

# 室内外陡坡降雨侵蚀产沙过程相似性模拟分析

管新建<sup>1</sup>, 李勉<sup>2</sup>, 胡彩虹<sup>1</sup>, 申震洲<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450002; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为了探讨降雨条件下室内外不同土地侵蚀产沙的特性, 在 25° 陡坡、人工降雨条件下, 对邙山黄土和原状土侵蚀产沙过程的相似特性进行了室内外模拟试验, 利用模糊贴近度计算方法对室内外侵蚀产沙过程进行分析研究。结果表明, 在一定的雨强条件下, 降雨初期小区径流量、含沙量、剪切力和产沙量相对都较小, 随着降雨时间的延长均逐渐增大; 当降雨进行到一定时间段时, 各指标均会出现激增点, 此后急剧增加, 最终达到相对稳定状态; 在 25° 情况下, 室内 2 种容重土样的径流剪切力、径流量、含沙量以及产沙量的变化过程与野外原状土的贴近程度都比较高, 且同种雨强情况下容重较大的土样贴近度基本上都大于容重较小的土样, 这说明要想达到与野外更好的相似, 容重 1.2 g/cm<sup>3</sup> 的邙山黄土比 1.0 g/cm<sup>3</sup> 的模拟情况更好。

**关键词:** 陡坡; 不同容重土质; 相似性; 模糊贴近度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2011)05-0191-05

中图分类号: S175.1

## Similarity Between Erosion and Sediment Yield Processes on Steep Slopes with Simulated Rainfalls Under Indoor and Outdoor Conditions

GUAN Xin-jian<sup>1</sup>, LI Mian<sup>2</sup>, HU Cai-hong<sup>1</sup>, SHEN Zhen-zhou<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Water Conservancy of Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450002, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of different soil erosion and sediment yield indoor and outdoor under rainfall condition, the erosion processes of Mangshan mountain loess were tested under laboratory and undisturbed conditions on 25° steep slopes under artificial simulated rainfalls. The similarity characteristics of the indoor and outdoor process of erosion and sediment yield were analyzed by the fuzzy closeness degree calculation method. The results show that with the rains of same intensity, runoff amount, sediment concentration, shear stress, and sediment yield of different soil bulk densities were fairly low at the initial stage and increased gradually over time; when the rain intensity reached the hyperplastic spot, these indicators increased sharply to the steady state within a few minutes. On 25° steep slopes, the nearness degree of the shear strength, runoff rate, sediment concentration and sediment yield of both indoor and outdoor simulation were very similar for the two kinds of soil bulk densities. The nearness degree of the high bulk density (1.2 g/cm<sup>3</sup>) soil was greater than the low bulk density (1.0 g/cm<sup>3</sup>) soil. This implies that in order to achieve a laboratory condition similar to the field condition, the soil with higher bulk density should be applied in the simulations.

**Keywords:** steep slope; different soil bulk density; similarity; fuzzy nearness degree

自从 1877 年德国土壤学家 Wollny 开始研究土壤侵蚀的一个多世纪以来, 各国学者在土壤侵蚀规律研究方面作了大量工作<sup>[1-7]</sup>。早期的研究多侧重于野外径流小区的试验观测, 开展了相同下垫面条件下不同降雨的侵蚀产沙特征, 或相同降雨条件下不同下垫

面的侵蚀产沙特征的研究。近几年水利部以及国家重点科技攻关项目均安排了对土壤侵蚀规律及其模拟进行研究<sup>[8-10]</sup>。室内模拟试验方面, 目前在大暴雨模拟技术、原状土与扰动土的相似性、模型选用比尺及边界条件相似性、薄层水流流速流量及含沙量测定

收稿日期: 2010-12-10

修回日期: 2011-03-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“流域水文过程对极端气候事件敏感性研究”(51079131)

作者简介: 管新建(1973—), 男(汉族), 河南省驻马店市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与水资源的教学及研究工作。E-mail: gxj1016@zzu.edu.cn。

