

基于近景摄影测量的径流冲刷条件下冻融坡面侵蚀产沙过程

明旭辉, 王瑄, 盛思远, 张凯, 李宛江

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161)

摘要: 为研究冻融坡面径流冲刷条件下侵蚀产沙过程, 采用2个坡度(10°, 15°)、3个流量(3, 6, 9 L/min)、2个起始解冻深度(6, 12 cm)组合进行野外冲刷试验, 结合近景摄影测量技术分析不同解冻深度、不同坡度和不同流量条件下的产沙量, 运用线性回归方程对近景摄影测量值和实测值进行拟合。结果表明: 起始解冻深度和坡度相同条件下, 冻融坡面的土壤侵蚀产沙量随着径流量和坡度的增大而增大; 随着时间推移, 产沙量越来越小。在流量和坡度相同时, 随着初始解冻深度的增大, 坡面产沙量也逐渐增大; 在流量和解冻深度相同时, 随着坡度的增大, 坡面产沙量也逐渐增大。当流量、解冻深度和坡度最大时, 坡面侵蚀产沙量达到最大。坡面产沙量实测值与近景摄影测量对比分析得到误差平均精度为90.67%, 近景摄影测量技术可以在冻融条件下土壤侵蚀监测中应用。

关键词: 冻融坡面; 产沙过程; 近景摄影测量

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0039-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.006

Erosion and Sediment Yield Process on Freeze-thaw Slope Based on Close Range Photogrammetry Under Runoff Scouring Conditions

MING Xuhui, WANG Xuan, SHENG Siyuan, ZHANG Kai, LI Wanjiang

(College of Hydraulic Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161)

Abstract: Freezing-thawing is one of the main external forces of soil and water loss on slopes during spring thawing period. In order to study the erosion and sediment yield process under the condition of runoff scouring on frozen-thawed slopes, two slope gradients (10, 15 degrees), three flow rates (3, 6, 9 L/min) and two initial thawing depths (6, 12 cm) were used to carry out field scouring tests with close-range photography. The sediment yield under different thawing depths, slopes and discharge conditions was analyzed by measuring technique. The close-range photogrammetric measurements and measured values were fitted by linear regression equation. The results showed that under the same conditions of initial thaw depth and slope, the soil erosion and sediment yield on the freeze-thaw slope increased with the increase of flow and slope; with the passage of time, the sediment yield would be smaller and smaller. At the same flow and gradient, the sediment yield increased with the initial thaw depth. When the flow rate and thaw depth were the same, the sediment yield increased with the increase of slope. When the discharge, thaw depth and slope were the largest, the erosion and sediment yield on the slope reached the maximum. Compared with the close range photogrammetry, the average error of the measured sediment yield was 90.67%. The close range photogrammetry technology can be applied to soil erosion monitoring under freeze-thaw conditions.

Keywords: freeze-thaw slope; sediment yield process; closerange photogrammetry

冻融侵蚀是由于土壤及其母质孔隙中或岩石裂缝中的水分在冻结时, 体积膨胀, 使裂隙随之加大、增多所导致整块土体或岩石发生碎裂, 消融后其抗蚀稳定性大为降低, 在重力作用下岩土顺坡向下方产生位

移的现象^[1]。范昊明等^[2]通过室外人工模拟融雪水冲刷试验, 系统研究春季解冻期土壤起始解冻深度对坡面侵蚀量的影响, 结果表明起始解冻深度对坡面产流产沙有显著影响; 李占斌等^[3]通过冻融作用对坡面

收稿日期: 2018-09-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471225); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养项目(2014054)

第一作者: 明旭辉(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 878696698@qq.com

通信作者: 王瑄(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xuanw11@163.com

盛思远(1988—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事流域治理研究。E-mail: 467932505@qq.com

