

人工降雨条件下坡耕地地表糙度的时空变异分布研究

高树静, 赵龙山, 梁心蓝, 张青峰, 吴发启

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:水蚀过程中地表糙度变化研究,特别是微地表条件下水蚀过程中地表糙度的分布及变化特征的研究是土壤侵蚀学科领域的前沿问题,目前仍处于不断的探索与发展阶段。本文试图通过对陕西省杨陵区农耕地土壤进行固定坡度和雨强下不同耕作措施的室内人工降雨试验,建立微地形条件下高精度的 DEM 并进行分析,探讨地表糙度在水蚀过程中的时空变异分布。结果表明:(1)人为耕作对坡面地表糙度的整体分布状态和坡面高程空间分布状况的影响显著;(2)降雨对等高耕作、人工锄耕、人工挖耕耕作措施的高程分布有一定的影响,并且高程变化量的最大值均出现在坡面的下部;(3)在降雨侵蚀的产流前后,坡面糙度的空间变化最大,而产流后糙度的空间变化趋于平稳。研究结果初步揭示了微地表条件下地表糙度的时空变异状况,并可为进一步分析不同坡度、不同雨强条件下地表糙度的综合研究奠定基础。

关键词:地表糙度;地统计;DEM;耕作措施

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)03-0012-05

Surface Roughness Spatiotemporal Distribution of the Slope Land under Simulated Rainfall

GAO Shu-jing, ZHAO Long-shan, LIANG Xin-lan, ZHANG Qing-feng, WU Fa-qi

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The evolution of surface roughness in the process of water erosion, especially under the micro-surface conditions, is becoming the hot-spot in the discipline of soil erosion, while, it is still in the stage of exploratory development. In this paper, it attempts to reveal the spatiotemporal distribution of surface roughness in the process of water erosion based on the indoor artificial rainfall experiment. The results shows that: (1) man-made slope tillage have significant effects on both overall distribution of surface roughness and spatial distribution of surface relative elevation (SRE); (2) Rainfall can influence the distribution of SRE of contour tillage, artificial hoe and artificial dig, moreover, the maximum amount of elevation changes are in the lower slope. (3) During the rainfall erosion process, the spatial variability of surface roughness is greatest, while after the runoff the spatial variation of roughness is stabilized. The study reveals the spatial variation of surface roughness under the micro-surface conditions and may lay the foundation for a comprehensive surface roughness study of different slope, rainfall intensity in different conditions.

Key words: surface roughness; geology statistics; DEM; cultivation

地表糙度是指地表在比降梯度最大方向上凹凸不平的形态或起伏状况^[1]。作为一种高动态变量,它在自然界的表面过程中起着重要的作用,是理解风蚀和水蚀的一个重要因素^[2]。水蚀过程中地表糙

度变化研究是土壤侵蚀学科领域的前沿问题。在土壤侵蚀的研究中,由于地表糙度的复杂性,对其分布特征与模拟仍处于不断探索和发展的阶段,尤其是微地表条件下水蚀过程中地表糙度的分布及变化特

* 收稿日期:2009-11-23

基金项目:国家自然科学基金(46871133);国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407201)

作者简介:高树静(1985-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:GIS设计与数字制图。E-mail:shujing.gao@163.com

通信作者:吴发启(1957-),男,陕西黄陵人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。E-mail:wufuqi@263.net

征,缺乏系统的研究,影响了人们对水蚀机理的进一步理解和对微地表糙度的研究^[3],目前仍处于不断的探索与发展阶段。高精度DEM,作为微地形分析中重要的空间数据,所提取的地形信息更加精准,能细致地反映微地形的起伏变化与破碎状况^[4]。为此,本文选择陕西省杨凌区农耕地土壤为对象,通过进行同一坡度、固定雨强下3种不同耕作措施的室内人工降雨实验,建立微地形条件下高精度的DEM并进行GIS相关分析,探讨地表糙度在水蚀过程中时空变异分布,以期为推动水蚀过程的研究奠定基础。

