

冻融坡面土壤剥蚀率主要影响因素分析

刘彦辰, 王 瑄, 周丽丽, 咎学龙, 盛思远

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161)

摘 要:为确定冻融坡面影响土壤剥蚀率的主要因素,采用 2 个(10° , 15°)坡度、2 个(3 L/min, 9 L/min)流量和 4 个(2 cm, 5 cm, 8 cm, 11 cm)起始解冻深度组合进行野外冲刷试验,运用灰色关联分析、模糊贴近度分析和通径分析方法,分别分析了各因素对土壤剥蚀率的影响作用。结果表明:流量与土壤剥蚀率的灰色关联度最大,坡度次之;水流功率与土壤剥蚀率的模糊贴近度最大,流量、起始解冻深度的模糊贴近度均大于坡度;水流功率对土壤剥蚀率的决定作用最大,起始解冻深度次之,水流剪切力通过其他因素对土壤剥蚀率的间接作用最大;三种方法分析结果表明水流功率、流量、起始解冻深度、坡度是影响土壤剥蚀率的主要因素。

关键词:土壤剥蚀率; 冻融坡面; 灰色关联分析; 模糊贴近度分析; 通径分析

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0001-05

The Main Factors Affecting the Soil Detachment Rate on Freeze-Thaw Slopes

LIU Yanchen, WANG Xuan, ZHOU Lili, ZAN Xuelong, SHENG Siyuan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China)

Abstract: In order to determine the main factors that affect the soil detachment rate under the freeze-thaw slopes, three factors including slopes (10° , 15°), flows (3 L/min, 9 L/min) and original thaw depths (2 cm, 5 cm, 8 cm, 11 cm) which were combined to operate the field scouring test, three approaches (grey correlation analysis, nearness degrees analysis, path analysis) had been taken into account to analyze the effects of these factors on the soil detachment rate separately. The results showed that among the grey relational degree between these factors and the soil detachment rate, flow occupied the first place, followed by slope; among the fuzzy nearness degrees between these factors and the soil detachment rate, stream power occupied the first place, followed by both the flow and the original thaw depth being higher than slope; stream power played the crucial role in determining the soil detachment rate, followed by the original thaw depth and the flow shear stress exerted the most considerable effect indirectly on the soil detachment rate through other factors. Conclusion that came from the analyses of three approaches showed that stream power, flow, the thaw depth and slope were the main factors influencing the soil detachment rate.

Keywords: soil detachment rate; freeze-thaw slope; grey correlation analysis; nearness degrees analysis; path analysis

坡面产沙是一个高度非线性动态过程,受到多个因素的影响作用,土壤侵蚀量与水动力学特征参数相关性显著^[1]。Lyle 和 Smerdon^[2]首次通过水槽试验,对土壤分离速率与水流剪切力间的关系进行了研究;Nearing 等^[3]通过变坡水槽试验发现土壤剥蚀率与水深、坡度呈对数相关关系,坡度对土壤剥蚀率的影响权重大于水深;Elliot & Laflen^[4]、管新建^[5]等认为水流功率与径流剥离能力关系最为密切;欧洲的 EURUSEM 和 LISEM 侵蚀模型中,在 Govers^[6]的室内模拟试验基础上,将剥离能力定义为单位水流功

率的函数;谭贞学等^[7]通过模拟降雨试验,分析认为平均水流断面单位能量与细沟输沙模数响应关系最大;吴淑芳等^[8]通过野外放水冲刷试验,分析认为径流单位水流功率可以简便、准确地描述坡面土壤侵蚀过程;张科利^[9]、陆绍娟^[10]、王瑄^[11]等认为水流剪切力与土壤剥蚀率发展趋势最为接近;张光辉等^[12]通过变坡水槽试验分析认为,土壤剥蚀率是流量、坡度、水深的函数,流量对土壤剥蚀率的影响大于坡度。

