

# 陕北黄土区微地形土壤有效水饱和度

李增尧, 赵兴凯, 朱清科

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了明确不同微地形土壤有效水饱和度的特征以及与植被群落特征的关系, 采用小波分析、回归分析和 Mann-Kendall 趋势检验等方法, 分析了陕北黄土区阳向陡坡不同微地形 0~60 cm 土层深度的土壤有效水饱和度。结果表明: (1) 在 0~60 cm 土层深度范围内, 不同微地形土壤有效水饱和度顺序为塌陷 < 缓台 < 原状坡 < 切沟 < 浅沟 < 陡坎, 其中切沟、塌陷和陡坎的土壤有效水饱和度呈现显著增加趋势, 浅沟、缓台和原状坡的土壤有效水饱和度呈现下降趋势, 但趋势不显著; (2) 研究期间, 不同微地形土壤有效水饱和度的变化周期不同, 陡坎、塌陷和缓台的主周期相同, 为 22 个月, 浅沟、切沟和原状坡的主周期分别为 23、21 个月和 28 个月; (3) 在不同微地形中, Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数均与土壤有效水饱和度呈正相关关系, 其中 Shannon-Wiener 多样性指数和土壤有效水饱和度的相关性最高。

**关键词:** 陕北黄土区; 阳向陡坡; 微地形; 土壤有效水饱和度

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

## Saturation of available soil water for micro-topography in loess area of north Shaanxi

LI Zeng-yao, ZHAO Xing-kai, ZHU Qing-ke

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** The paper investigated the saturation of available soil water at soil depths of 0~60 cm for sunny, steep slope micro-topography in a loess area of north Shaanxi on the basis of wavelet analysis, regression analysis, and the Mann-Kendall trend test, aiming to clarify the characteristics of saturation of available soil water in different micro-topographies and its relationship with plant community characteristics. The following findings were made: (1) At soil depths of 0~60 cm, in terms of the saturation of available soil water, different landform units can be ranked in the following ascending order: collapse, platform, undisturbed slope, gully, shallow gully, and scarp. The saturation of available soil water of the gully, collapse, and scarp increased significantly; the saturation of the available soil water of the shallow gully, platform, and undisturbed slope showed a downward trend, but the trend was not significant. (2) During the study period, the main cycles of different micro-topographies were different. Scarp, collapse, and platform had the same main cycle. The main cycles of the shallow gully, gully, and undisturbed slope were 23, 21, and 28 months, respectively. (3) In different micro-topographies, the Margalef richness, Simpson diversity, Shannon-Wiener diversity, and Pielou evenness indices were positively correlated with the saturation of available soil water. The highest correlation was found between the Shannon-Wiener diversity index and the saturation of available soil water.

**Keywords:** loess area of north Shaanxi; sunny steep slope; micro-topography; saturation of available soil water

土壤水分是植物生长所需水分的直接来源<sup>[1]</sup>, 土壤水分不足及利用率低是干旱半干旱区植物生长和植被构建过程中存在的主要问题<sup>[2]</sup>, 土壤水分作

为干旱区半干旱区植被生长的主要限制因子<sup>[3]</sup>在陕北黄土区阳向坡面表现的更为显著<sup>[4]</sup>。

国内外对于土壤有效水的研究逐渐展开。

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2015BAD07B02); 深圳市铁汉生态环境股份有限公司合作项目(THRD002)

作者简介: 李增尧(1992—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为林业生态工程。E-mail: lizengyao@bjfu.edu.cn。

通信作者: 朱清科(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程及农林复合研究。E-mail: zhuqingke@sohu.com。

Verdaguer 等<sup>[5]</sup>研究了地中海地区夏季土壤有效水对于胭脂虫橡木幼苗存活的影响;Tramontini 等<sup>[6]</sup>研究了土壤表层有效水对于法国葡萄园生产潜力的影响;张治伟等<sup>[7]</sup>研究了岩溶山地不同土地类型表层土壤有效水库容。高晓东等<sup>[8]</sup>分析了黄土丘陵区小流域土壤有效水在不同季节的空间变异特征;吕文强等<sup>[9]</sup>分析了黄土高原地区山杏和柠条带状植物篱表层土壤水分有效性的空间分异和动态变化;蔡燕等<sup>[10]</sup>探讨了太行山山前平原的土壤有效水量和土壤水有效性的时间变化特征。潘春翔等<sup>[11]</sup>提出采用有效水容量来评价不同生态系统的土壤持水性能;代海燕等<sup>[12]</sup>研究了不同植被类型下的土壤有效水供给能力。

