

黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征

塔娜, 王健, 张慧荟, 田龙, 张青峰

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究 60 mm/h 雨强下不同耕作坡面在溅蚀阶段的微地形变化特征, 为黄土坡地水土保持耕作方式布设提供科学依据。[方法] 在室内人工模拟降雨试验的基础上, 采用激光扫描量测方法分别获取溅蚀前后 4 种不同耕作方式(人工锄耕、人工掏挖、等高耕作、耙磨整平)黄土坡面微地形相对高程, 并对能反映微地形变化的高精度 M- Δ DEM 进行了分析。[结果] 不同耕作措施下坡面微地形均具有较弱的空间变异, 其空间分异主要受耕作措施的影响; 降雨对微地形具有一定的夷平效应, 且不同耕作坡面在 1~1.3 m 尺度范围内均表现出侵蚀平衡现象; 不同耕作微地形对溅蚀均具有阻滞作用, 其中人工掏挖和等高耕作具有较强水土保持作用。[结论] 微地形水系分维能较好地反映复杂的微地形特征, 而坡面耕作方式是溅蚀过程中微地形时空变异分布状况的控制性因子。

关键词: 耕作措施; M- Δ DEM; 空间变异性; 溅蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0110-05

中图分类号: S157.4⁺2

文献参数: 塔娜, 王健, 张慧荟, 等. 黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):110-114. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.020

Variation Characteristics of Micro-topography in Tillage Loess Slope During Splash Erosion

TA Na, WANG Jian, ZHANG Huihui, TIAN Long, ZHANG Qingfeng

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

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the variation characteristics of the micro-topography during the splash erosion under the rainfall intensity of 60 mm/h in order to provide the scientific basis for layout of the soil and water conservation farming pattern in loess slope land. [Methods] Four common tillage treatments (artificial backhoe, artificial digging, contour tillage and rake wear leveling) were prepared in the loess region. Artificial rainfall, laser scanning and GIS technology were adopted to generate high precision M- Δ DEM which can reflect the real variation of tillage slopes. [Results] Different tillage slopes showed low spatial variability, and its spatial pattern was mainly affected by tillage measures rather than rainfall. The rainfall in splash erosion had a general flattening effect on the micro-topography, and different tillage slopes showed an erosion balance within the scale of 1~1.3 m. Micro-topography has strong retarding effect on the splash erosion. The artificial digging and contouring tillage had a better soil and water conservation effect. [Conclusion] Micro-topographic stream with its fractal dimension can well reflect the complex characteristic of micro-topographic, and tillage treatments control the spatial and temporal variation of micro-topographic during splash erosion process.

Keywords: tillage measure; M- Δ DEM; spatial variability; splash erosion

溅蚀是雨滴打击土面所造成的土粒分散与跃移, 使得土壤颗粒堵塞土壤本身的孔隙, 减少或者阻止了雨水的入渗, 从而极大地增加径流侵蚀力的一种侵蚀

现象, 它是土壤侵蚀的重要组成部分^[1-3], 主要发生在坡面产流之前和产流之初, 是坡面水蚀过程的开始。自 20 世纪 40 年代溅蚀概念被提出至今, 各国科学家

收稿日期: 2014-11-04

修回日期: 2014-12-08

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“微地形条件下黄土耕作坡面水蚀发育过程的三维数值模拟与机理研究”(41371273, 41271288); 陕西省自然科学基金资助项目“黄土坡面水蚀过程中土壤侵蚀形态演化数值模拟”(2011JM5007)

第一作者: 塔娜(1990—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区兴安盟人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 与水土保持。Email: tana@nwsuaf.edu.cn。

通讯作者: 张青峰(1974—), 男(汉族), 山西省孝义市人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: zhqf@nwsuaf.edu.cn。

对其形成的影响因素、测量方法及其与侵蚀和坡面水文过程的关系^[4-6]等方面开展了深入研究,但由于受到设备和技术等条件的限制,目前多数研究主要集中在定性描述层面,而对其定量化数值分析的研究甚少^[7-8]。