1 试验材料与实验设计

1.1 供试土壤

供试土样为陕西省杨凌区农耕地土壤。原状土为壤土,土体较疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙粒为主,容重为 1.25 g/cm^3 。所采土样经过 1.0 cm 筛后,分层装填在 $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的侵蚀槽中,每层装土 130 kg ,使土壤容重控制在 $1.15 \sim 1.16\text{ g/cm}^3$ 。

1.2 试验设计

实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度 16 m ,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的 98% 以上,降雨均匀度大于 80% 。

试验中对供试土壤采用等高耕作(CT,横坡耕作,形成犁沟和土垄,垄距 0.2 m)、人工掏挖(AD,用锄头挖坡面)和人工锄耕(AH,用锄头锄挖坡面),并选取直线坡面(CK)作为对照措施。实验坡度为 5° ,雨强为 90 mm/h 。

试验分为连续降雨和分段降雨两部分,连续降雨历时 90 min ;分段降雨实验分三个阶段:溅蚀阶段、片蚀阶段、细沟侵蚀阶段。坡面开始产流前为溅蚀阶段(SpE);坡面出现鳞片状小坑和微小跌水为片蚀阶段(SuE);坡面鳞片状或微小跌水贯通形成细沟为细沟侵蚀阶段(CE)。

2 数据获取与分析方法

2.1 高程数据的获取

每场降雨前后分别用自制激光扫描仪扫描土壤坡面,从而得到相应坡面的高程数据。

大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的自制激光扫描仪由X-Y工作台、激光测距仪(精度 0.3 mm)和数据采

集及控制系统三部分组成。X方向和Y方向各布设一根工业丝杆,通过电机提供动力,丝杆转动一圈激光测距仪前进 15 mm ,具体装置见图1。以 $0.02\text{ m} \times 0.02\text{ m}$ 的分辨率来采集坡面高程数据,为了消除边际效应,扫描面积定义为 $0.8\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 和 $0.8\text{ m} \times 0.82\text{ m}$ 。扫描一个坡面可得到 $3\ 480$ 个高程点的高程值。

2.2 标准偏差分析——统计特征分析

利用经典分析方法对坡面高程的标准偏差 S_d 和变差系数 C_v 进行分析,其中 S_d 用来评价耕作措施、侵蚀阶段对地表糙度变化的影响程度; C_v 反映了地表糙度分布的空间变异强度,当 $C_v < 0.1$ 时,弱变异性; $0.1 < C_v < 1$ 时,中等变异性; $C_v > 1$ 时,强变异性^[5]。



图1 自制激光扫描仪及侵蚀槽

2.3 半方差函数与理论模型

由于坡面相对高程既具有随机性,又在一定的空间范围内存在着相关性。因此,利用地质统计学方法来分析地表糙度相对高程的空间变异的结构特征,通过经验半方差函数 $\gamma(h)$ 来描述相关的空间结构关系:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: x_i ——已知坡面高程测点的空间坐标位置; $Z(x_i)$ ——已知坡面高程测点处的相对高程值; h ——任意两个已知坡面高程测点间的距离; N ——已知坡面高程测点; $N(h)$ ——间距为 h 的坡面高程数据样本对数。式(1)中,随着自变量 h 的逐渐增加, $\gamma(h)$ 不断增大,当 $h \rightarrow R$ 时,任意两坡面高程测点的相对高程值之间具有相关性,而当 $h > R$ 后,则

不再存在相关性, R 称为坡面相对高程的空间分布相关距离。

半方差函数一般用变异曲线来表示,它是半方差函数 $r(h)$ 值对距离 h 的函数图。式(2)是一个典型的球面模型半方差函数^[6]。

$$r(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left[\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \times \frac{h^3}{a^3} \right] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_0 ——基底方差(cm^2),它表示由随机变量带来的空间变异,一般是指观测变量的测量误差; a ——变程(m),它表示采样数据间存在相关性的距离上限。当 $h \leq a$ 时,任意两点之间的观测值有相关性,这个相关性随 h 的变大而减少,当 $h > a$ 时就不再具有相关性。 $C_0 + C$ 为总基台值(cm^2),它是反映某观测变量在研究范围内总的空间变异强度。函数的这些特征值反映了观测变量的变异特征。球面模型半方差函数示意图见图 2。