我国冻土面积约占国土面积的 75%,冻融侵蚀分布广泛^[13]。在春季解冻期,表层土壤经历着冻结与融化的

反复作用,土壤粘聚力变小,土壤分散力变大,土壤侵蚀率表现为增加趋势^[14]。Chow^[15]、Froese^[16]等研究发现,土壤侵蚀在春季解冻期最严重;Oygarden^[17]、Sharratt B S 等^[18]通过降雨试验分析认为,未完全解冻层是造成较大水土流失量的主要原因;范昊明等^[19]通过野外模拟融雪水冲刷试验,研究了土壤侵蚀量与融水量和解冻深度间的关系,结果表明解冻深度对土壤侵蚀量的影响非常显著;周丽丽^[20]、刘佳^[21]等分别通过室内模拟试验,研究了白浆土和黑土解冻期土壤侵蚀特征,结果表明坡面土壤侵蚀受到含水率、降雨强度和解冻深度的综合影响。综上所述,在非冻融坡面有关土壤剥蚀率影响因素的研究成果较多,而关于冻融侵蚀的研究多侧重于未完全解冻层的存在对侵蚀量的影响,有关水蚀动力参数对冻融坡面土壤剥蚀率影响的研究较为少见。本文在室外径流小区冻融坡面进行冲刷试验,对土壤剥蚀率与侵蚀因子进行灰色关联分析、模糊贴近度分析、通径分析,研究影响冻融坡面的主要侵蚀因子,以期对春季解冻期土壤侵蚀的防治与预测提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

试验在沈阳农业大学水利学院水土保持综合试验场进行(北纬 41°50'4.37",东经 123°33'35.32"),位于沈阳市东陵区,试验场气候类型属于温带大陆性季风气候,年平均气温 6.2~9.7℃,多年均降水量约为 716 mm,冬季降水量约占全年降水量的 6%。试验土样为沈阳郊外耕地土,土壤类型为棕壤土,土壤粒径以 1.0~0.25 mm 和 0.25~0.05 mm 为主,分别占 45.13% 和 41.40%,试验用土以细粉土和中砂粉土为主。

试验设备:室外径流小区坡面长为 8 m,宽为 1 m,四周边埂采用砖砌,并用水泥抹面。径流小区底端设置集流槽,以采集坡面径流和泥沙,坡面顶端设置稳流槽,试验中为了减少稳流槽与试验土槽结合处因边壁作用导致的土壤下陷,试验土槽最顶端的坡段铺设 2 m 长塑料布,供水设备采用定水头控制流量,径流小区在试验前一年 10 月中旬布设完成,静置一个冬季。

1.2 试验方法

试验采用室外径流小区在春季解冻期自然气温条件下解冻后进行模拟薄层水流冲刷试验。通过分析试验区降水和土壤冻融日循环过程资料,试验设计 2 个放水流量(3 L/min,9 L/min),2 个坡度(10°,15°)和 4 个起始解冻深度(2,5,8,11 cm),进行组合模拟薄层水流冲刷试验。为确保冲刷流量达到设计要求,每次试验开始前需要对流量进行率定,待流量稳定后进行试

验。用测针测定解冻深度,当起始解冻深度达到设计要求后开始冲刷试验。试验开始后,仔细观察径流冲刷过程,记录细沟产生的位置和时间,用高锰酸钾溶液测定坡面径流表面流速,同时用薄钢尺在 9 个固定位置测坡面径流宽度(径流宽度测定位置为坡上、坡中、坡下各取 3 处),为避免冲刷时间过长,土壤下部冻层融化过多而影响试验结果,整个试验过程持续约 15 min。在土槽出口处每分钟接取一个径流泥沙样,试验后用置换法测定各个样品的泥沙量。每个试验在单独的径流小区进行,重复一次,试验误差控制在 20% 以内,计算结果取两次试验数据平均值。

1.3 数据分析方法

1984 年邓聚龙针对关系分析提出灰色关联分析,它是基于灰色系统理论的一种重要的多因素分析方法。其基本思路是比较数据序列曲线间的几何相似程度,认为几何形状越相似,则关联程度越大,比较数列和参考数列发展态势也就越接近,反之则关联度越小,比较数列和参考数列发展态势相差越远。灰色关联系数的计算公式为:

$$Y[x_0(k), x_i(k)] = \frac{x_{\min} + \rho x_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho x_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$; $x_{\min} = \min_i x_{\min} = \frac{\min}{k} \Delta_{oi}(k)$ 和 $x_{\max} = \max_i x_{\max} = \frac{\min}{k} \Delta_{oi}(k)$ 分别是比较序列 x_i 和参考序列 x_0 的各属性绝对差值的最小值和最大值; ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$,一般按照最少信息原理取 0.5。

1921 年数量遗传学家 Sewall Wright 提出通径分析,通过多年发展,已成为一门解决多变量与因变量之间相关关系的科学方法。其基本思路是用通径系数来表示各自变量对因变量的直接效应和通过其他自变量对因变量的间接效应。通径系数是介于回归系数与相关系数之间表示相关变量的一个统计量;是有方向、自变量与因变量之间的相关系数。

1965 年美国控制论专家 Zaden 创立模糊数学,贴近度理论则是由汪培庄教授在模糊数学理论上提出,已在自然科学许多领域得到应用。其基本思路是模糊贴近度越大,两个模糊集的接近程度越大。其计算公式有以下四种:

