

黄河班多水电站工程区荒草地坡面水流 含沙量变化过程试验研究

张孝中¹, 王 莎^{2,3}, 申 楠^{2,3}, 马春艳^{2,3}

(1. 陕西省水土保持勘测规划研究所, 西安 710004; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 荒草地是黄河班多水电站工程区最主要的原生地面类型, 阐明其产流产沙的水流含沙过程可为该工程区水土流失定量评价提供重要依据。采用野外人工放水冲刷试验方法, 研究了黄河班多水电站工程区荒草地坡面水流含沙量变化过程。结果表明: 坡面水流含沙量随时间的变化, 不同供水流量下整体减小, 最后趋于稳定变化的趋势, 可用幂函数方程很好的描述; 不同坡度下也整体呈减小的趋势, 15 min 后趋于平缓稳定变化的状态, 各坡度下变化趋势大体一致, 也可用幂函数方程很好的描述, 与不同供水流量下的主要差异在于产流后 5 min 内含沙量递减速率大于不同供水流量下的, 其后递减速率小于不同供水流量下的; 平均含沙量随供水流量的变化可用抛物线相关方程来描述, 发生变化的临界供水流量值为 7.388 5 L/min, 随坡度的增大而增大, 可用指数方程很好的描述, 随坡度及供水流量的变化可用二元线性方程很好的描述。

关键词: 黄河; 班多水电站; 工程区; 荒草地; 含沙量

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0072-04

Experimental Study on Variations of Sediment Concentration in Water Flow on Waste Grassland in Banduo Hydropower Station Construction Area of Yellow River

ZHANG Xiao-zhong¹, WANG Sha^{2,3}, SHEN Nan^{2,3}, MA Chun-yan^{2,3}

(1. Shaanxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation Survey and Planning, Xi'an 710004, China;
2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Waste grassland is the main primary land type in the construction area of Banduo hydropower station of the Yellow River. Elucidating variations of sediment concentrations in water flow in the processes of runoff and sediment yield may provide an important basis for the quantitative evaluation of soil and water loss in the area. The variations of sediment concentrations over waste grassland were studied by a field scouring experiment conducted in the construction area of Banduo hydropower station of the Yellow River. Results showed that in the case of different added discharges, sediment concentration varies with added water discharge and manifests a trend of the overall decrease and eventual steady state, which can be well described by using a power equation. At different slope degrees, sediment concentration also shows an overall decreasing trend and finally approaches to a steady state in 15 min after water is added. The variations of different slope degrees are basically consistent and can be also well described by using a power equation. Comparatively, a major difference is that the decreased rate of sediment concentration in the case of different slope degrees is greater than that in the case of different discharges 5 min after runoff generated and later on, less than that in the case of different discharges. The variation of the average sediment concentration with added dis-

charge can be well described by using a parabolic equation and the critical discharge for an abrupt change is found to be 7.388 5 L/min. The average sediment concentration increases rapidly with rise of slope degree, which can be well described by an exponential equation. The variation of the average sediment concentration with slope degree and added discharge can be well described by using a dual power equation.

Key words: Yellow River; Banduo hydropower station; construction area; waste grassland; sediment concentration

伴随着改革开放以来经济建设快速的发展,开发建设项目遍地出现、日益增多,但是开发建设过程中进行的大量采挖、堆积、踏压等活动,对土壤和植被的自然过程和自然形态产生了剧烈扰动和破坏,随之又带来了一系列的水土流失问题,引起了各界的广泛关注^[1-3]。在土壤侵蚀过程中水流含沙量不仅是产流、产沙及水沙消长与演变过程的重要指标,也是衡量水土流失的重要参数之一。土壤侵蚀的分离、搬运、沉积过程在很大程度上受到水流含沙量的影响,在径流侵蚀过程中,如果径流含沙量小于径流挟沙力,则发生分离;随着分离不断发生,直到径流含沙量大于径流挟沙力,发生沉积,由此可见,水流含沙量的多少可以决定某一地区的土壤侵蚀严重程度^[4-5]。黄河班多水电站工程是黄河干流上的一项重要的大型水电工程,是重要的、典型的开发建设项目,荒草地是黄河班多水电站工程区的重要地类。阐明黄河班多水电站工程区荒草地坡面水流含水量变化过程可以深入认识该工程区水土流失过程,为科学预测工程区水土流失,设计有效的水土保持措施,编制合理的水土保持方案,以及最终重建该区生态环境提供重要科学依据,同时也可对不同开发建设项目区水土流失过程的研究揭示提供有益的借鉴。

关于径流含沙量的研究,长期以来诸多学者或从理论,或根据小区野外实测资料和实验室资料对其进行了广泛的研究。付艳红等^[6]从测量原理出发,对含沙量各种测量方法的适用环境、测量精度及其局限性进行了比较分析,研究了坡面径流含沙量的测量方法;张欧阳等^[7]认为从低含沙量跃进到高含沙量的过程,会使水流的粘性增大,泥沙沉积速度会降低,最终影响水流的挟沙力变大;雷廷武等^[8]采用室内放水冲刷,利用水流含沙量和沟长的函数关系得到了一种计算含沙水剥蚀率的方法;Abrahams等^[9]认为由于含沙量的增加,用于搬运泥沙的径流动能减少,加之颗粒之间碰撞机会增大,容易形成推移质,降低了颗粒输移速度,使得浑水的速度与含沙量呈负相关;李君兰等^[10]通过室内模拟降雨试验发现径流对坡面存在剥蚀和沉积过量泥沙交替的坡段,在此坡段随坡长的增加不会使含沙量变化,不发生侵蚀。