在我国黄土高原地区,各种侵蚀作用形成了不同的微地形如浅沟、切沟、缓台、陡坎等,这些微地形对降水有再分配的作用并影响水分入渗,从而对植被生长产生影响。邝高明等<sup>[13]</sup>研究了陡坡微地形的分布特征;赵荟等<sup>[14]</sup>和王晶等<sup>[15]</sup>研究了黄土高原阳坡微地形的不同土壤水分特征;张宏芝等<sup>[16-17]</sup>对陕北黄土区坡面微地形的土壤物理性质和化学性质进行了评价;卜耀军等<sup>[18]</sup>也做了相关类似研究;王晶等<sup>[19]</sup>分析了不同微地形的植被群落特征;邝高明等<sup>[20]</sup>分析了不同微地形土壤水分和生物量之间的关系。

此前学者的研究主要针对实测土壤水分,而土壤水分并不能完全被植物吸收利用,因此研究微地形的土壤水分有效性,对科学合理的植被配置,提高水分利用率有着极其重要的生态意义。因而,本文以陕北黄土区阳坡为研究对象,采用小波分析、回归分析和 Mann-Kendall 趋势检验等方法,分析不同微地形的土壤有效水饱和度,旨在明确不同微地形土壤有效水饱和度的特征以及与植被群落特征的关系,为陕北黄土区人工促进植被恢复提供理论依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市吴起县合家沟流域,地处东经 107°38′57″~108°32′49″,北纬 36°33′33″~37°24′27″,地貌属于黄土高原丘陵沟壑区,海拔高度 1 350~1 525 m,土壤为黄绵土。1957—2014 年平均降水量为 471.61 mm,其中 80%的降雨集中在 5—10 月份,年均温 8.03℃。1986 年自然封禁,经过近 30 年的封禁,合家沟流域的植被主要以赖草 (*Leymusse-*

*calinus*)、长芒草 (*Stipabungeana*)、早熟禾 (*Poaophondyloides*)、百里香 (*Thymus mongolicus*)、扁核木 (*Prinsepiauniflora*)、芦苇 (*Phragmitesaustralis*)、芨蒿 (*Artemisia giraldii*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、大针茅 (*Stipacapillata*)、萎陵菜 (*Potentillachinensis*)、胡枝子 (*Lespedezadavurica*) 等植物为主。

### 1.2 数据来源

本研究采用 TRIME-HD 型手持式读表高精度时域反射计测定合家沟封禁流域阳坡包含的 5 种微地形(浅沟是由于降雨汇流冲刷下切而形成的横断面为宽浅槽形,是侵蚀沟发育的初级阶段;切沟是浅沟侵蚀的继续发展,在长、宽、深方面的侵蚀同时进行,横断面呈“V”形;塌陷是指坡面在陷穴、集中股流溯源侵蚀等土壤侵蚀作用下形成的凹陷状地形;缓台指坡面局部坡度明显小于坡面平均坡度的平缓地段;陡坎是指坡面局部坡度明显大于坡面平均坡度的地段)<sup>[15]</sup>及其所在原状坡面的土壤体积含水量,每 10 cm 土层深度一层,每层重复测定 3 次取平均值,每次探针在水平方向上旋转 120°,土壤含水量定点监测时间为 2010 年 8 月—2013 年 6 月。每隔 10 天测定采集一次,为避免降水对土壤含水量的短期大幅影响,每次观测时间连续 7 日无明显降水。为确保测量值的足够稳定性,每次测量工作在一天内完成。

在采集土壤含水量的同时,每年的 8 月份在每个微地形内分别按照对角线法选定 3 个 1 m×1 m 的样方调查植被特征,取平均值作为本研究所使用指数的原始计算数据。

土壤容重和土壤田间持水量均用环刀法分层采样,经实验计算得出。土壤凋萎系数采用高速离心机(日本 H-1400pF)模拟<sup>[21]</sup>的方法测定。

### 1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验 在 Mann-Kendall<sup>[22-23]</sup>趋势检验中,原假设  $H_0$  是  $n$  个独立的随机变量同分布的时间序列数据  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;备择假设  $H_1$  是双边检验:对于所有的  $k, j \leq n$  且  $k \neq j$ ,  $x_k$  和  $x_j$  的分布不同,检验的统计变量  $S$  计算如公式(2):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

其中,  $\text{Sgn}(x)$  为符号函数,取值规则如(2)式:

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$S$  为正态分布,其均值为 0,方差  $\text{Var} = n(n-1)(2n+5)/18$ ,当  $n > 10$  时,标准的正态统计变量  $Z$  通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

在双边趋势检验中,在给定置信水平  $\alpha$  上,如果  $|Z| \geq Z_{1-(\alpha/2)}$  则原假设  $H_0$  不可接受,即在  $\alpha$  置信水平上时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 $Z$  为正则序列具有上升或增加趋势; $Z$  为负则序列,具有下降或减少的趋势。若正态统计变量  $Z$  的绝对值大于或等于 1.28,1.64 和 2.32,分别表示通过了信度 90%,95% 和 99% 的显著性趋势检验。

1.3.2 小波分析 小波分析(Wavelet analysis)被认为是傅立叶分析方法的突破性进展。在对时间序列的分析中,小波变换不仅可以给出时间序列的尺度,还可以显示出变化的时间位置,对气候的预测十分有效<sup>[24-26]</sup>。本研究应用软件 Matlab(R2010b)对所研究时间序列进行 Morlet 小波分析,研究陕北黄土区不同微地形土壤有效水饱和度的周期变化规律。对于时间序列  $f(t)$ ,小波变换定义:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4)$$

式中,  $W_f(a, b)$  为小波系数,  $a$  是伸缩因子(决定小波宽度),  $b$  是平移因子(反映小波位置移动的参量),  $\Psi^*$  是  $\Psi$  的共轭函数。

其连续小波变换解析形式为:

$$\Psi(x) = Ce^{-\frac{x^2}{2} \cos(5x)} \quad (5)$$

小波方差可表示为:

$$W_p(a) = W_f(a, b)^2 \quad (6)$$

## 1.4 数据处理

土壤体积含水量与土壤质量含水量换算按下式计算:

$$\theta_v = \theta_m \times \rho \quad (7)$$

其中,  $\theta_v$  为土壤体积含水量(%);  $\theta_m$  为土壤质量含水量(%);  $\rho$  为土壤容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

本文中土壤有效水为土壤含水量与凋萎系数的差值,若土壤含水量低于凋萎湿度,则为无效土壤水<sup>[27]</sup>。土壤有效水用公式可以表现为:

$$W_i = \frac{\theta_i - \theta_{\text{凋萎}i}}{\theta_{\text{田}i} - \theta_{\text{凋萎}i}} \times 100\% \quad (8)$$

式中,  $W_i$  为土壤有效水饱和度;  $\theta_i$  为  $i$  土层的土壤质量含水量(%);  $\theta_{\text{凋萎}i}$  为  $i$  土层的土壤凋萎系数(%);  $\theta_{\text{田}i}$  为  $i$  土层的土壤田间持水量(%)。

Margalef 物种丰富度指数  $D_{Ma}$ :

$$D_{Ma} = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (9)$$

其中  $S$  为物种数目;  $N$  为全部物种的个体总数。

Simpson 物种多样性指数  $D_{si}$ :

$$D_{si} = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \quad (10)$$

Shannon 物种多样性指数  $D_{sh}$ :

$$D_{sh} = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (11)$$

Alatalo 均匀度指数  $E_a$ :

$$E_a = (e^{D_{sh}} - 1) \left( 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2 - 1 \right) \quad (12)$$

式(10)、(11)和(12)中,  $P_i$  为物种  $i$  的重要值比例,  $i = 1, 2, \dots, S$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有效水饱和度及其趋势

不同微地形土壤特征(表 1)体现出不同微地形在形成过程中土壤质地发生变化,表现为同一坡面不同微地形相同土层深度的土壤容重、田间持水量和凋萎系数等的不同,其中土壤容重为塌陷 < 切沟 < 缓台 < 浅沟 < 原状坡 < 陡坎,切沟、缓台、浅沟、原状坡的容重相差不大。不同微地形的田间持水量和凋萎系数的大小顺序一致,均表现为塌陷 > 缓台 > 浅沟 > 陡坎 > 切沟 > 原状坡,且浅沟、切沟、塌陷的凋萎系数和田间持水量随着深度的增加都呈现下降的趋势。

在 0~60 cm 土层深度范围内,有效水含量的顺序为陡坎 > 浅沟 > 切沟 > 原状坡 > 缓台 > 塌陷。其中,浅沟、切沟和陡坎的土壤有效水含量随着深度的增加都呈现下降趋势,缓台土壤有效水含量随着深度的增加而增加。而塌陷和原状坡 20~40 cm 土壤有效水含量是最低的,其他深度土壤有效水含量相对较高。