侵蚀过程研究发现,坡面经过冻融作用后,土壤含水量增加,土壤容重降低,孔隙度增大,冻融坡面稳渗率为未冻融坡面的 2 倍;刘彦辰等^[4]运用灰色关联和模糊贴近度等方法,分析土壤剥蚀率与其侵蚀因子的关系;尚佰晓等^[5]利用放水冲刷试验得出,水流中的泥沙含量来源于水流对土壤的剥蚀,即当水流剪切力大于土壤临界剪切力时土壤颗粒被剥蚀;王飞超等^[6]研究冻融坡面在降雨条件下土壤的物理性质、产流、产沙和累计产流产沙过程,并得出冻融坡面产沙量是未冻融坡面产沙量的 0.9 倍。

近景摄影测量^[7-9]指测量距离在 300 m 以内,拍摄地点处在物体周边的摄影测量。近景摄影测量技术兼有非接触性测量手段,不伤及被测体,影像信息丰富,信息容易储存,可重复使用信息,测量精度高、成本低、速度快,外业劳动强度小等特点,近景摄影测量技术目前已经广泛应用于城市区域规划、各类建筑工程、医学和考古等部门^[10-11]。国内水土保持领域中应用近景摄影测量技术的研究还比较少^[12-13],主要集中在滑坡监测方面和边坡稳定性等方面的应用^[14],需要借助于具备单反定焦镜头的专业相机或者专业摄影测量相机获取影像信息,国外一些学者利用数字近景摄影测量的方法对微观土壤侵蚀领域进行一定的探索^[15-16]。本试验使用普通数码单反相机观测径流冲刷条件下冻融坡面的侵蚀产沙过程,结合 Photo Modeler Scanner 6.5 近景摄影测量系统^[17-19]分析冻融条件下微区土壤侵蚀量,并采用简单线性回归方程分析实测值与计算值之间的关系,为冻融坡面土壤侵蚀的防治与预测提供理论依据,为生产建设项目中土壤侵蚀的机理研究和土壤侵蚀后期的监测提供一种高效、便捷的方法。

1 材料与方 法

1.1 试验概况

本试验在沈阳市沈河区沈阳农业大学水利学院综合试验场进行。试验土样为沈阳市郊外耕地土,属于棕壤。室外径流小区 8 m×1 m,共 8 个径流小区,分为 4 个 15°坡、4 个 10°坡,径流小区试验在 2016 年 10 月下旬布置完成,静置 1 个冬季,使坡面经历 1 个冻融循环过程。

1.2 试验设计

试验采用 3 个流量(3, 6, 9 L/min)、2 个坡度(10°, 15°)和 2 个起始解冻深度(6, 12 cm)进行径流冲刷试验。于 2017 年 3 月 18 日开始,3 月 26 日结束。冲刷过程由水泵向定水头供水箱供水,使水箱保持满状态以稳定水压,采用阀门控制流量,用水表计时标定流量,水流经过稳流槽均匀流入土槽,土槽底端设置集流槽,采集坡面径流和泥沙。2 月 27 日在

坡面上铺设棉被,其上盖遮阴网,防止坡面解冻过快。试验开始前在坡面 8 个方向分别布设相机,以采集影像信息,并用测针测定坡面起始解冻深度,当起始解冻深度达到试验设计要求后开始进行冲刷试验。试验开始后,首先观察径流的冲刷过程,用相机记录坡面细沟产生的位置和时间,每 1 min 拍摄 1 次,在集流槽处用集流桶每分钟接取 1 个径流泥沙样,为了避免冲刷时间过长使得土壤下部的冻层融化过多,影响试验结果,整个试验过程大约持续 10 min。试验结束后,用常规径流桶测定法测定浑水体积,使样品静置 24 h,用烘干法测定产沙量。通过采集的影像信息分析土壤侵蚀量,结合近景摄影测量软件得到微区坡面土壤侵蚀前后所造成的微区模拟变化曲面,再通过导出相关矢量文件利用软件进行体积解算,借助于 Auto CAD 3Dcivil 2012 和 Photo Modeler Scanner 6.5 近景摄影测量系统进行试验前和试验后的土壤侵蚀体积的测量和计算,从而得到土壤侵蚀体积,获取试验后的土壤侵蚀产沙量。试验设计见图 1。