Hamming 贴近度 σ_H

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

Euclid 贴近度 σ_E

$$\sigma_E(C_j, D_k) = 1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \left[\sum_{i=1}^m (c_{ij} - d_{ik})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

最大最小贴近度 σ_1

$$\sigma_1(C_j,D_k)=\frac{\sum_{i=1}^m(c_{ij}\cap d_{ik})}{\sum_{i=1}^m(c_{ij}\cup d_{ik})}$$

(4)

算术平均最小贴近度 σ_2

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

(5)

2 结果与分析

2.1 土壤剥蚀率影响因子灰色关联分析

选取土壤剥蚀率为参考数列 Y_0 ,选取流量(Q),坡度(S),起始解冻深度(H),径流水深(h),水流剪切力(τ),水流功率(ω),单位水流功率(P)作为比较数列 $x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7$,根据灰色关联理论用式(1)计算出各因子对 Y_0 的关联系数,见表 1。

表 1 土壤剥蚀率影响因子灰色关联度计算结果

序号	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$x_4(k)$	$x_5(k)$	$x_6(k)$	$x_7(k)$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.598	0.598	0.768	0.600	0.600	0.623	0.630
3	0.679	0.679	0.404	0.640	0.640	0.649	0.690
4	0.643	0.643	0.297	0.594	0.594	0.591	0.652
5	0.690	0.540	0.540	0.555	0.555	0.612	0.586
6	0.839	0.474	0.882	0.501	0.501	0.535	0.500
7	0.751	0.508	0.505	0.520	0.520	0.539	0.528
8	0.925	0.451	0.369	0.465	0.465	0.475	0.469
9	0.697	0.901	0.697	0.648	0.777	0.729	0.816
10	0.574	0.706	0.811	0.554	0.653	0.578	0.600
11	0.660	0.840	0.411	0.590	0.678	0.631	0.725
12	0.721	0.942	0.283	0.624	0.716	0.631	0.747
13	0.734	0.620	0.516	0.516	0.614	0.589	0.580
14	0.898	0.479	0.695	0.418	0.481	0.476	0.471
15	0.820	0.456	0.699	0.401	0.459	0.443	0.438
16	0.590	0.375	0.518	0.333	0.371	0.380	0.385
灰色关联度	0.739	0.638	0.587	0.560	0.602	0.593	0.613

由表 1 可以看出,在不同坡度,不同流量,不同解冻深度条件下 x_1 与 Y_0 的关联度最大为 0.739,其次为 x_2 ,关联度为 0.638。流量与土壤剥蚀率关系最为密切,对坡面径流分离土壤过程产生最重要的影响,坡度次之,并且流量对 Y_0 的影响远大于坡度。流量越大,坡面径流搬运泥沙能力越强,侵蚀越严重。水流剪切力表示径流冲刷能力,单位水流功率和水流功率表示径流分离土壤过程消耗的能量,与 Y_0 的关联

度系数大小基本一致。起始解冻深度居第六位,径流水深与 Y_0 的关联度最小。

2.2 土壤剥蚀率影响因子模糊贴近度分析

选取土壤剥蚀率(Y_0)、流量(Q)、坡度(S)、起始解冻深度(H)、径流水深(h)、水流剪切力(τ)、水流功率(ω)、单位水流功率(P)作为数列集合,根据模糊贴近度理论用式(2—5)分别计算出各因子对 Y_0 的 4 种贴近度,见表 2。

表 2 土壤剥蚀率影响因子的贴近度计算结果

项目	$\sigma(x_1,Y_0)$	$\sigma(x_2,Y_0)$	$\sigma(x_3,Y_0)$	$\sigma(x_4,Y_0)$	$\sigma(x_5,Y_0)$	$\sigma(x_6,Y_0)$	$\sigma(x_7,Y_0)$
hamming 贴近度	0.6953	0.5657	0.7009	0.1990	0.8066	0.8504	0.8462
Euclid 贴近度	0.6552	0.5015	0.6161	0.0574	0.7677	0.8099	0.8072
最大最小贴近度	0.5073	0.3643	0.5141	0.3466	0.6583	0.7296	0.6674
算术平均贴近度	0.6731	0.5340	0.6791	0.5148	0.7940	0.8437	0.8005

从表 2 中可以看出,4 种贴近度计算结果的大小排序基本一致,水流功率与土壤剥蚀率的贴近度最大,说明水流功率对土壤剥蚀率的影响最大,单位水流功率和水流剪切力分别居于第二、三位。起始解冻深度的 Euclid 贴近度小于流量,而其他三个贴近度