不同微地形土壤有效水饱和度顺序为塌陷 < 缓台 < 原状坡 < 切沟 < 浅沟 < 陡坎。浅沟和切沟的土壤有效水的饱和度在各土层深度相差不大,土壤有效水的垂直分布均匀。而塌陷和缓台的 0~20 cm 土壤有效水饱和度都较低,这是由于塌陷和缓台的坡度较小,且塌陷质地较松软,土壤渗透能力相对较

强。陡坎和原状坡在 0~20 cm 的土壤有效水饱和度很高,但是随着深度的增加,土壤有效水的饱和度的降低也很明显。

MK-Z 为不同土层深度有效水饱和度的 MK 趋势检验统计量,结果表明,切沟、塌陷、陡坎 0~60 cm 土层深度的土壤有效水饱和度呈现显著增加趋势,

而浅沟、缓台、原状坡则呈现下降趋势,但下降趋势不显著。浅沟、原状坡和缓台 0~20 cm 的土壤有效水饱和度都呈现明显的下降趋势。切沟 40~60 cm 土层深度的土壤有效水饱和度以及塌陷、陡坎 20~40 cm,40~60 cm 土层深度的土壤有效水饱和度都呈现了明显的上升趋势。

表 1 不同微地形土壤特征

Table 1 The soil characteristics of different micro-topography

微地形 Micro-topography	土层深度 Depth /cm	凋萎系数 Wilting coefficient/%	田间持水量 Field capacity /%	容重 Bulk density /(g·m <sup>-3</sup> )	有效水含量 Available soil water/%	有效水饱和度 Saturation of available soil water/%	MK-Z	
浅沟 Shallow gully	0~20	7.12	35.12	1.19	4.75±2.90	16.97	-1.33*	-0.89
	20~40	6.61	32.70	1.21	4.51±3.13	17.29	-1.01	
	40~60	5.95	29.78	1.37	4.13±2.56	17.32	-0.98	
切沟 Gully	0~20	7.54	37.43	1.11	5.11±3.14	17.10	1.02	1.69**
	20~40	6.22	29.84	1.26	3.90±2.94	16.53	0.79	
	40~60	5.32	25.04	1.32	3.06±2.06	15.50	1.84**	
塌陷 Collapse	0~20	8.39	41.44	1.07	2.78±1.99	8.41	0.84	2.06**
	20~40	6.04	29.71	1.20	2.42±1.97	10.23	1.94**	
	40~60	5.95	29.59	1.19	2.77±1.92	12.11	2.25**	
缓台 Platform	0~20	7.22	36.11	1.22	2.53±2.67	8.75	-1.39*	-0.13
	20~40	5.98	29.90	1.30	3.31±2.33	13.82	0.06	
	40~60	6.70	33.25	1.22	4.65±2.64	17.50	-0.14	
陡坎 Scarp	0~20	6.74	33.68	1.24	11.80±2.30	43.79	0.19	1.58*
	20~40	5.82	28.46	1.37	4.37±2.52	19.29	1.29*	
	40~60	6.26	31.29	1.31	3.55±2.67	14.18	1.72**	
原状坡 Undisturbed slope	0~20	5.76	27.78	1.24	5.21±2.49	23.65	-1.56*	-0.78
	20~40	6.25	31.23	1.29	2.72±2.54	10.90	0.48	
	40~60	6.14	31.31	1.29	3.08±2.82	12.24	-0.85	

注:\* 通过 90%显著性检验,\*\* 通过 95%显著性检验。

Note: \* represents trends that were identified to be statistically significant at the 10% significance level; \*\* represents trends that were identified to be statistically significant at the 5% significance level.

## 2.2 0~60 cm 土层土壤水分饱和度周期分析

土壤有效水饱和度与降水入渗补给、水分蒸发蒸散及植物生长利用有关,由于影响入渗和水分蒸发蒸散的降水、气温等因素存在一定的周期性,所以探究土壤有效水饱和度的周期性变化规律可为人工促进植被恢复提供决策支撑。

2010年8月至2013年6月不同微地形0~60 cm 土层深度范围内,土壤有效水饱和度变化的 Morlet 小波变换系数实部等值线图和小波方差图如图 1 所示。在小波变化系数实部等值线图中,正值表示土壤有效水饱和度偏高,负值表示土壤有效水饱和度偏低。由图可知,浅沟土壤水分饱和度小波系数等值线在 7、14、23 个月左右时间尺度较为密集,且