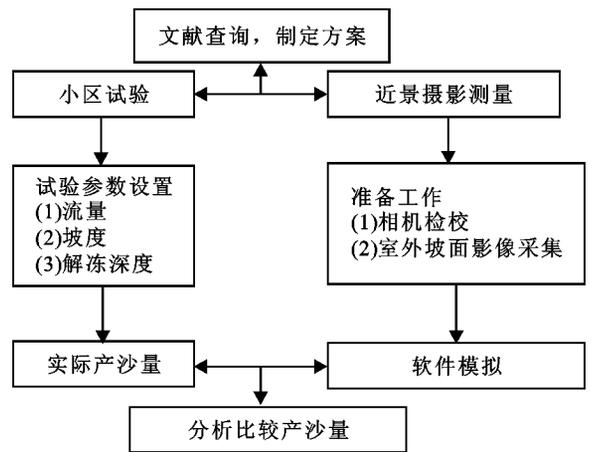


图 1 试验设计

1.3 近景摄影测量原理

近景摄影测量技术原理主要通过直接线性变换解法构建三维模型。其特点是不需要内、外方位元素,特别适用于非量测相机,可以满足中、低精度的测量任务。直接线性变换解法是指在非地形摄影测量中,用像点坐标与其对应的物方空间坐标直接变换关系式进行像片数学处理的方法,通过建立物方坐标(X, Y)与像方坐标(x, y)间的映射关系,解算出物方坐标(X, Y)。二维直接线性变换解法的数学模型见公式(1),其解算过程包括 L 系数解算和物方坐标解算。

$$\begin{cases} x + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3}{L_7 X + L_8 + 1} = 0 \\ x + \frac{L_4 X + L_5 Y + L_6}{L_7 X + L_8 + 1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 和 Y 为物方坐标值; x 和 y 为对应点的像方坐标值; L_1, L_2, \dots, L_8 为待定系数。根据二维直接线

性变换解法的数学模型,通过公式(2)可得到 L 系数的解算为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ M \\ y_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_1 X_1 & x_1 Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & y_1 X_1 & y_1 Y_1 \\ X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_2 X_2 & x_2 Y_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 1 & y_2 X_2 & y_2 Y_2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M \\ 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & 1 & y_4 X_4 & y_4 Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \\ L_7 \\ L_8 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

物方坐标解算:求得 L 系数后,按公式(3)可求解像方坐标 (x, y) 对应的物方空间坐标 (X, Y) :

$$\begin{cases} (L_1 + xL_7)X + (L_2 + xL_8)Y + (L_3 + x) = 0 \\ (L_4 + yL_7)X + (L_5 + yL_8)Y + (L_6 + y) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