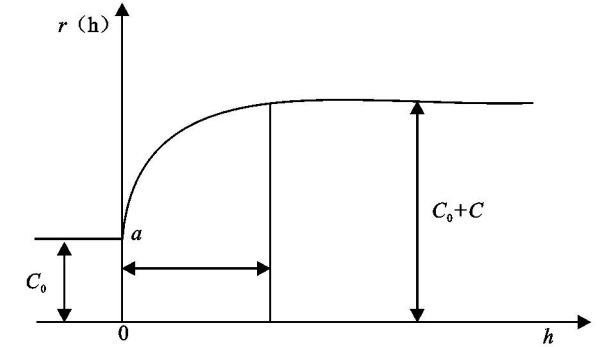


图 2 球面模型半方差函数曲线示意图

2.4 Kriging 方法

克里格插值(Kriging)方法是地统计中最常用的插值方法,它是利用原始数据和半方差函数的结构性,对坡面内未知高程点的相对高程进行最优无偏估值,得到相关的坡面糙度空间变异分布状况^[7]。

3 结果与分析

3.1 地表糙度高程值的统计特征分析

从表 1 显示的结果来看,直线坡的 $S_{\bar{a}}$ 值较小,分布平缓,整个坡面具有较佳的平整状态。CT、AH、AD 三种耕作措施的 $S_{\bar{a}}$ 在雨前相对于直线坡均有不同程度的增加,说明地表糙度的分布受耕作措施的影响明显。雨后直线坡的 $S_{\bar{a}}$ 值变化很小,说明其坡面在整个降雨过程中的变化不大;CT 的 $S_{\bar{a}}$ 值在 SpE 后减少较大,说明产流的发生对 CT 坡面糙度的影响较大;AH、AD 两种耕作措施的 $S_{\bar{a}}$ 值整体呈减少趋势,说明坡面糙度的分布在整个降雨过

程中处于一直变化的状态。

溅蚀阶段相对于片蚀阶段和细沟侵蚀阶段来说,对地表糙度时空变异分布的影响较大,这是由于在溅蚀阶段发生产流,致使整个坡面在新的环境中为寻求新的平衡,而使高程值的变化相对较大。在细沟侵蚀阶段,虽然坡面流会带来较为明显的表土冲刷作用,有可能引起局部坡面糙度分布状况较大的变异,但是其产生的细沟相对于整个坡面来说是比较小的,对整个坡面 $S_{\bar{a}}$ 值的影响较小,因此尽管在 CE 时会产生细沟,但其 $S_{\bar{a}}$ 值仍是在 SpE 后趋于稳定。另一方面,不同耕作措施的坡面高程的变差系数 C_v 均小于 0.1,因此坡面糙度分布的空间变异属弱变异程度。

表 1 坡面高程的统计特征值

统计参数	耕作措施	雨前	SpE	SuE	CE
\bar{x}/m	CK	0.229	0.232	0.229	0.231
	CT	0.220	0.221	0.220	0.215
	AH	0.228	0.228	0.230	0.230
	AD	0.251	0.235	0.240	0.239
$S_{\bar{a}}/\text{m}$	CK	0.005	0.005	0.005	0.005
	CT	0.018	0.014	0.014	0.014
	AH	0.008	0.007	0.007	0.009
	AD	0.009	0.010	0.008	0.008
C_v	CK	0.02183	0.02155	0.02183	0.02165
	CT	0.08182	0.06335	0.06364	0.06512
	AH	0.03509	0.03070	0.03044	0.03913
	AD	0.03586	0.04256	0.03333	0.03347

3.2 坡面高程的空间相关结构分析

利用式(2)的球状理论模型拟合式(1)得到的坡面高程半方差函数中的相关参数,见表 2。用球形模型进行拟合后的曲线半方差图,如图 3 所示。

利用空间变异特征参数 $[C_0/(C_0 + C)]$ 可对坡面高程的空间相关性进行程度分类:该值小于 0.25 时,表明较强的空间相关性;在 0.25 ~ 0.75 之间,属中等空间相关性;大于 0.75 则意味着较弱的空间相关性^[8]。