均大于流量,因此流量和解冻深度对土壤剥蚀率的影响尚无法判断,流量和解冻深度对土壤剥蚀率的影响大于坡度,径流水深对土壤剥蚀率的影响最小。

2.3 土壤剥蚀率影响因子通径分析

选取土壤剥蚀率(Y_0)为因变量,7 个影响因子为

自变量,进行逐步回归分析,选取最优线性组合。水流功率、解冻深度、水流剪切力共 3 个指标进入最优线性回归模型: $Y_0 = -37.662 + 20.650x_6 + 2.293x_3 + 1.528x_5$ ($R^2 = 0.979$), $F = 188.01 > F_{0.01}(3, 12) = 5.95$, 表明回归方程达到极显著水平, 3 个因子对土

壤剥蚀率有主要影响, 因此进行因子间通径分析具有统计学意义。通过对进入土壤剥蚀率影响因素最优回归模型的因子进行通径分析, 得到各因子与土壤剥蚀率间的直接通径系数、间接通径系数, 结果见表 3。计算求出每个因子的决定系数, 结果见表 4。

表 3 土壤剥蚀率影响因素的通径分析结果

影响因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数				系数和
			水流功率	起始解冻深度	水流剪切力	间接总和	
水流功率	0.819**	0.826**	—	-0.1514	0.1438	-0.0076	0.8184
解冻深度	0.306	0.567**	-0.2205	—	-0.0402	-0.2608	0.3062
水流剪切力	0.709**	0.182*	0.6525	-0.1253	—	0.5272	0.7092

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平下显著, * 表示在 $p < 0.05$ 水平下显著。

由表 3 可以得出: (1) 在试验条件范围内, 土壤剥蚀率与水流功率、水流剪切力均呈正相关, 且 $p < 0.01$; (2) 对直接通径系数显著性检验得出, 土壤剥蚀率与水流功率、起始解冻深度极显著相关, 与水流剪切力显著相关; (3) 水流功率、起始解冻深度间接通径系数为负值, 二者通过其他因素对土壤剥蚀率起到抑制作用, 水流剪切力则起到促进作用; (4) 水流功率直接通径系数最大, 说明水流功率是影响土壤剥蚀率的重要因子, 水流功率间接通径系数仅为 -0.007 6, 通过其他因

素对土壤剥蚀率的影响最小; (5) 起始解冻深度直接通径系数居第二位, 且通过水流功率对土壤剥蚀率的间接通径系数为 -0.260 8, 该值较大, 是影响土壤剥蚀率的次要因子; (6) 水流剪切力直接通径系数最小, 对土壤剥蚀率的影响最小, 但其间接通径系数居三因子之首, 且为正向作用, 说明水流剪切力对土壤剥蚀率的影响不可忽视; (7) 误差项的直接通径系数 0.144 9, 对 Y_0 的决定程度为 0.021 0, 说明还有其他对土壤剥蚀率有影响因素没有充分考虑, 需进一步深入研究。

表 4 各影响因子对土壤剥蚀率的决定系数

影响因子	决定系数			决定系数排序	对 R^2 的总贡献	对 R^2 的总贡献排序
	水流功率	起始解冻深度	水流剪切力			
水流功率	0.6823	-0.2501	0.2375	1	0.6765	1
解冻深度		0.3215	-0.0456	2	0.1735	2
水流剪切力			0.0331	3	0.1290	3

由表 4 得出水流功率的决定系数和对 R^2 的总贡献居第一位, 且直接通径系数最大, 因此, 水流功率是影响土壤剥蚀率的最重要因子; 解冻深度的决定系数和对 R^2 的总贡献居第二位, 是影响土壤剥蚀率的次要因子; 水流剪切力的决定系数和对 R^2 的总贡献最小, 但是其间接通径系数较大, 通过其他因子对土壤剥蚀率的影响较大, 其作用不可忽视, 排第三位。综上所述, 影响土壤剥蚀率因子大小顺序为: 水流功率 > 起始解冻深度 > 水流剪切力。

对三种方法分析结果进行比较, 模糊贴近度分析和通径分析关于水蚀动力参数对土壤剥蚀率影响作用排序的结果是一致的, 水流功率与土壤剥蚀率关系最为密切, 这一结论与 Elliot & Laflen^[4]、管新建^[5]等的研究结果一致, 灰色关联分析的结果表明流量对土壤剥蚀率影响最大。水流功率是流量、坡度和流速等的函数, 包含了流量、坡度和流速的共同影响, 比流量的影响更广泛, 并且水流功率对预测模型 R^2 的总贡献达到 0.676 5, 因此认为水流功率是对土壤剥蚀率影响最