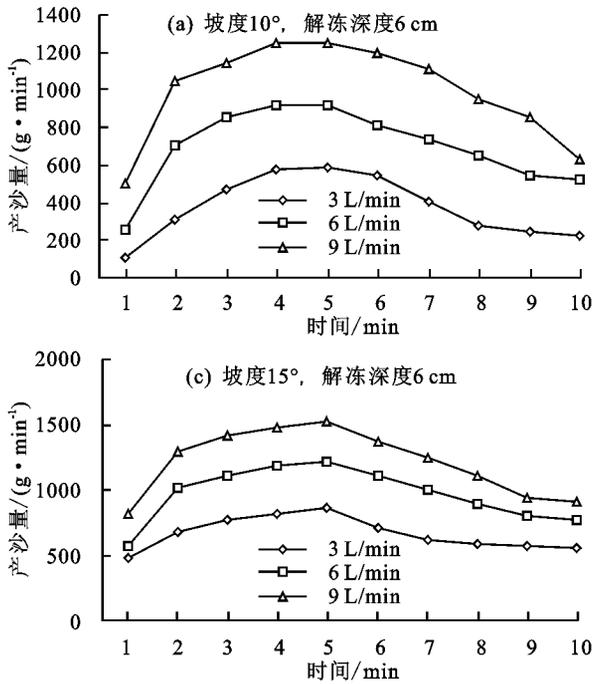


图 2 近景摄影测量条件下坡面产沙量随时间的变化

由图 3 可知,在相同流量、相同坡度和不同解冻深度条件下,随着初始解冻深度增大,坡面产沙量也逐渐增大。在流量和解冻深度相同时、不同坡度条件下,随着坡度增大,坡面产沙量也逐渐增大;当流量、解冻深度和坡度最大时,坡面侵蚀产沙量达到最大。

2.1.2 坡面产沙量常规监测与近景摄影测量的误差 根据径流冲刷试验坡面影像信息的采集,通过近景摄影测量软件得到微区坡面土壤侵蚀前后所造成的微区模拟变化曲面,再通过导出相关矢量文件利用软件进行体积解算,借助于 Auto CAD 3Dcivil 2012 和 Photo Modeler Scanner 6.5 近景摄影测量系统进行试验后土壤侵蚀体积的测量和计算,从而得到土壤侵蚀量。径流冲刷试验后,冻融坡面前后土壤侵蚀估算根据实测产沙量与近景

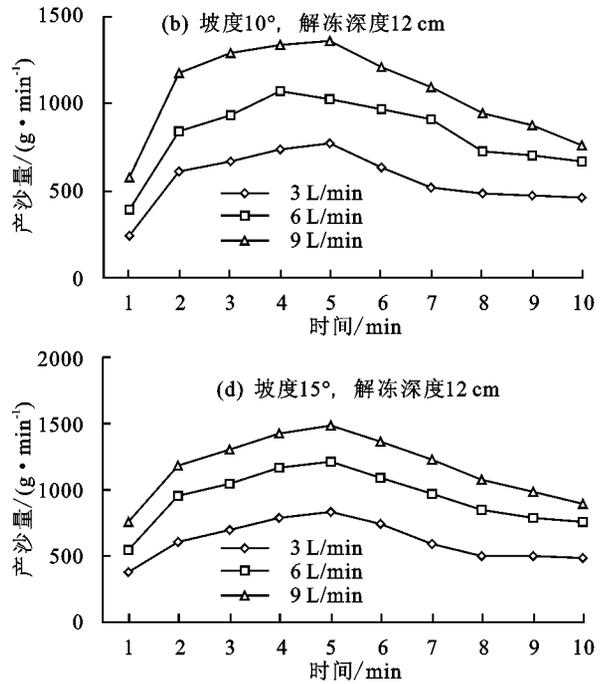
1.4 数据分析方法

应用 IBM SPSS Statistics 21 和 Excel 软件进行试验数据处理,采用简单线性回归方程对基于近景摄影技术在径流冲刷条件下坡面侵蚀产沙量与实测侵蚀产沙量之间的关系进行拟合。

2 结果与分析

2.1 坡面产沙量变化过程分析

2.1.1 产沙量时空变化过程 由图 2 可知,在相同坡度、相同起始解冻深度和不同流量条件下,坡面产沙量随时间变化呈先增大后减小最后趋于稳定的变化趋势,前 7 min 变化比较明显,第 7 min 后各坡段产沙量逐渐趋于稳定,是因为此时坡面侵蚀深度达到未解冻层,沿坡面垂直方向产沙量减少,侵蚀细沟开始向两侧发展,剥蚀泥沙能力减弱,所以产沙量逐渐趋于稳定。