微地形作为反映地表起伏变化与侵蚀程度的指标,会伴随着侵蚀过程的发生与演变,通过自身的位置变化与消长影响着径流的产生、流向、汇流和径流量,进而影响侵蚀类型的演变及侵蚀产沙量的大小。但由于受土壤表面条件的复杂性、影响因素间的相互作用等的影响以及进行理论分析、实际观测和室内试验存在诸多困难,且受到以往计算机计算能力的限制,以及降雨过程和坡面参数选取的局限性^[9],使得有关微地形与溅蚀关系的研究资料较少,限制了对土壤溅蚀过程的数值模拟^[10],从而严重地影响了人们对水蚀形成机理的认识。

黄土耕作坡面受到人为管理而造成高低起伏的微地形,既是坡面水蚀作用的场所,又是导致坡面侵蚀进一步发展的主要原因,因此可将其看做是一个能够反映坡面侵蚀动力学各要素及其相互作用的综合因素^[11]。

通过必要的指标将其量化,并对其与坡面溅蚀参量之间的关系进行分析,将有助于了解坡面溅蚀过程,并对构建坡面溅蚀模型提供数据支持。为此,本文在人工模拟降雨试验和微地形激光扫描测量的基础上,探讨黄土耕作坡面微地形溅蚀过程中各参数之间的相关性及其与溅蚀的响应,以期揭示坡面微地形溅蚀机理研究奠定理论基础。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

试验 2008 年 5—9 月期间在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅进行,所用降雨设备为侧喷式人工降雨器,降雨均匀度大于 80%,降雨高度为 16 m,可以满足所有的雨滴达到终点速度。试验用土槽规格为 2.0 m×1.0 m×0.5 m,坡度可在 0°~30°调节。

选择陕西省杨凌区坡耕地表层土(0—20 cm)为试验用土。杨凌区位于黄土高原南缘,东经 108.72°,北纬 34.36°,属于温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量约 637.6 mm,土壤为壤土,灰棕色,土体较疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主,沙粒 2.82%,粉粒 55.74%,黏粒 41.44%的组成成分,质地为粉砂壤土,容重为 1.30 g/cm³,含水率为 10%。

土样风干后过 5 mm 筛,分 5 层(每层 10 cm)分别

填装在侵蚀槽中以确保土壤容重控制在 1.30 g/cm³。微地形表面分别布设黄土坡耕地农业生产中普遍采用的人工锄耕(AB, artificial backhoe)、人工掏挖(AD, artificial digging)、等高耕作(CT, contour tillage)和耙磨整平的直线坡(CK, rake wear leveling for check)4 种耕作措施^[12]。为了更接近自然状况,布设时聘请长期从事相同耕作措施农业生产的农民进行操作。侵蚀槽坡度设为 5°。

降雨前一天采用微雨方式对土壤表面进行试降雨,以保证 10% 的含水量,但对微地形结构不会造成影响。降雨雨强率定为 60 mm/h。人工模拟降雨开始后,仔细观察雨滴击溅过程,坡面薄层水流发生并在开始产流时停止降雨。

1.2 M-DEM 的建立

采用激光测距仪对各坡面相对高程信息在降雨前后分别进行观测^[12]。为了减少边缘效应的影响,数据采集区定义为 0.8 m×1.74 m,即降雨前后各坡面可分别获得 3 480 个相对高程点,每个点代表实际地面 2 cm×2 cm 的范围,用以生成微地形数字高程模型(M-DEM)^[13]。在 ArcGIS 中用降雨后的 M-DEM 减去降雨前的 M-DEM 即可生成 M-ΔDEM 栅格数据。