从表 2 和图 3 可以看出,5 的初始坡度下,直线坡、CT 两种措施在雨前相关性很强,CE 后相关性变弱;而 AH 正好相反,雨前相关性很弱,CE 后相关性增强;AD 在雨前相关性很强,SpE 后相关性变弱,SuE 后相关性又增强,CE 后相关性再次变弱。由此可看来,地表糙度空间相关性的变化具有一定的随机性。

表 2 供试坡面高程半方差函数中的参数

参数	高程观测次数	CK	CT	AH	AD
C_0/cm^2	雨前	0.000008	0.000001	0.000040	0.000004
	SpE	0.000013	0.000001	0.000040	0.000056
	SuE	0.000007	0.000110	0.000030	0.000031
	CE	0.000007	0.000090	0.000010	0.000035
$C_0 + C/\text{cm}^2$	雨前	0.000039	0.000360	0.000140	0.000079
	SpE	0.000065	0.000180	0.000090	0.000212
	SuE	0.00003	0.000370	0.00012	0.000167
	CE	0.000025	0.000230	0.00025	0.000124
$C_0/(C_0 + C)$	雨前	0.205	0.003	0.286	0.051
	SpE	0.200	0.006	0.444	0.264
	SuE	0.233	0.297	0.250	0.186
	CE	0.280	0.391	0.040	0.282
a	雨前	1.79	0.11	4.01	0.11
	SpE	4.01	0.10	3.46	4.01
	SuE	0.82	2.72	4.00	4.01
	CE	0.84	1.17	3.34	4.01