大的因子。灰色关联分析和模糊贴近度分析关于径流水深、流量、坡度对土壤剥蚀率的影响结果是一致的, 即流量的影响大于坡度, 径流水深影响最小, 这一结论与张光辉^[12]等的研究结果一致, 而张光辉等的试验结果是通过室内水槽试验, 在非冻融坡面获得的, 因此认为流量、坡度、径流水深对土壤剥蚀率影响作用排序不受冻融作用影响。关于起始解冻深度的影响三种分析结果有较大差异, 灰色关联度居第六位, 小于流量和坡度, Euclid 贴近度小于流量, 而其他三个贴近度均大于流量和坡度, 通径分析过程中排除流量、坡度的影响后起始解冻深度对 R^2 的总贡献居第二位, 是次要影响因素, 但是流量的灰色关联系数远大于起始解冻深度, 坡度与起始解冻深度的灰色关联系数差异较小, 且起始解冻深度通过水流功率、水流剪切力对土壤剥蚀率起抑制作用, 间接通径系数达到 -0.260 8, 而艾宁等^[22]通过野外降雨试验发现径流量对产沙量起到促进作用, 因此流量、解冻深度、坡度对土壤剥蚀率的影响大小排序为: 流量 > 起始解冻深度 > 坡度。

3 结论

本文通过室外径流小区试验,在不同坡度、不同流量、不同起始解冻深度条件下对土壤剥蚀率的影响因素进行灰色关联分析、模糊贴近度分析、通径分析,主要结论如下:

(1) 通过灰色关联分析得出流量对土壤剥蚀率影响最大,坡度次之,水流功率对土壤剥蚀率的影响大于起始解冻深度,径流水深对土壤剥蚀率的影响最小。

(2) 通过模糊贴近度分析得出水流功率的4种贴近度最大,与土壤剥蚀率发展趋势最接近,流量和起始解冻深度对土壤剥蚀率的影响大于坡度,径流水深对土壤剥蚀率的影响最小。

(3) 通径分析结果表明,水流功率、起始解冻深度、水流剪切力是土壤剥蚀率的主要影响因素,大小顺序为:水流功率>起始解冻深度>水流剪切力。

(4) 通过对三种方法分析结果对比,水流功率、流量、起始解冻深度、坡度是影响土壤剥蚀率的主要因素,大小排序为:水流功率>流量>起始解冻深度>坡度。

参考文献:

- [1] 吴秋菊,吴发启,王林华. 土壤结皮坡面流水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 73-80.
- [2] Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(3): 419-422.
- [3] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55(2): 339-344.
- [4] Elliot W J, Laflen J M. A process based rill erosion model[J]. Trans. ASAE, 1993, 36(1): 65-72.
- [5] 管新建,李占斌,王民,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, 23(6): 1-6.
- [6] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[J]. IAHS Publication, 1990 (189): 45-63.
- [7] 谭贞学,王占礼,刘俊娥,等. 黄土坡面细沟径流输沙对

水动力学参数的响应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 1-6.

- [8] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228.
- [9] 张科利,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9-15.
- [10] 陆绍娟,王占礼,谭贞学. 黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 46-49.
- [11] 王瑄,李占斌,鲁克新,等. 坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率灰色关联分析[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 525-530.
- [12] 张光辉,刘宝元,张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- [13] 魏霞,丁永建,李勋贵. 冻融侵蚀研究的回顾与展望[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 271-275.
- [14] 杨俊鹏,周丽丽,范昊明,等. 草甸土冻融环境与春季解冻期降雨侵蚀模拟研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 26-28, 33.
- [15] Chow T L, Rees H W, Monteith J. Seasonal distribution of runoff and soil loss under four tillage treatments in the upper St. John River valley New Brunswick, Canada[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(4): 649-660.
- [16] Jane C Froese, Richard M Cruse, Mohammadreza Ghaffarzadeh. 郎印海. 冻融侵蚀机理[J]. 水土保持科技情报, 2001(3): 26-28.
- [17] Øygarden L. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway [J]. Catena, 2003, 50(2): 217-242.
- [18] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern US Corn Belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487-494.
- [19] 范昊明,武敏,周丽丽,等. 草甸土近地表解冻深度对融雪侵蚀影响模拟研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 28-31.
- [20] 周丽丽,范昊明,武敏,等. 白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 574-578.
- [21] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 64-67.
- [22] 艾宁,魏天兴,朱清科. 基于通径分析的陕北黄土坡面径流产沙影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(6): 77-84.