发生了小波系数高低值中心的变化。土壤有效水饱和度小波方差图显示小波方差在 23、14 和 7 个月处存在极值,因此可以得出浅沟土壤有效水饱和度在 35 个月尺度内存在 23 个月的强显著周期,此外还有 14、7 个月的尺度变化周期。根据 Morlet 小波变换系数的实部等值线图和小波方差图可以得出土壤有效水饱和度变化的主周期为 23 个月。其余各微地形经过同样的分析,可得土壤有效水饱和度主周期分别为 21(切沟),22(塌陷),22(缓台),22(陡坎),28(原状坡)个月,结果表明不同微地形经过不同的主周期尺度可以恢复到原来土壤有效水饱和度水平,这体现了微地形对降水的再分配作用。

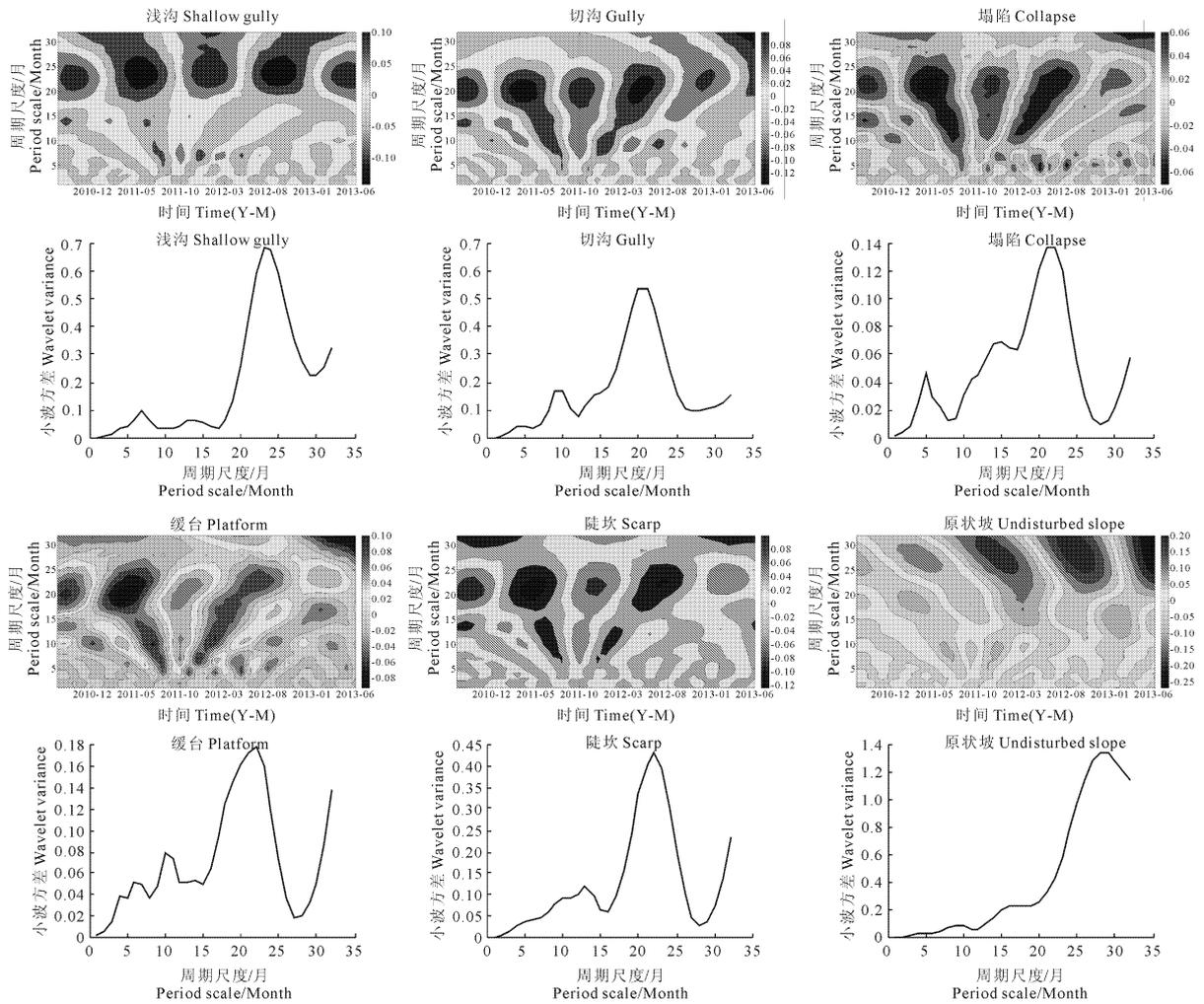


图 1 土壤有效水饱和度小波等值线图和方差图

Fig.1 The isoline of the real part of Morlet Wavelet coefficients, wavelet variance in the principal period scales of saturation of available soil water