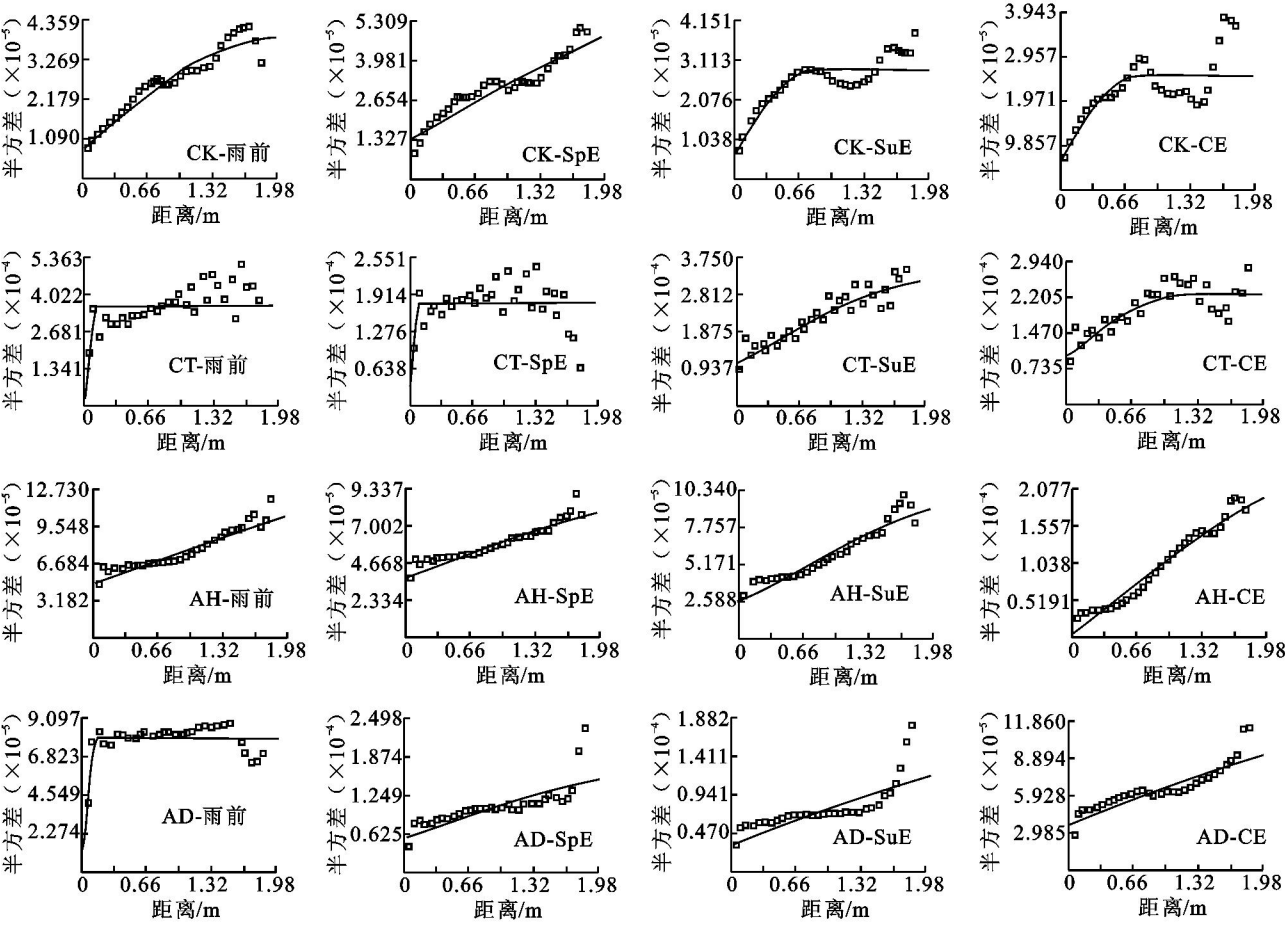


图 3 球形模型拟合后的曲线半方差图

3.3 坡面糙度的时空变异分布趋势

利用 Kriging 内插估值方法绘制供试坡面雨前

的地表糙度的时空变异分布趋势和雨后相对于雨前的

的变化坡面 ,如图 4 所示。

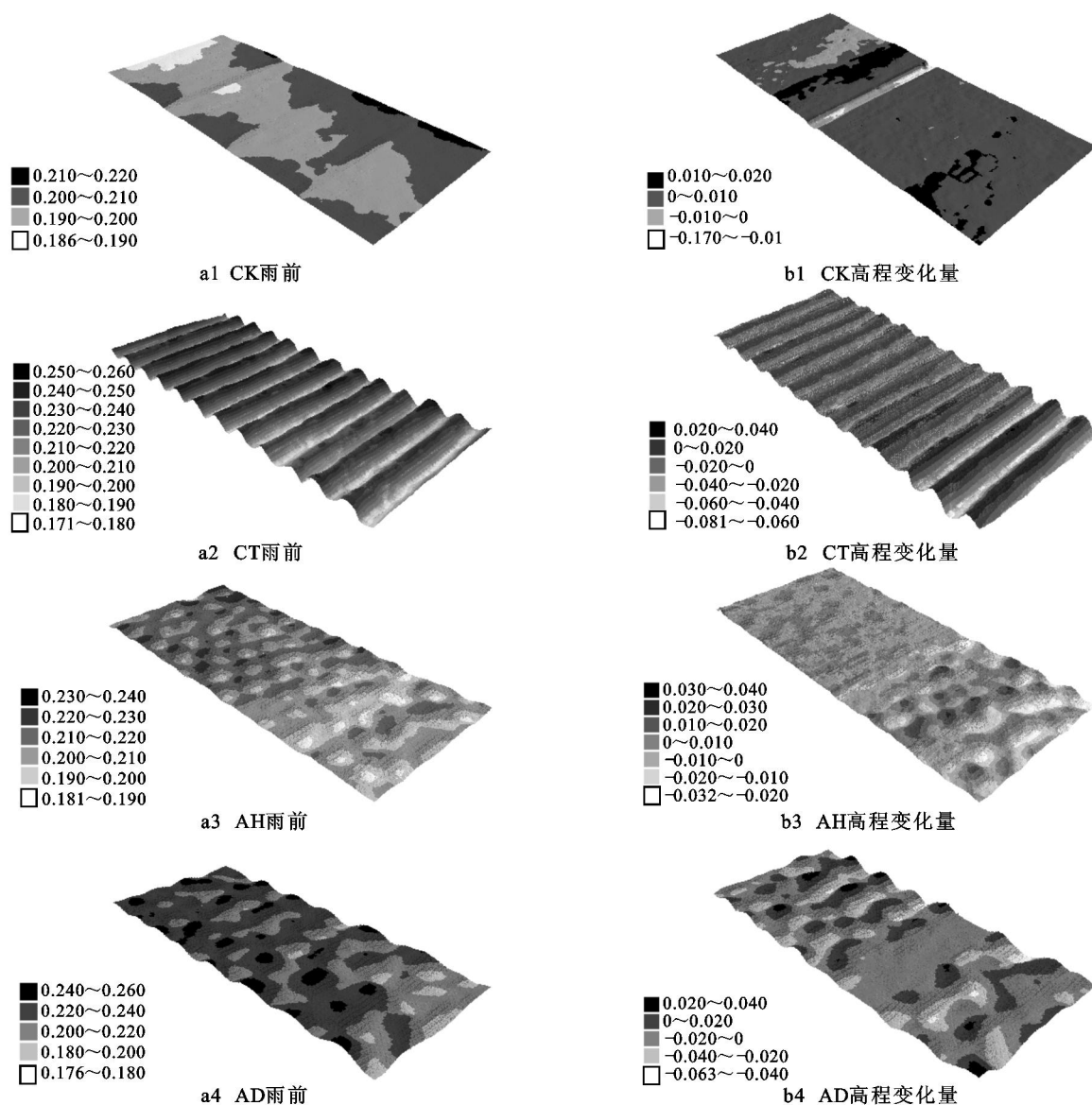


图 4 地表糙度时空变异分布趋势

通过连续降雨,更能反映出降雨对地表糙度时空分布的影响。从图中可以看出,直线坡雨后高程的变化幅度很小,仅为 $-0.02 \sim 0.02$ m,变化区间主要集中于 $0 \sim 0.1$ m;CT 的高程变化幅度很大,为 $-0.081 \sim 0.022$ m,变化区间主要集中在 $-0.04 \sim 0$ m;AH 高程的变化幅度介于 $-0.032 \sim 0.031$ m,坡面上半部的变化区间集中在 $-0.01 \sim 0.01$ m,而下半部变化较复杂;AD 雨后高程变化的幅度在 $-0.63 \sim 0.04$ m,变化区间主要在 $-0.02 \sim 0$ m。CT、AH、AD 三种耕作措施的高程增加或减小的最大值均出现在坡面的下部并且其高程的变化都是高地被冲刷,低洼处被填充。