2 结果与分析

2.1 经典统计特征分析

运用 SPSS 17.0 分别对溅蚀阶段不同耕作坡面微地形相对高程数据进行描述性统计分析,并采用单样本 K-S 检验法在 $\alpha=0.05$ 显著水平上进行正态检验。由分析结果可知,60 mm/h 雨强下的各坡面微地形相对高程分布均符合正态分布或对数正态分布特征,故可采用地统计学方法分析其空间变异性^[14]。

根据张莉等人对空间变异程度的划分标准^[15],在 60 mm/h 雨强条件下,研究区反映离散程度和空间变异程度的 C_v 值在 0.013~0.092 的微小范围内波动,且均小于 0.1(见图 1),各微地形的空间变异均属于弱变异且整体表现为:人工掏挖>等高耕作>人工锄耕>直线坡。另一方面,反映微地形相对高程分布状况的标准差 S_d 值变化在 0.002 9~0.020 9 之间,说明各坡面微地形的分布较为均匀。

2.2 空间半变异性特征分析

借助 GS⁺ 地统计学方法来分析微地形地表相对高程的空间变异结构特征,通过半变异函数(或称半边差函数、半变异矩阵)曲线来描述相关的空间变异函数关系^[15]。结果如表 1 所示。

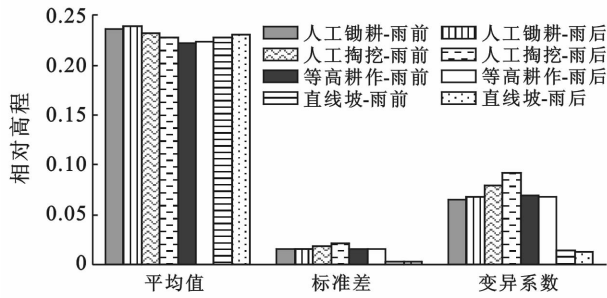


图 1 黄土坡面微地形相对高程统计特征及 K-S 检验

表 1 M- Δ DEM 相对高程半变异函数拟合参数与 Kriging 交叉检验

耕作措施	拟合模型	变程/ m	结构比 $C/(C_0 + C)$	残差平方 和 RSS
人工锄耕	Spherical	0.112	98.8	3.06E-07
人工掏挖	Spherical	0.131	100.1	1.84E-06
等高耕作	Gaussian	0.075	89.1	2.05E-07
直线坡	Gaussian	0.694	83.9	8.25E-10

由表 1 可知,不同耕作措施坡面的半变异曲线模型的残差平方和(RSS)均接近于 0,表明人工锄耕和人工掏挖坡面的微地形采用球状模型进行拟合,等高耕作和对照直线坡的微地形则以高斯模型进行拟合的效果最好。不同耕作措施下结构比 $[C/(C_0 + C)]$ 的值均大于 75%,且人工掏挖>等高耕作>人工锄

耕>直线坡,说明溅蚀阶段黄土坡面微地形均具有较高的空间自相关性^[16]且空间异质性依次减弱,其空间变异性主要受结构性因素影响,人工掏挖坡面对溅蚀的抑制作用更为强烈,具有较高的水土保持作用。

2.3 微地形因子提取与分析

微地形因子是为定量表达地貌微形态特征而设定的具有一定意义的数学参数或指标。微观坡面因子反映了该地貌微观地表单元的形态、起伏或扭曲特征。常用的微观坡面因子主要有坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、地面曲率、地形指数、分形维数、流域形状系数等^[17]。它们所描述的是一个微分点单元的信息,其量值的大小一般只受它所在点的点位高程,以及微小领域范围内高程信息的影响。

宏观坡面因子描述的一般是一个区域,或者说把一个分析窗口直接看作一个整体,分析该曲面和水平面之间,或它所对应的最佳拟合坡面之间的符合特征。其量值不仅受它所在点位的点高程影响,并且还与分析窗口内的所有高程点信息密切相关,通常采用数理统计方法自动提取。常用的宏观坡面因子主要有地形粗糙度、地形起伏度、地表切割深度、河网密度等^[17]。采用矩形 3×3 分析窗口,网格大小为 0.02 m,从 M- Δ DEM 提取的不同耕作坡面微地形因子值见表 2。