### 2.3 植物群落特征与土壤有效水饱和度关系

本研究选用 Margalef 丰富度指数 (Ma)、Shannon - Wiener 多样性指数 (Sh)、Simpson 多样性指数 (Si) 和 Alatalo 均匀度指数 (Al) 研究植物群落特征与土壤有效水饱和度的关系。不同微地形的群落特征指数如表 2 所示。

表 2 植被群落特征指数

Table 2 Indexes of plant community characteristics

微地形 Micro-topography	Ma	Sh	Si	Al
塌陷 Collapse	1.97	1.2	0.62	0.62
缓台 Platform	2.35	1.28	0.59	0.56
原状坡 Undisturbed slope	1.97	1.26	0.64	0.64
切沟 Gully	2.34	1.52	0.73	0.67
浅沟 Shallow gully	2.25	1.45	0.70	0.70
陡坎 Scarp	2.48	1.70	0.76	0.71

表中数据表明,不同微地形中 4 种群落特征指数差异性较为明显,其中陡坎的丰富度指数 Ma 最大,切沟和缓台次之,浅沟的丰富度指数居中,塌陷和原状坡的丰富度指数最差。两个多样性指数 Sh 和 Si 的大小顺序基本相同,为陡坎 > 切沟 > 浅沟 > 缓台/原状坡 > 塌陷。均匀度 Al 陡坎 > 浅沟 > 切沟 > 原状坡 > 塌陷 > 缓台。陡坎的植物群落物种数量是最多的,物种分布是最均匀的,因而其多样性也最好。原状坡和塌陷的物种数较少,分布也不均匀,因为多样性指数较差。

将不同的植被群落特征指数和不同微地形土壤有效水饱和度进行相关性分析(图 2)的结果显示,在所有微地形之间,4 种指数均与土壤有效水饱和度呈正相关关系,其中 Shannon - Wiener 多样性指数和土壤有效水饱和度的相关性最高 ( $R^2$  最大,为 0.8426)。表明随土壤有效水饱和度的增加,群落的丰富度、多样性和均匀度均有所增加。

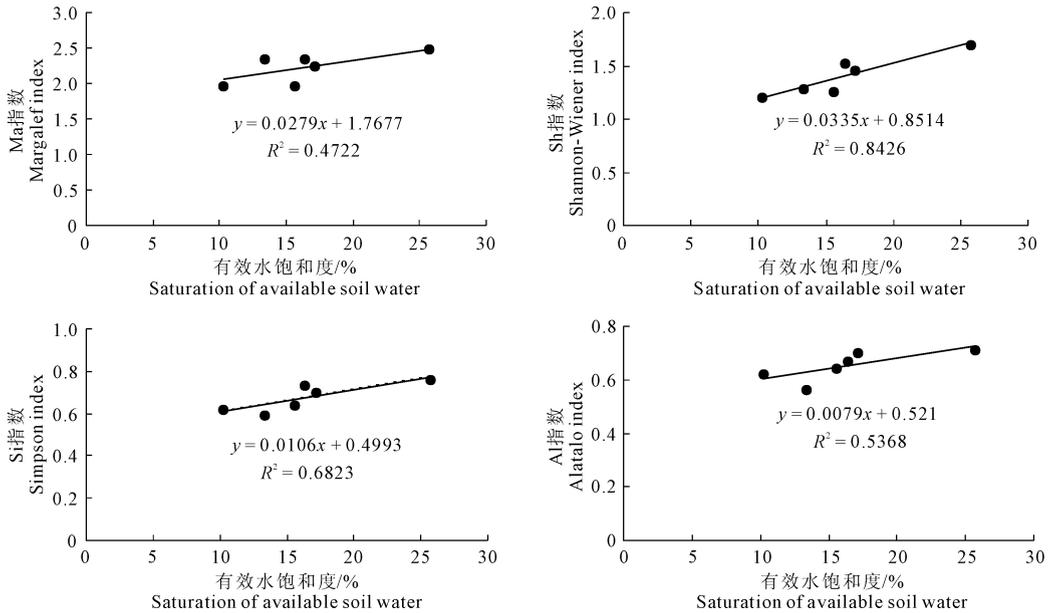


图2 不同群落特征指数与土壤有效水饱和度的关系

Fig.2 The relationship of plant community characteristics indexes and saturation available soil water of different micro-topography