摄影测量测得的产沙量比较结果见表 1。

由表 1 可以看出,冻融坡面冲刷试验后的实测产沙量与近景摄影测量试验方法相比较,得到冲刷后全裸小区坡面微区的摄影测量和实测产沙量变化,通过 12 组试验测得的最大产沙量相差 901.40 g,最小产沙量相差 367.83 g。12 组试验中最大的误差为 17.34%,最小误差为 5.63%,平均误差为 9.33%。12 组试验中,径流冲刷试验造成误差较大的原因可能是与近景摄影测量在采集地形的过程中出现盲区或者径流冲刷试验所造成的坡面冲沟深度较深所致,同时相机的拍摄位置也可能对此产生影响。测量精度方面,最大精度为 94.37%,最小精度为 82.66%,平均精度为 90.67%,这可能与所选用的相机和周边的其他影响

因素有关,例如光照条件和相机位置等。试验结果说明,在进行常规的冻融条件下土壤侵蚀监测方面,近景摄影测量的方法具有一定的可行性。

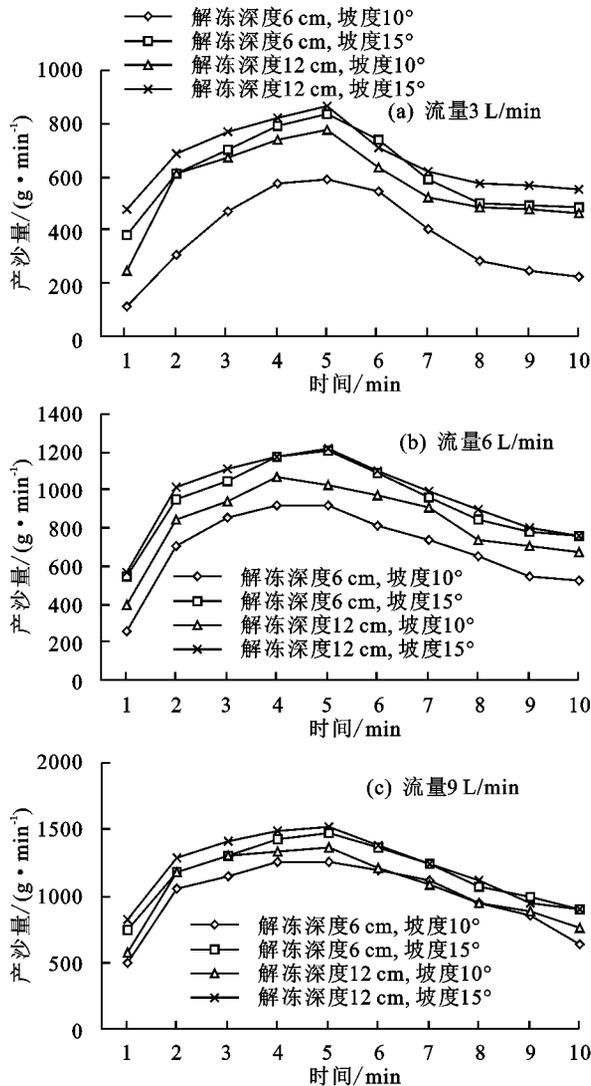


图 3 流量相同时坡面产沙量随解冻深度和坡度的关系
表 1 坡面实测产沙量与近景摄影测量值

坡度/ (°)	流量/ (L·min ⁻¹)	解冻 深度/cm	实测 产沙量/g	摄影 测量/g	误差/ %
10	3	6	4544.8	3756.5	17.34
10	6	6	7550.6	6931.9	8.19
10	9	6	9406.8	9936.2	5.63
10	3	12	4869.0	5629.0	15.61
10	6	12	7746.5	8261.9	6.65
10	9	12	9749.1	10650.5	9.25
15	3	6	5758.9	6126.7	6.39
15	6	6	8650.3	9380.3	8.44
15	9	6	10890.7	11702.0	7.45
15	3	12	5967.9	6652.4	11.47
15	6	12	8957.7	9647.6	7.70
15	9	12	11226.6	12104.5	7.82