和室内模拟水保措施技术等方面虽开展了一些研究,但还缺乏对黄土高原室内实体比尺模型的模拟理论和技术的系统研究<sup>[11-12]</sup>,因此,模拟理论、技术和方法是制约黄土高原土壤侵蚀建模的关键。为此,有心要开展单一坡面人工模拟降雨条件下野外原型与室内模型间侵蚀产沙特征的对比研究,以探索室内模型建造应选用的合理几何比尺及室内外侵蚀过程的相似性和差异性,找出室内试验结果与野外原型试验结果的相关关系,探讨有关相似律及侵蚀模拟的关键技术,从而为下一步坡沟系统室内模拟的开展奠定基础。

## 1 侵蚀过程模拟

### 1.1 实验设计及方法

选择在黄土高原长武县王东沟流域的坡面设置野外试验小区,小区面积为 3 m×10 m。在郑州北郊模型黄河试验基地根据黄土高原坡面坡度特征按 2:1 的几何比尺构建室内坡面模型,径流小区面积为 1.5 m×5 m。两种小区的下垫面均为裸坡,坡度 25°,降雨强度 0.6 mm/min,降雨历时 30 min。野外原状土的容重在 1.1 g/cm<sup>3</sup> 左右。根据试验要求及试验条件,邙山黄土采用和野外比较相近的 2 种容重,分别为 1.0 和 1.2 g/cm<sup>3</sup>。

野外试验开始前,先把径流小区上的杂草清除,使径流小区形成裸露的土坡。然后在坡面上、中、下部等距离各选 2 个点取样,用烘干法和环刀法分别测定 0—10,10—20,20—30 cm 的土壤前期含水量及土壤容重。限于试验条件,雨强很难调到与设计雨强完全相同,试验时实际采用比较接近的雨强 0.6 mm/

min。产流后每 2 min 收集 1 次浑水样,采用置换法求其含沙量。坡面流速采用染色剂法(KMNO<sub>4</sub>),沿坡面径流流线方向设 5 个断面观测,每个试验重复 1 次,取 2 次试验数据的平均值进行分析。

进行室内试验时,先把从野外取来的土壤过 1 cm 的土筛筛分,除去石块和杂草,取样后堆放备用。土槽填土之前,在冲刷槽下部铺填天然沙,以保持试验土的透水状况接近天然坡面,再在其上部填 40—50 cm 厚的黄土,试验黄土为郑州邙山附近农地表层黄土。填料结束后,将坡面整平以保证每次试验其边界条件基本一致,并用烘干法和环刀法分别测定土壤含水量及容重,使干容重控制在所要求的容重。试验开始前先在坡面洒水使坡面饱和,产流后每 2 min 收集一次浑水样,采用置换法求其含沙量。坡面流速采用染色剂法(KMNO<sub>4</sub>),沿坡面径流流线方向设 5 个断面观测流宽、流速和流深等,室内试验也是重复 1 次,取 2 次试验数据的平均值进行分析。

室内试验所用邙山黄土的各级粒径组成见表 1。限于当时的条件,室外试验没有做颗分试验,所以没有给出各级粒径组成。为了使试验能体现所有影响裸地坡面侵蚀产沙的主要因素,保证试验的可重复性,在本试验中尽力做到:(1) 保持降雨的均匀与稳定。雨强均匀度达到 80% 以上,潜水泵由稳压电源供电;(2) 保证供试土样的一致。试验土样取自同一取土点—郑州邙山附近表层黄土,其颗粒级配、化学特性基本一致;(3) 严格制作下垫面模型。确保每次降雨试验模型的坡度、平整度、密实度都尽可能保持一致;(4) 确保含水量达到饱和又不至于起流。

表 1 黄土的各级粒径组成分析

材料	粒径范围/mm						
	>1.0	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001
邙山黄土	0	1.05%	35.45%	43.40%	3.20%	6.40%	10.50%

### 1.2 试验结果及分析

通过试验观测及计算结果,绘制了原状土和扰动土的含沙量、径流量、剪切力和产沙量随时间的变化图(图 1—4)。

由图 1—4 中可以看出,在雨强一定时,原状土、邙山黄土的坡面径流量、含沙量、剪切力以及产沙量随降雨时间一般先缓慢增加,然后出现激增点,激增点出现一段时间后逐渐达到相对稳定状态。这说明扰动土和原状土侵蚀指标的变化趋势基本一致,有一定的相似性,但是,仅从变化过程图很难看出哪种容重的土质能更好地模拟野外原状土的侵蚀变化过程,