### 3 讨论

在黄土坡面,由于不同侵蚀作用的长期存在,形成了大小不等、形状各异的局部地形,对土壤水分等生境条件进行了重新分配<sup>[28]</sup>,使其在 1 m<sup>2</sup> 以上范围内产生变化,根据不同微地形的土壤水分等特点遵循“适地适树”的植被恢复原则在研究区显得尤为重要。在微地形形成的过程中,坡面土壤质地发生相应的改变,塌陷的土质可能相对疏松,孔隙度相对较大,所以其土壤容重表现相对较小。在同一坡面的微地形坡度差异较为明显,坡度可影响承雨面积以及径流等,从而影响坡面水分的入渗,坡度还可以影响太阳光照的角度,影响坡面接受辐射量的多少,进而影响坡面水分的蒸发。由于坡度较缓等原因,塌陷在经过太阳辐射后对水分的保持能力可能相对较低,所以其有效水的饱和度也相对最低;而陡坎坡度相对较大,可能也是与坡度有一定关系。

土壤水分的有效性体现了植物对土壤水分的可利用程度<sup>[29]</sup>,相比于实测土壤水与植物生长、植被重建的关系更为密切。此前学者对土壤有效水含量的研究往往直接采用土壤含水量与凋萎系数的差值<sup>[7-12]</sup>,由于不同区域土壤物理性质的差异,不同区域的研究结果往往不具有通用性,而本文采用的土壤有效水饱和度是一个没有单位的标量,是土壤有效水含量与土壤有效水库容的比值。用土壤有效水饱和度作为标准,是对不同土层深度土壤的有效水含量进行了标准化,因此该标准在不同土壤及不同土层深度之间通用,更具有可比性。

本研究并未使用生物量、盖度、植株高度等直观指标,这是因为考虑到在研究区近 30 年封禁的情况下,不同微地形由于微生境的不同,所形成的植物群落灌草种类有可能不同,因此,不同微地形中植被的生物量、盖度、植株高度等指标的差异性会相对明显,不具有说服力。本研究中采用的 Margalef 丰富度指数、Shannon - Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数,是对不同微地形植被群落特征的综合描述,能更加客观地描述不同微地形的植被群落特征与土壤有效水饱和度之间的关系。

### 4 结论

本研究利用 Mann - Kendall 趋势检验和小波分析方法对不同微地形的土壤有效水饱和度进行分析,并对土壤有效水饱和度与植被群落特征指数进行回归分析,得出以下结论:

1) 在 0 ~ 60 cm 土层深度范围内,不同微地形土壤有效水饱和度顺序为:塌陷 < 缓台 < 原状坡 < 切沟 < 浅沟 < 陡坎,其中切沟、塌陷和陡坎的土壤有效水饱和度呈现显著增加趋势;浅沟、缓台和原状坡的土壤有效水饱和度呈现下降趋势,但趋势不显著。

2) 研究期间,不同微地形土壤有效水饱和度的变化周期不同。陡坎、塌陷和缓台的主周期相同,为 22 个月;浅沟、切沟和原状坡的主周期分别为 23、21 和 28 个月。

3) 在不同微地形中, Margalef 丰富度指数、Shannon - Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数均与土壤有效水饱和度呈正相关