表 2 溅蚀前后不同耕作坡面微地形因子变化统计分析

地形因子	人工锄耕	变化率/%	人工掏挖	变化率/%	等高耕作	变化率/%	直线坡	变化率/%
相对高程	0.003	1.089	-0.005	-1.928	-0.005	-2.426	0.002	0.958
坡度	16.232	-1.610	24.419	-14.200	21.982	-8.379	2.945	-8.648
坡向	179.725	-1.021	180.294	0.553	203.242	4.032	179.124	-1.017
坡向变率	89.938	0.014	89.930	0.010	89.878	0.026	89.963	1.033
坡度变率	89.578	0.001	89.695	0.070	89.681	-0.036	87.980	1.420
地面曲率	98.654	0.001	89.695	0.070	120.258	-0.036	84.982	1.420
地表粗糙度	1.061	0.091	1.460	2.300	1.128	-1.577	1.002	0.050
地形起伏度	0.017	0.307	0.028	12.625	0.023	-8.527	0.004	10.057
地表切割深度	0.008	-0.056	0.014	14.752	0.012	-8.332	0.002	4.222
地表填洼量	2.936 E-05	-56.042	6.726 E-05	147.813	7.389 E-06	-11.301	1.742 E-06	3.236
河网密度	54.480	-0.697	54.377	-1.014	52.024	0.832	54.089	1.690
地形指数	-1.006	-3.651	-1.513	4.814	-1.388	-8.438	1.042	-42.873
流域长度	0.085	37.646	0.077	47.444	0.074	14.934	0.060	0.710

由表 2 可知,4 种耕作措施下 M- Δ DEM 的相对高程变化表现为人工掏挖=等高耕作<0<直线坡<人工锄耕,说明溅蚀对人工掏挖及等高耕作坡面的削平作用相同且较其他两种坡面的效果更为明显,人工掏挖和等高耕作措施更具较好的溅蚀抑制作用。微坡度是坡面微地形倾斜程度的量度,其大小直接影响着地表径流的产生。微坡度越大,地表填洼量就越

大,地表填洼量的增加对抑制水土流失作用也呈增加趋势。4 种耕作措施下微坡度表现为:人工掏挖>等高耕作>人工锄耕>直线坡,这说明溅蚀阶段抑制水土流失作用也依次减弱。坡度变化率均为负值,表明溅蚀阶段的降雨对微地形具有一定的坡度夷平效应。

坡面微地形的地表粗糙度可以表明降雨对不同耕作坡面微地形影响程度,该值越大说明地表越复

杂,对侵蚀的抑制效果更明显。4种耕作措施下地表粗糙度表现为:人工掏挖>等高耕作>人工锄耕>直线坡>0,说明溅蚀阶段抑制侵蚀的作用亦依次减弱。

分形维数表征地表糙度空间分布的复杂程度。由图2可知,4种耕作措施下分形维数表现为:人工锄耕(2.365)>人工掏挖(2.253)>等高耕作(1.912)