因此,本文引入模糊数学中描述相似问题的模糊贴近度理论,探讨坡面侵蚀产沙的模糊相似程度,选出能较好地模拟野外试验的室内降雨侵蚀产沙试验,以便为坡面侵蚀产沙试验模型沙的选取提供参考。

## 2 模糊贴近度的基本原理

模糊数学是由美国控制论专家扎德(Zaden)于 1965 年创立的,贴近度理论是在模糊数学理论上由汪培庄教授提出来的,已在自然科学许多领域得到应用<sup>[13]</sup>,解决了不少实际工程问题<sup>[14]</sup>。在模糊数学中刻画相似问题<sup>[15]</sup>通常利用模糊贴近度的方法,

贴近度是刻画模糊集合接近程度的一种度量。已知论域  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 其上定义  $m+1$  个模糊集合  $A_1, A_2, \dots, A_m, B$ , 其中模糊集合  $A_1, A_2, \dots, A_m$  构成标准模型库,  $B$  为待识别集合。确定模糊集合  $B$  与标准模型库  $A_1, A_2, \dots, A_m$  中哪一个最接近的问题通常是利用下述公式进行计算, 这里首先给出定义模糊贴近度的原则。

对于定义在论域  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  上的任意模糊集合  $A, B$ , 如果存在实数  $\sigma(A, B)$  满足

$$\begin{cases} 0 \leq \sigma(A, B) \leq 1 \\ \sigma(U, \varphi) = 0 \\ \sigma(A, A) = 1 \\ \sigma(A, B) = \sigma(B, A) \end{cases}$$

则称  $\sigma(A, B)$  为模糊集合  $A, B$  的贴近度。

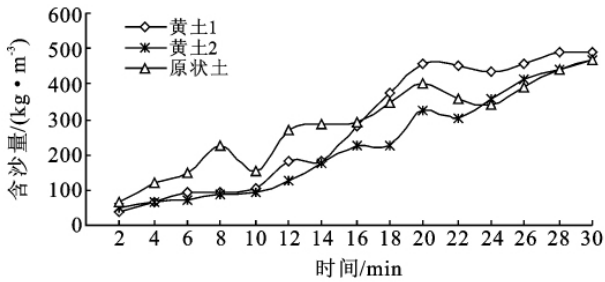


图 1 室内外含沙量随时间的变化

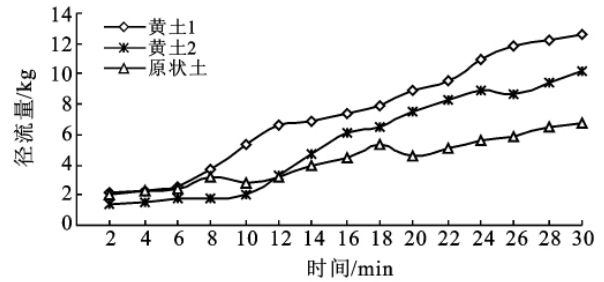


图 2 室内外径流量随时间的变化

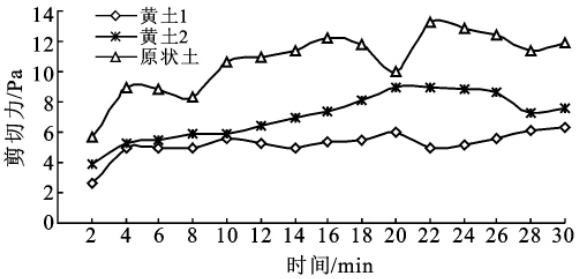


图 3 室内外剪切力随时间的变化

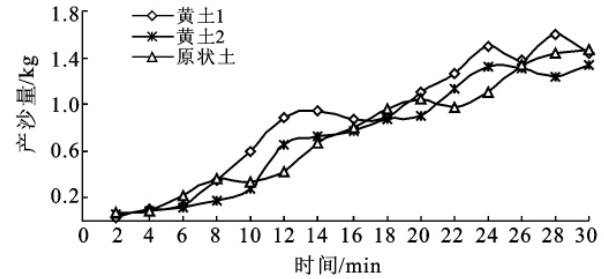


图 4 室内外产沙量随时间的变化

(1) Hamming 贴近度  $\sigma_H$

$$\sigma_H(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |c_{ij} - d_{ik}| \quad (1)$$