2.2 实测土壤侵蚀量与近景摄影技术测量的侵蚀量之间的关系

为深入探索实测土壤侵蚀量与近景摄影技术测量获得的土壤侵蚀量之间的关系,采用线性回归方程

对实测值和计算值进行拟合,具体拟合公式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (4)$$

式中: Y 为近景摄影技术测量获得的坡面侵蚀产沙量(g); X 为实际测量获得的坡面侵蚀产沙量(g)。

$$S_c = 1.28S_s - 564.335 \quad R^2 = 0.965, n = 12 \quad (5)$$

$$ZS_c = 0.983S_s \quad R^2 = 0.997, n = 12 \quad (6)$$

式中: S_c 为近景摄影测量侵蚀产沙量(g); S_s 为实测坡面侵蚀产沙量(g)。拟合方程 p 检验达到 0.01 水平,达极显著水平。公式(6)为消除纲量化后得到的实测坡面侵蚀产沙量与近景摄影测量获得的产沙量之间的关系。

从公式(6)可以发现,实测坡面侵蚀产沙量与近景摄影测量获得的坡面侵蚀产沙量几乎完全呈 1:1 的关系,除了近景摄影测量的结果普遍比实测结果小 564.335 g 外,近景摄影测量值能较好地反映坡面侵蚀产沙的实际情况。对于这多出来的 564.335 g,判断为软件计算产沙时的固定误差,在后续实际应用中只需要根据实际情况,排除该误差即可。

3 结论

(1)起始解冻深度和坡度相同的条件下,冻融坡面的产沙量随流量和坡度的增大而增大;随着时间的推移,产沙量越来越小。

(2)在流量和坡度相同时,随着初始解冻深度的增大,坡面产沙量逐渐增大。在流量和解冻深度相同时,随着坡度的增大,坡面产沙量逐渐增大。当流量、解冻深度和坡度最大时,坡面侵蚀产沙量达最大。

(3)采用近景摄影测量技术,通过近景摄影测量软件得到微区坡面土壤侵蚀前后所造成的微区模拟变化曲面,再通过导出相关矢量文件利用软件进行体积解算,借助于 Auto CAD 3Dcivil 2012 和 Photo Modeler Scanner 6.5 近景摄影测量系统进行试验后的土壤侵蚀体积的测量和计算,最终拟合计算出其产沙量随着试验参数改变的变化情况。采用简单线性回归方程对基于近景摄影技术在径流冲刷条件下坡面侵蚀产沙量与实测侵蚀产沙量之间的关系进行拟合发现,采用一元一次方程能表达测量值与实测值之间的关系。通过对近景摄影技术获得的产沙量测试值可以经过简单的固定误差处理,最终获得准确的坡面侵蚀产沙量。通过近景摄影测量试验方法和常规监测法测得土壤侵蚀产沙量相比较,说明近景摄影测量技术可以在冻融条件下土壤侵蚀监测中进行应用。

参考文献:

- [1] 吴发启. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 14-15.
- [2] 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.