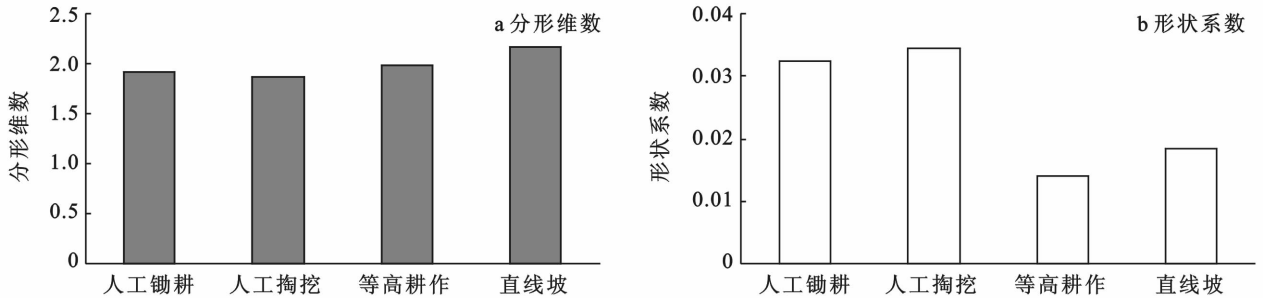


图 2 M-DEM 的分形维数和形状系数

2.4 坡面溅蚀效应

由附图5可知,不同耕作措施在坡面1~1.3m距离间M-DEM的高程值变化较为平缓,说明在溅蚀过程中,不同坡面微地形在雨滴打击作用下,在坡面中下部均存在一定的侵蚀相对平衡现象。这一范围内,地表高程以负值为主,说明此处地表出现整体夷平甚至下降。

3 讨论与结论

由于微地形分布的随机性和侵蚀过程变化的不确定性和复杂性且受到传统测量设备精确性、既得数据的不连续性和精度等问题的限制,目前还未能精确定义微地形的频谱,并导致理论值与实测值之间无法精确进行比较,且受到计算机计算能力的限制,缺乏微地形随水蚀发育演变过程数值模拟的系统研究;另一方面,降雨过程和坡面参数选取的局限性,水蚀影响因素间的相互作用以及进行理论分析、实际观测和室内试验存在诸多困难,使得微地形土壤侵蚀模型研究滞后于生产实践的需要,一些研究成果难以指导生产和加深人们对其作用的认识。厘米级微地形条件下溅蚀过程中不同耕作坡面微地形的空间分布及变化特征的研究是土壤侵蚀学科领域的前沿和热点问题,目前仍处于不断的探索阶段。

本文基于半变异函数方法对降雨前后不同耕作坡面微地形的研究发现,坡面耕作方式是溅蚀过程中微地形时空变异分布状况的控制性因子,这与赵龙山^[12]、张莉^[14]、张青峰^[17]等的研究结果一致。人工锄耕、人工掏挖、等高耕作、耙磨整平的直线坡这4种

>直线坡(1.696),表明各坡面的空间依赖性逐渐减弱,由随机因素引起的空间异质性逐渐增强,地表糙度的空间分布越来越复杂。流域形状系数是流域分水线的实际长度与流域同面积圆的周长之比,这4种耕作坡面微地形的流域形状系数值均小于1,说明流域形状比较狭长,溅蚀阶段微地形变化比较平缓,在该阶段不容易形成较大的水流。

黄土坡耕地微地形在溅蚀阶段均具有较强的空间自相关性和较弱的空间变异性。综合经典统计特征、结构比、相对高程、微坡度、地表粗糙度、分形维数等的分析来看,人工掏挖和等高耕作坡面更具有较好的溅蚀抑制作用。在此基础上,对各耕作坡面微地形特征参量进行了分类研究,进一步说明了各耕作坡面微地形与地表径流的关系,且微地形水系分维能较好地反映复杂的微地形特征。由此可知,文中的研究成果可为微地形层面上,构建黄土耕作坡面微地形模型提供方法参考,并为量化研究土壤侵蚀机理提供较高精度的数据支持。

在溅蚀过程中,雨滴击溅表土的同时表层土壤也吸收水分,土壤颗粒间被水分填充,土壤颗粒继续承受雨滴冲击震荡,致使土壤结构破坏。当表层土壤水分含量继续增加,致使土粒击溅向下迁移。溅蚀过程中,径流并未完全形成,土粒会在坡面下部(1~1.3m)出现一定击溅侵蚀平衡状态,即在该区域内土粒的迁入和迁出处于平衡状态。由此可知,在一定范围内,单纯的雨滴击溅并不一定能造成土壤的流失。溅蚀的概念可以进一步描述为:溅蚀是雨滴打击土面所造成的土粒分散与跃移,使得土壤颗粒堵塞土壤本身的孔隙,减少或者阻止了雨水的入渗,并在坡面中下部一定范围内(1~1.3m)出现击溅侵蚀平衡,同时增加了松散土壤颗粒,从而极大地增加径流侵蚀力的一种侵蚀现象。