4 结论

地统计学方法是研究某一数量空间变异的最适宜的数学方法,利用克立格最优内插法绘制坡面图,

可更加准确和直观地了解整个地表的空间分布状况。本文通过对陕西省杨凌区农耕地土壤 3 种耕作措施、固定坡度和雨强下地表糙度的时空变异研究表明:(1)影响地表糙度时空变异分布状况的主要因素是人为因素,人为耕作对地表糙度分布的影响最为显著,这不仅反映在坡面糙度的整体分布上,还同时影响了坡面高程的空间分布状况;(2)降雨对 CT、AH、AD 三种耕作措施的高程分布有一定的影响,并且高程变化量的最大值均出现在坡面的下部;(3)在整个水蚀过程中,产流前后地表糙度时空分布的变化较为显著。这为进一步分析不同坡度、不同雨强条件下地表糙度的综合研究奠定了基础。

另外,在本研究中,对溅蚀阶段、片蚀阶段、细沟侵蚀阶段的判断主要是依据个人的主观因素,在以后的研究中应寻求一种客观的方法来划分各侵蚀阶段。

(下转第 249 页)

蔷薇,草本层的优势种主要有白茅、毛蕨、雀稗、荇草。灌木层、草本层植物 N、S、Margalef、Simpson、Shannon-Wiener、Pielou 六个多样性指数总体水平不高。

