	17.78	14.53
40—50	24.81	13.66	23.71	17.03
平均值	34.02	16.56	30.19	19.94

2.3 不同微地形生物量分析

由图 1 可知,生物量顺序为:阴坡 > 坡底 > 阳坡 > 坡顶,且各坡位之间生物量存在显著差异( $p < 0.05$ ),其中阴坡生物量最高约 313.55 g/m<sup>2</sup>,坡顶最小约为 39.51 g/m<sup>2</sup>,且生物量的大小顺序与土壤平均含水量排序基本一致(表 2),也证明沙地土壤含水量是决定植被生长的重要因素。

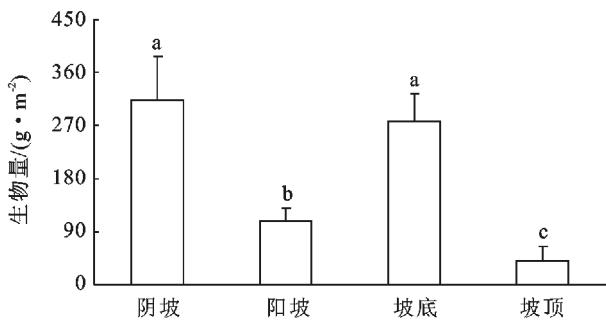


图 1 微地形对生物量的影响

2.4 微地形生物量与土壤水分含量相关性分析

对不同微地形条件下生物量和土壤含水量相关性分析(表 4)。结果表明生物量和各层土壤含水量均呈现正相关关系,其中 0—5,5—10 和 20—30 cm 土壤含水量与生物量之间表现为极显著线性正相关( $p < 0.01$ ),40—50 cm 生物量与土壤含水量之间呈现显著线性正相关( $p < 0.05$ ),10—2 和 30—40 cm 土壤含水量和生物量之间呈现正相关关系但不显著,其值分别为 0.302 和 0.301。

表 4 土壤含水量与生物量相关性分析

土层/cm	方程	相关系数 $r$	样本数 $n$
0—5	$y=0.321x+0.245$	0.951**	40
5—10	$y=0.165x+1.160$	0.848**	40
10—20	$y=0.036x+1.600$	0.302	40
20—30	$y=0.118x+1.655$	0.602**	40
30—40	$y=0.120x+2.035$	0.301	40
40—50	$y=0.071x+2.025$	0.361*	40

注:y 为生物量(MJ/kg); x 为含水量(%); \*:  $r_{0.05(38)}=0.3165$ ; \*\* :  $r_{0.01(38)}=0.4082$ 。

3 结论与讨论

植物和环境之间的互相关系作为植物群落的本质特征,一直是生态学研究的热问题<sup>[13]</sup>。从全球范围内的植被地带性变化规律到由于局部地势变化而引起的非地带性规律均进行了大量研究<sup>[14-17]</sup>。微地形作为非地带性的主要研究案例,学者们围绕其也进行了大量研究。并证实海拔、坡度、坡向、等微地形组成部分对植被空间分布均具有显著影响<sup>[1,3]</sup>。本研究通过对沙地微地形的阴坡、阳坡、坡顶和坡底等位置的植物种类、生活型等指标进行对比研究发现从生态类型功能群角度考虑坡底以中旱生杂类草为主,而阳坡、阴坡和坡顶均以旱生植物为主;从生活型角度考虑坡底以多年生杂类草占优、阴坡以灌木、半灌木及多年生禾草为主、阳坡以灌木、半灌木、多年生禾草及 1,2 年生植物为主、坡顶多年生禾草和 1,2 年生草本植物为主,无论从生态类型功能群角度还是从生活型角度考虑其均表明坡位对微地形植被空间分布具有显著影响,其结论与日本学者及我国学者的研究相一致。产生该结果的主要原因可能为:坡顶、阴坡和阳坡其持水保肥能力较差,促使大量水分向坡底聚集,导致不同坡位水肥条件具有显著差异,同时坡底由于地理条件独特,其温度也高于坡顶、阴坡和阳坡,因此由于微地形引起水、热在局部进行了再分配,最终导致植被空间分布的差异性。关于植物种类方面本研究与前人的研究略有差异,前人关于微地形不同坡位植物种类的相关研究认为坡位对植物种类的数量具有显著影响<sup>[2]</sup>,而本研究的结论坡底、阴坡、阳坡和坡顶的植物种类基本一致,其原因可能是由于本研究样地为多年围封。同时本研究结论中阳坡和坡顶 1,2 年生植物种类高于阴坡和坡底,其原因可能是由于坡顶和阳坡的含水量更容易受到外界环境条件的影响,波动性比较大,因此这种波动性促使水分条件好的时候 1,2 年生植物大量出现,而阴坡和坡底环境条件相对比较稳定。