黄土耕作坡面微地形是理解由水力引起的土壤侵蚀机理的一个重要参数,本文仅对固定坡度(5°)、雨强(60 mm/h)及溅蚀阶段坡面微地形的变化特征

进行分析,而对不同坡度、雨强及降雨阶段坡面微地形特征的变化还有待进一步研究。此外,微地形耕作措施布设时如何消除人为因素的影响,如何有效地利用变程或尺度效应来增加试验坡面的长度,如何将室内研究成果应用于野外的水土保持机理研究中,仍有许多问题值得深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 罗亲普,刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述[J]. 土壤通报,2012,43(1):230-235.
- [2] 韩学坤,吴伯志,安瞳昕,等. 溅蚀研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(4):46-51.
- [3] 程琴娟,蔡强国. 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究[J]. 水土保持学报,2010,30(1):17-21.
- [4] Huang Chihua, White I, Thwaite E G, et al. A non-contact laser system for measuring soil surface topography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(3):350-355.
- [5] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 降雨过程对地表糙度的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(5):30-33.
- [6] 吴发启,郑子成. 坡耕地地表糙度的量测与计算[J]. 水土保持通报,2005,25(5):70-74.
- [7] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报,2010,28(4):415-421.
- [8] 李鹏,李占斌,郑良勇,等. 黄土坡面水蚀动力与侵蚀产沙临界关系试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(3):435-441.
- [9] David F M. A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes[J]. Geocomputation, 1998,24(4):353-372.
- [10] 郑粉莉,高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学,2003,23(2):230-235.
- [11] 薛海,孔纯生,熊秋晓,等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河,2008,30(12):90-92.
- [12] 赵龙山,张青峰,梁心蓝,等. 基于 GIS 的坡耕地数字高程模型的建立与应用[J]. 农业工程学报,2010,26(11):317-322.
- [13] Zhang Qingfeng, Zhao Longshan, Wang Jian, et al. Spatiotemporal variability and simulation of tilled less microtopography in water erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,69(4):343-351.
- [14] 张莉,张青峰,徐健,等. 坡面水蚀过程中地表糙度的空间异质性研究[J]. 水土保持研究,2014,21(2):6-10.
- [15] 张莉,张青峰,郑子成,等. 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究[J]. 水土保持研究,2012,19(5):7-11.
- [16] 张莉,张青峰,赵龙山,等. 黄土坡耕地地表糙度的空间异质性研究[J]. 中国农业科学,2014,47(12):2365-2373.
- [17] 张青峰,王健,赵龙山,等. 基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.
- [18] 邵文伟. 鹫峰国家森林公园优先流类型及影响因子研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [19] 郭建斌,刘颖,游先祥. 基于“3S”技术的鹫峰森林公园立地分类及制图研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(32):16167-16170.
- [17] 张摇川. 喀斯特坡面表层土壤含水量,容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
- [18] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989,53(2):556-559.
- [19] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征[J]. 应用生态学报,2008,18(12):2675-2680.

(上接第 109 页)

- [9] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3):188-190.
- [10] 解文艳,樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(4):381-384.
- [11] 马晓刚. 缙云山不同植物群落类型土壤入渗性能研究[D]. 重庆:西南大学,2008.
- [12] 樊军,邵明安,王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):114-119.
- [13] 赵永泉,彭道黎. 北京鹫峰公园主要人工林群落多样性研究[J]. 西南林学院学报,2008,28(1):17-21.
- [14] 王勇. 鹫峰国家森林公园土壤系统分类研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.