$(j=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$

(2) Euclid 贴近度  $\sigma_H$

$$\sigma_H(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \left[ \sum_{i=1}^m (c_{ij} - d_{ik})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$(j=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$

(3) 最大最小贴近度  $\sigma_1$

$$\sigma_1(C_j, D_k) = \frac{\sum_{i=1}^m (c_{ij} - d_{ik})}{\sum_{i=1}^m (c_{ij} + d_{ik})} \quad (3)$$

$(j=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$

(4) 算术平均最小贴近度  $\sigma_2$

$$\sigma_2(C_j, D_k) = \frac{2 \sum_{i=1}^m (c_{ij} - d_{ik})}{\sum_{i=1}^m (c_{ij} + d_{ik})} \quad (4)$$

$(j=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$

式中:  $\sigma(C_j, D_k)$ ——代表 2 个模糊集合的贴近度;  $c_{ij}$ ——模糊集合  $c$  的子集;  $d_{ik}$ ——模糊集合  $d$  的子集;  $m$ ——模糊集合  $c$  和  $d$  子集的个数。

由于各个指标都有自己的量纲, 并且指标间数量差异较大, 使得不同指标间在量上不能直接进行比较, 因此需要对原始指标值进行规范化处理。每组数据处理采用下面的式 (5) 进行处理, 这样就得到相应的新的数列, 然后利用以上 4 个贴近度公式分别进行计算, 最后做出分析处理。

对于有  $A, B, C, D$  等数列集合, 若以  $A_j, B_j, C_j$  和  $D_j$  等为论域  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}$  的模糊子集, 其中  $A_j = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ ,  $B_j = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ ,  $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ ,  $D_j = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ , 如果计算出来的贴近度为:  $\sigma(A, C) = \max\{\sigma(A, B), \sigma(A, C), \sigma(A, D)\}$ , 则根据贴近度的择近原则, 认为  $C$  与  $A$  最贴近。

在进行模糊贴近度计算时, 也必须对原始数据进行规范化处理, 本文给出了区间值化的处理公式:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 0 & (X_{ij} = \min X_{ij}) \\ \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} & (\min X_{ij} < X_{ij} < \max X_{ij}) \\ 1 & (X_{ij} = \max X_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3 不同容重土样与原状土试验的模糊贴近度分析

水流剪切力可作为土壤侵蚀和泥沙搬运的驱动力,对水流剪切力的研究是定量分析土壤剥蚀和径流挟沙能力的基础。在坡面侵蚀过程中,影响因素主要是下垫面条件、水流动力因素和泥沙特征等。所以,根据模糊贴近度理论,计算室内试验和野外试验的含沙量、径流量、剪切力以及产沙量的模糊贴近度的数值,就能根据其大小变化来判断哪种土质模拟野外的效果更好,进而选出效果比较好的模型土样对野

外侵蚀过程进行模拟。

根据前述模拟试验测得的室内外侵蚀过程的基础数据进行模糊贴近度计算分析,计算采用的原始数据见表 2。表 2 中 A 代表黄土 1(容重为  $1.0 \text{ g/cm}^3$  的土样),B 代表黄土 2(容重为  $1.2 \text{ g/cm}^3$  的土样),C 代表原状土。 $A_1$  代表含沙量变化过程, $A_2$  代表径流量变化过程, $A_3$  代表剪切力变化过程, $A_4$  代表产沙量变化过程。 $B_1, C_1$  等以此类推。