(2)通过对黔中石灰岩地区灌木林土壤酶活性与植物物种多样性进行相关性研究,结果表明:土壤酶活性和植物物种多样性存在不同的相关性,且因为土壤酶的种类不同,与灌木林植物的相关性也不同。根际土壤酶活性与灌木层植物物种多样性指数相关系数明显大于非根际土壤酶活性与灌木层植物物种多样性指数相关系数,淀粉酶、多酚氧化酶、碱性磷酸酶活性与灌木层植物物种多样性存在不同程度的相关性,有的达到了显著或是极显著水平。过氧化氢酶活性与灌木层植物物种多样性相关性不明显。淀粉酶、多酚氧化酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶与灌木林草本层植物物种多样性之间的相关性都未达到显著或是极显著水平。土壤酶活性的高低不仅与植被演替的方向有关,还与土壤-植物系统的群落物种组成及其多样性有关,这与杨万勤研究结果基本一致^[16-17]。植物群落结构不同,土壤生态环境因子也有所不同,土壤环境因子发生变化,植物群落在结构和数量上都发生变化。

参考文献:

[1] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[2] 陈灵芝.生物多样性保护现状及其对策[M].北京:中国科学技术出版社,1995.

[3] Hurlbert S H. The non-concept of species diversity: a critique and alternative parameters[J]. Ecology,1971, 52:577-586.

[4] 周国英,陈小艳,李倩茹.油茶林土壤微生物生态分布及

土壤酶活性的研究[J].经济林研究,2001,9(1):9-12.

[5] 李跃林,彭少麟.桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系[J].应用生态学报,2003,14(3):345-348.

[6] 何跃军,钟章成,刘济明,等.石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J].应用生态学报,2005,16(6):1077-1081.

[7] 薛冬,姚槐应,何振立,等.红壤酶活性与肥力的关系[J].应用生态学报,2005,16(8):1455-1458.

[8] 薛立,邱立刚,陈红跃,等.不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J].应用生态学报,2003,40(2):280-285.

[9] 蔡晓明.生态系统生态学[M].北京:科学出版社,2000.

[10] 杨玉盛,何宗明,邹双全,等.格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特征的研究[J].浙江林学院学报,1998,18(2):198-202.

[11] 张其水,俞新妥.杉木连栽林地混交林土壤酶的分布特性的研究[J].福建林学院学报,1989,9(3):256-262.

[12] 严健汉,詹重慈.环境土壤学[M].武汉:华中师范大学出版社,1985:154-155.

[13] 贾继文,聂俊华,李絮花,等.蔬菜大棚土壤理化性质与土壤酶活性关系的研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2001,32(4):427-432.

[14] 于群英.土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J].安徽技术师范学院学报,2001,15(4):5-8.

[15] 白翠霞,耿玉清,余新晓,等.八达岭山地次生林土壤养分与磷酸酶活性研究[J].中国水土保持科学,2006,4(4):52-55.

[16] 杨万勤,钟章成,韩玉萍.缙云山森林土壤酶活性的分布特征季节动态及与四川大头茶的关系研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,1999,24(3):318-324.

[17] 杨万勤,钟章成,陶建平,等.缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J].林学科学,2001,37(4):124-128.

(上接第 16 页)

参考文献:

[1] 吴发启,赵晓光,刘秉正,等.地表糙度的测量方法及对坡面径流和侵蚀的影响[J].西北林学院学报,1998,13(2):15-19.

[2] Werner J, Andreas K. Soil surface roughness measurement: methods, applicabilit, and surface representation[J]. Catena,2005,64:174-192.

[3] 郑子成,何淑勤,吴发启.坡面水蚀过程中地表糙度的研究进展[J].节水灌溉,2008(8):8-11.

[4] 王鸿斌,刘斌,田杏芳,等.黄土高原沟壑区典型小流域

高精度 DEM 制作及其应用研究[J]. 2004,6(3):34-36.

[5] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York: Academic Press, 1980.

[6] 侯景儒,郭光裕.矿床统计预测及地质统计学的理论与应用[M].北京:冶金工业出版社,1993.

[7] 白美健,许迪,李益农,等.畦面微地形时空变异分布状况试验研究[J].农业工程学报,2006(4):23-27.

[8] Miller M P, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1988,52:1133-1141.