关系,其中 Shannon - Wiener 多样性指数和土壤有效水饱和度的相关性最高。

### 参考文献:

- [1] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain[J]. Soil Science Society of America, 2003, 67: 1647-1656.
- [2] 张洛丹.不同植被类型对陡坡地土壤水分循环的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [3] Moreno-De Las Heras M, Espigares T, Merino-Martín L, et al. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes[J]. Catena, 2011, 84(3): 114-124.
- [4] 朱清科,张岩,赵磊磊,等.陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M].北京:科学出版社,2012:31-33.
- [5] Verdaguer D, Vilagran J, Lloansi S, et al. Morphological and physiological acclimation of *Quercus coccifera* L. seedlings to water availability and growing medium[J]. New Forests, 2011, 42(3): 363-381.
- [6] Tramontini S, Leeuwen C V, Domec J C, et al. Impact of soil texture and water availability on the hydraulic control of plant and grape-berry development[J]. Plant & Soil, 2013, 368(1): 215-230.
- [7] 张治伟,朱章雄,文志林.岩溶山地不同用地类型表层土壤持水性能研究[J].灌溉排水学报,2015, 34(4): 95-99.
- [8] 高晓东,吴普特,张宝庆,等.黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征[J].土壤学报,2015, 52(1): 57-67.
- [9] 吕文强,王立,党宏忠,等.黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J].水土保持学报,2015, 29(6): 233-240.
- [10] 蔡燕,王会肖.太行山山前平原土壤有效水动态分析[J].中国农业气象,2009, 30(3): 313-317, 322.
- [11] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌交界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012, 32(2): 538-547.
- [12] 代海燕,张秋良,魏强,等.大青山不同植被土壤物理特征及有效水的研究[J].干旱区资源与环境,2008, 22(12): 149-153.
- [13] 邝高明,朱清科,赵磊磊,等.黄土丘陵沟壑区陡坡微地形分布研究[J].干旱区研究,2012, 29(6): 1083-1088.
- [14] 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.
- [15] 王晶,朱清科,赵荟,等.陕北黄土区阳坡微地形土壤水分特征研究[J].水土保持通报,2011, 31(4): 16-21.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 卜耀军,朱清科,包耀贤,等.陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J].水土保持学报,2014, 28(3): 153-157.
- [19] 王晶,朱清科,秦伟,等.陕北黄土区封禁流域坡面微地形植被特征分异[J].应用生态学报,2012, 23(3): 694-700.
- [20] 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.
- [21] 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008, 45(3): 550-554.
- [22] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.
- [23] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin and Co., Ltd., 1975.
- [24] Sen A K, Ogrin D. Analysis of monthly, winter, and annual temperatures in Zagreb, Croatia, from 1864 to 2010: the 7.7 - year cycle and the North Atlantic Oscillation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123: 733-739.
- [25] Cochran F, Brunsell N, Cabalzar A, et al. Indigenous ecological calendars define scales for climate change and sustainability assessments[J]. Sustainability Science, 2016, 11: 69-89.
- [26] Huang H P, Han Y P, Cao M M, et al. Spatial-temporal variation of aridity index of China during 1960—2013[J]. Advances in Meteorology, 2016: 1536135.
- [27] 高晓东,吴普特,赵西宁,等.黄土丘陵区沟道小流域土壤有效储水量估算[J].水利学报,2013, 44(6): 734-742.
- [28] 赵维军,马欢,朱清科,等.陕北黄土区微地形土壤水分对降水特征的响应[J].农业机械学报,2014, 45(5): 118-124.
- [29] 王洪英,杨文文,张学培.晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J].干旱地区农业研究,2005, 23(6): 147-151.

(上接第 60 页)

- [10] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [11] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [12] 赵兰坡,姜岩.土壤磷酸酶活性测定方法探讨[J].土壤通报,1986, 17(3): 138-141.
- [13] 鲍士旦.土壤化学分析[M].第 3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010, 30(4): 1035-1041.
- [15] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等.不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J].中国农业科学,2013, 46(5): 950-960.
- [16] 薛世川,孙志梅,彭正萍,等.腐植酸复合肥的养分释放规律与控释机理研究[J].腐植酸,2001, (3-4): 30-32.
- [17] 彭正萍,门明新,薛世川,等.腐植酸复合肥对土壤养分转化和土壤酶活性的影响[J].河北农业大学学报,2005, 28(4): 1-4.
- [18] 刘兰兰,史春余,梁太波,等.腐植酸肥料对生姜土壤微生物量和酶活性的影响[J].生态学报,2009, 29(11): 6136-6141.
- [19] 李善祥,孙淑和,吴奇虎,等.腐植酸酸性功能团的研究[J].燃料化学学报,1983, 11(3): 32-40.
- [20] 任祖淦,陈玉水,唐福钦,等.有机无机肥料配施对土壤微生物和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,1996, 2(3): 279-283.
- [21] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J].生态环境,2008, 17(5): 2059-2063.
- [22] 社会英,薛世川,孙忠富,等.腐植酸复混肥对葡萄养分吸收利用的影响[J].土壤通报,2006, 37(3): 546-549.
- [23] 武丽萍,成绍鑫,李丽.腐植酸与速效磷肥的作用及 HA - P 的农化效应[J].腐植酸,2002, (1): 32-35.