- 进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [5] 夏青, 尚润阳. 植被覆盖对土壤水蚀的影响评价[J]. 海河水利, 2014(2): 52-55.
- [6] 陈奇伯. 林地枯枝落叶层水土保持作用探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 1996(3): 70-72.
- [7] 王一志. 植被与水土流失关系分析[J]. 科学技术创新, 2016(29): 266.
- [8] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 129-137.
- [9] 吴彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(2): 119-124.
- [10] 杨吉华, 王华田, 张光灿, 等. 金银花水土保持效益的研究[J]. 生态学杂志, 1997, 16(3): 35-38.
- [11] 田雪彪, 杨进, 邹坤, 等. 树形金银花生长特性及水土保持功效研究[J]. 水资源开发与管理, 2012, 10(4): 38-40.
- [12] 贺红亮. 金银花护坡性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [13] 班越非. 金银花与矿区绿化[J]. 辽宁林业科技, 2005(3): 60-61.
- [14] 王磊, 焦方仕, 季成善. 山区经济开发的选择: 金银花[J]. 农业科技通讯, 2000(11): 10-11.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [16] 周虎, 吕貽忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [17] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 16-19.
- [18] 张佳琪, 王红, 张瑞芳, 等. 雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 42-45.
- [19] 胡宏祥, 洪天求, 刘路. 水土流失量和养分流失量的预测[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 98-103.
- [20] 高维森. 土壤抗蚀性指标及其适用性初步研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 60-65.
- [21] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 107-111.
- [22] 才业锦. 重庆市水土保持措施效应及小流域治理范式评价[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [23] Mena M M, Deeks L K, Williams A G. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility[J]. Geoderma, 1999, 90(1/2): 87-98.
- [24] 陈诗礼. 试论岩石性质与水土流失的关系[J]. 中国水土保持, 1988(3): 26-31.
- [25] 刘锦春, 马晔, 陶建平, 等. 丛枝菌根真菌对西南岩溶地区干旱及干湿交替下金银花根系生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 110-116.
- [26] 张莉. 延河流域近 50 年植被与水沙变化关系分析[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [27] 乐乐, 何腾兵, 林昌虎, 等. 不同种植年限金银花根区与非根区土壤养分差异性研究[J]. 山地农业生物学报, 2013, 32(3): 229-232.
- [28] 王小云. 土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(23): 106-108.

(上接第 42 页)

- [3] 李占斌, 李社新, 任宗萍, 等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 56-60.
- [4] 刘彦辰, 王瑄, 周丽丽, 等. 冻融坡面土壤剥蚀率主要影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 1-5.
- [5] 尚佰晓, 王莉, 王瑄, 等. 坡面土壤剥蚀率及其与水流含沙量的关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 28-31.
- [6] 王飞超, 任宗萍, 李鹏, 等. 模拟降雨下冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 72-75.
- [7] 王成亮. 基于普通数码影像的近景摄影测量技术研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [8] 张祖勋. 数字摄影测量的发展与展望[J]. 地理信息世界, 2004, 6(3): 1-5.
- [9] 张祖勋, 杨生春, 张剑清, 等. 多基线—数字近景摄影测量[J]. 地理空间信息, 2007, 2(1): 1-4.
- [10] 李振涛, 许妙忠. 数字近景摄影测量在古建筑重建中的应用研究[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(4): 8-10.
- [11] 栾有昆. 基于数码相机的地面摄影测量在水电工程中的应用[J]. 水利水电测绘, 2006(4): 26-27.
- [12] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 近景摄影测量在土壤侵蚀监测中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(6): 80-83.
- [13] 杨建英, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 基于侵蚀针和近景摄影测量的侵蚀速率测定方法试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 90-94.
- [14] 王秀美, 贺跃光, 曾卓乔. 数字化近景摄影测量系统在滑坡监测中的应用[J]. 测绘通报, 2002(2): 28-30.
- [15] Farid E, Masood V, Hamid E. Displacement measurement of the soil nail walls by using close range photogrammetry and introduction of CPDA method [J]. Measurement, 2013, 46(9): 2-5.
- [16] Kerstent, Maashg G. Photogrammetric 3-Dpoint determination for dam monitoring[J]. Optical 3-D Measurement Techniques, 1995, 14(10): 161-168.
- [17] 程效军, 许诚权, 周行泉. 基于 PhotoModeler scanner 的普通数码相机快速检校研究[J]. 遥感信息, 2011(4): 80-84.
- [18] 冯文灏. 近景摄影测量的基本技术提要[J]. 测绘科学, 2000, 12(4): 26-30.
- [19] 冯文灏. 关于近景摄影机检校的几个问题[J]. 测绘通报, 2000(10): 1-3.