土壤含水量作为土壤的主要物理性质,在大尺度上主要是由于地带性差异引起土壤含水量的空间变化,在中小尺度上地貌和地形的变化则是导致土壤含水量变化的主要因素,尤其是流域和坡面尺度上均会产生土壤含水量的空间差异性<sup>[18]</sup>。针对流域和坡面尺度(微地形)土壤含水量变化的研究具有重要意义,其研究结果将有助于植被恢复过程中种植对象的选择,能够有效地提高成活率,为不同坡位和流域的植被恢复提供依据,避免了种植植物选择的盲目性。本项目对沙地微地形与土壤含水量及生物量相关性研究,验证了“坡位”是影响土壤含水量和生物量的主要因素<sup>[7]</sup>。且大量研究已证实微地形的变化将影响到群落结构、植物种类及草层结构等植被特征,同时对土壤理化性质尤其是土壤含水量也具有一定的影响<sup>[2,11]</sup>。本项研究表明坡地和阴坡土壤含水量较高,阳坡次之,坡地最高。产生这一结果的主要原因为:首先,降雨后水分通过地表径流和土壤渗透向低洼地带转移和积累,这是坡底含水量较高的主要原因之一;其次,阴坡和坡底受自然干扰较低,尤其是风的影响较小,这也大幅度降低了土壤水分蒸发数量;最后,植被与土壤含水量之间关系密切,微地形土壤含水量高其植被生物量亦高(壤含水量高为植物的生长提供了丰富的水分供应,保证了植物的正常生长。),提高了植被的盖度,而植物盖度的提高也降低了土壤的蒸散量,提高了土壤含水量。而在坡顶和阳坡土壤水分较低,植被没法获得足够的水分,植被盖度降低,大面积地表裸露,导致地表蒸发剧烈,大量水分丧失,促使土壤含水量大幅度下降,又反作用于植被,使植被无法获得足够的水分,而生长受到抑制,生物量下降。

#### [参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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): 55-58.
- [4] Dai N, Yoshihiko H, Yukira M. Influence of micro-landforms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest[J]. Ecological Research, 2003, 18(5): 533-547.
- [5] Graham B, Martin J I, Marcia J W. Environmental heterogeneity and species diversity of forest sedges [J]. Journal of Ecology, 2000, 88(1): 67-87.
- [6] 杨永川,达良俊,由文辉. 浙江天童山国家森林公园微地形与植被结构的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2830-2841.
- [7] 沈泽昊,张新时,金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 430-435.
- [8] 南红梅,强世军,南红红,等. 陕北黄土高原丘陵沟壑区植被恢复中的障碍分析与应对策略:以子长县为例[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 47-50.
- [9] 徐海燕,赵文武,刘国彬,等. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土地利用格局变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 49-52.
- [10] 刘文兆,胡梦珺,侯喜禄,等. 半干旱黄土丘陵区小流域横断面土壤水分生态特征[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 95-100.
- [11] 邝高明,朱清科,刘中奇,等. 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 74-77.
- [12] 路保昌,薛智德,朱清科,等. 干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 62-65.
- [13] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海:华东师范大学出版社, 2001.
- [14] 肖德荣,袁华,田昆,等. 筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 815-822.
- [15] 姚成,万树文,孙东林,等. 盐城自然保护区海滨湿地植被演替的生态机制[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2203-2210.
- [16] 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.
- [17] Pennigs S C, Grant M B, Bertenss 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.
- [18] 赵荟,朱清科,秦伟,等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 64-68.