对上述原始数据进行规范化处理,根据规范化处理数据,按照式(1),(2),(3)和(4)贴近度计算公式分别计算各种情况下的贴近度,计算结果见表 3。

表 2 侵蚀过程的原始数据

编号	含沙量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )			径流量/kg			剪切力/Pa			产沙量/kg		
	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$A_3$	$B_3$	$C_3$	$A_4$	$B_4$	$C_4$
1	41.1	48.5	66.9	2.16	1.40	2.05	2.6	3.9	5.7	0.02	0.06	0.07
2	65.4	63.7	123.7	2.30	1.52	2.29	4.9	5.3	8.9	0.10	0.08	0.09
3	92.0	69.1	145.9	2.59	1.75	2.45	5.0	5.5	8.8	0.14	0.12	0.22
4	92.8	85.5	226.0	3.66	1.78	3.19	4.9	5.9	8.3	0.35	0.18	0.37
5	102.3	94.6	151.6	5.34	2.05	2.85	5.6	5.9	10.6	0.59	0.28	0.34
6	180.2	124.1	268.1	6.68	3.35	3.24	5.3	6.4	10.9	0.89	0.65	0.42
7	182.5	174.4	287.7	6.86	4.76	3.95	4.9	6.9	11.4	0.95	0.72	0.67
8	281.0	227.7	290.2	7.32	6.12	4.40	5.4	7.4	12.2	0.87	0.77	0.79
9	373.4	228.2	345.1	7.93	6.51	5.39	5.5	8.1	11.8	0.89	0.88	0.95
10	454.6	323.3	402.8	8.93	7.46	4.58	6.0	8.9	10.0	1.10	0.90	1.04
11	450.1	304.1	359.8	9.53	8.28	5.09	4.9	9.0	13.3	1.27	1.13	0.98
12	433.7	357.2	339.3	10.94	8.91	5.60	5.2	8.8	12.8	1.50	1.33	1.11
13	456.4	413.1	393.1	11.84	8.63	5.84	5.6	8.6	12.4	1.37	1.30	1.34
14	487.8	442.2	440.8	12.20	9.41	6.44	6.1	7.3	11.4	1.59	1.24	1.44
15	490.1	466.5	468.6	12.60	10.25	6.73	6.3	7.6	11.9	1.44	1.34	1.46
min	41.1	48.5	66.9	2.16	3.00	2.05	2.6	3.9	5.7	0.02	0.06	0.07
max	490.1	466.5	468.6	12.60	10.25	6.73	6.1	9.0	13.3	1.59	1.34	1.46

表 3 不同土质的室内外侵蚀过程贴近度计算结果

贴近度类型	含沙量室内外贴近度		径流量室内外贴近度		剪切力室内外贴近度		产沙量室内外贴近度	
	$\sigma(A_1, C_1)$	$\sigma(B_1, C_1)$	$\sigma(A_2, C_2)$	$\sigma(B_2, C_2)$	$\sigma(A_3, C_3)$	$\sigma(B_3, C_3)$	$\sigma(A_4, C_4)$	$\sigma(B_4, C_4)$
Hamming 贴近度	0.848	0.912	0.809	0.894	0.804	0.870	0.931	0.953
Euclid 贴近度	0.777	0.888	0.848	0.898	0.809	0.853	0.908	0.941
算术平均贴近度	0.834	0.892	0.892	0.903	0.852	0.892	0.915	0.936
最大最小贴近度	0.715	0.805	0.805	0.823	0.742	0.806	0.844	0.880

从表 2 可以看出, $\sigma(B_1, C_1) > \sigma(A_1, C_1)$ , $\sigma(B_2, C_2) > \sigma(A_2, C_2)$ , $\sigma(B_3, C_3) > \sigma(A_3, C_3)$ , $\sigma(B_4, C_4) > \sigma(A_4, C_4)$ 。这说明坡度为  $25^\circ$  时,在试验条件基本相同的情况下,容重较大的邛山黄土与野外侵蚀过程的相似程度比容重较小的邛山黄土要高,也就是说容重为  $1.2 \text{ g/cm}^3$  的邛山黄土与野外侵蚀过程比较相似,

用容重较大的邛山黄土作为模型土样能更好地模拟野外裸坡的降雨径流侵蚀过程。

### 4 结论

通过分析邛山黄土土样和野外原状土在人工降雨条件下的侵蚀特点,如模糊贴近度的计算分析,得

出以下结论:(1)不同容重的土质在一定雨强条件下表现出一定的规律性。降雨初期,小区径流量、含沙量、剪切力和产沙量相对都较小,随着降雨时间的延长均逐渐增大;当降雨进行到一定时间后,各指标均会出现激增点,此后急剧增加,经过一段时间后,达到相对稳定状态。(2)25°坡度情况下,2种容重土样的径流剪切力、径流量、含沙量以及产沙量与野外的贴近程度都比较高,而且同一雨强情况下容重较大的土样的贴近度基本上都大于容重较小的土质。这说明要想达到与野外更好的相似性,容重 $1.2\text{ g/cm}^3$ 的土质比 $1.0\text{ g/cm}^3$ 的模拟情况更好。(3)在此次模拟试验下,各指标达到了一定的侵蚀相似性。通过本次试验研究,得到了关于侵蚀相似性的一些定性认识,但要给出侵蚀相似性的定量关系,尚需进一步深入研究。(4)采用非线性科学中的模糊贴近度理论方法对室内外降雨侵蚀产沙特性进行研究是一种新的尝试,非线性科学在侵蚀过程方面的应用研究很少,从非线性科学角度研究侵蚀产沙的工作有待进一步加强。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社, 1995:78-99.
- [2] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社, 1997:175-186.
- [3] Poesen J W, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review[J]. *Catena*, 1994, 23:141-166.
- [4] Bunte K, Poesen J W. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of non cohesive sediment by shallow overland flow[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(5):1415-1424.
- [5] Poesen J W, Vandaele K, Wesemael B V. Gully erosion: importance and model implications, modeling soil erosion by water[J]. *NATO ASI Series*, 1998, 155: 285-311.
- [6] Larson W E, Lindstrom M J, Schumacher T E. The role of severe storm in soil erosion: a problem needing consideration[J]. *J. Soil and Water Cons.*, 1997, 52 (2):90-95.
- [7] Olson K R, Laflen J M, Norton L D. Evaluation of methods to study soil erosion-productivity relationships [J]. *J. Soil and Water Cons.*, 1994, 49(6):586-590.
- [8] 刘昌明. 黄河下游断流的径流序列分析[J]. *地理学报*, 2000(3):257-265.
- [9] 程义. 延河洪水输沙特征分析[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(2):35-40.
- [10] 张胜利. 略论黄河中游水沙变化及水土保持减沙效益 [J]. *水土保持通报*, 1994, 14(3):8-10.
- [11] 李敏. 模型黄土高原建设与研究的若干问题探讨[J]. *中国水土保持*, 2005(12):7-9.
- [12] 徐向舟, 张红武. 坡面水土流失比尺模型相似性的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):25-27.
- [13] 管新建, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流水蚀动力参数室内试验及模糊贴近度分析[J]. *农业工程学报*, 2007(6): 1-6.
- [14] 刘育骥, 耿新宇, 肖辞源. 石油工程模糊数学[M]. 成都:成都科技出版社, 1994:121-128.
- [15] 李本海, 张序君. 分类问题的模糊决策分析[J]. *模糊系统与数学*, 1992, 6(1):28-32.
- [13] 马全林, 王继和, 詹科杰, 等. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):36-39, 58.
- [14] 袁立敏, 高永, 虞毅, 等. PLA 沙障对土壤硬度的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(3):172-177.
- [15] 周丹丹. 生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D]. 中国博士学位论文全文数据库, 2009, 9.
- [16] 周丹丹, 虞毅, 胡生荣, 等. 沙袋沙障凹曲面特性研究 [J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4):22-25, 80.
- [17] 吉兰泰盐化集团公司志编纂领导小组. 吉兰泰盐化集团公司志[M]. 内蒙古阿拉善:内蒙古人民出版社, 2003:53-76.

(上接第 84 页)

- [8] 董治宝, 高尚玉, Fryrear D W. 直立植物—砾石覆盖组合措施的防风作用[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(1):7-11.
- [9] 屈建军, 凌裕泉, 刘贤万, 等. 尼龙网栅栏防沙效应研究 [J]. *兰州大学学报*, 2002, 38(2):171-176.
- [10] 王银梅, 谏文武, 韩文峰. 新型高分子材料固沙抗风蚀的风洞模拟实验[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6):12-14.
- [11] 董智, 李红丽, 左合君, 等. 土壤凝结剂沙障防沙机理的风洞模拟实验研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18 (3):154-159.
- [12] 胡英娣. 几种化学固沙材料抗风蚀的风洞实验研究 [J]. *中国沙漠*, 1997, 17(1):103-106.