本文采用野外人工放水冲刷试验方法,对黄河班多水电站工程区原生地面荒草地水流含沙量变化过程进行研究,为工程区水土流失治理决策提供依据,并为工程区原生地面的侵蚀过程研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

黄河班多水电站属于黄河干流龙羊峡以上茨哈至羊曲河段规划的第2个梯级电站,位于青海省海南州兴海县与同德县交界处的班多峡谷出口处,工程区地处内陆高原,属于青藏高原气候系统,表现为冷热两季交替、冷季较长,热量少、降雨少、风沙大,暖季水汽丰富、降雨量相对较多,多年平均降水量为425.2 mm。坝址区占地面积171.89 hm²,两岸地形平缓,阶地发育,其原始地面包括农地、荒草地、河滩地、河滩盖沙地四类,其中,荒草地分布面积最大,荒草地坡面的植被覆盖度均小于30%,地面组成物质为第四纪沉积物,土石混杂,砾石含量高,试验前期土壤含水量为12.5%,土壤容重为1.09 g/cm³。

1.2 试验设计

(1) 试验小区:由1 mm厚的钢板插入地面以下0.15 m围成,钢板高出地面0.10 m,试验小区投影面积4 m×0.5 m;

(2) 试验设备:试验供水系统主要设备包括水泵和溢流箱等。供水系统中,汽车载水箱将从水源地运至试验地,发电机带动水泵将水通过水管抽到溢流箱,供水流量大小通过安装在扬程水管出口的控制阀调节。溢流箱置于小区顶端,并嵌入地面一定深度,使溢流面与小区坡面刚好接触。通过溢流箱对水管出流的消能缓冲等作用,保证流入小区的水流为均匀薄层状水流;

(3) 试验过程与观测:首先进行供水流量的率定,以确保供水流量达到试验设计要求。整个试验过程中,开始产流到试验结束期间,在小区出口处定时收集径流泥沙样进行观测。开始产流时取样一次,产流后的前6 min,分别每隔1 min,2 min,3 min取一次样,以后皆每隔3 min取一次样,试验结束时再取一次。试验结束后,用量筒测定径流泥沙样体积,经

沉淀并用工业酒精烧干后称重测定取样泥沙重量；

(4) 试验场次:同一坡度(22°)、不同供水流量(4,6,8,10,12 L/min)共 5 场,同一供水流量(10 L/min)不同坡度(4°,13°,22°,29°,37°)5 场,每场历时 30 min。

2 结果与分析

2.1 水流含沙量随时间的变化

2.1.1 不同供水流量条件下水流含沙量随时间的变化 将不同供水流量条件下荒草地坡面水流含沙量随时间的动态变化试验数据绘制成图 1,相关分析结果见表 1。从表 1 可以看出,不同供水流量条件下,荒草地坡面水流含沙量随时间的动态变化皆可用幂函数相关方程描述。通过对图 1 进行分析,在相同投影坡长、坡度,不同供水流量条件下,荒草地坡面水流含沙量随时间的变化整体呈减小的趋势。在产流开始的 5 min 内,水流含沙量随时间的变化急剧下降,随后下降缓慢,约 15 min 后趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。

由于产流初期,荒草地自然坡面表层有一些散碎的土粒,这些土粒在产流出现并发生冲刷和搬运时,自然就出现了产流含沙量很高的现象,随着时间的进行,产流增加,而松土减少,必然出现相对水多沙少的现象,产流中侵蚀携带泥沙的含量自然减小,一定时间后由于产流稳定,土石混杂、含石量高的第四纪沉积物中可供产流侵蚀携带的土壤物质也已很少,所以各供水流量下的产流含沙量必然很小、变化平缓、稳定,且差异极小。

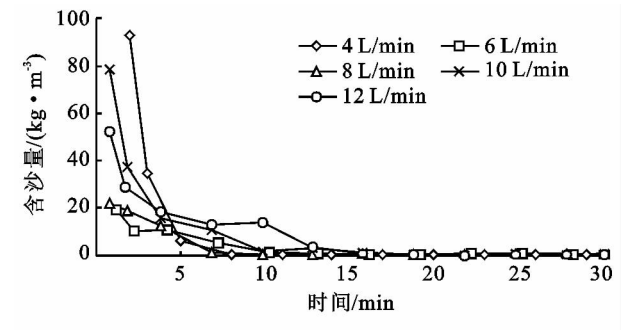


图 1 不同流量下坡面水流含沙量随时间的变化
表 1 不同供水流量下坡面水流含沙量随时间变化的经验方程

投影坡长/cm	坡度/(°)	供水流量/(L·min ⁻¹)	经验方程	相关系数
400	22	4	$G=140.55t^{-2.0042}$	0.89
400	22	6	$G=34.803t^{-1.3353}$	0.94
400	22	8	$G=21.681t^{-1.1737}$	0.91
400	22	10	$G=87.720t^{-1.5051}$	0.97
400	22	12	$G=82.921t^{-1.4913}$	0.90

注:G 为含沙量(kg/m³);t 为时间(min)。

2.1.2 不同坡度条件下水流含沙量随时间的变化 将不同坡度条件下荒草地坡面水流含沙量随时间的动态变化试验数据绘制成图 2,相关分析结果见表 2。从表 2 可以看出,不同坡度条件下,荒草地坡面水流含沙量随时间的动态变化皆可用幂函数相关方程描述。通过对图 2 进行分析,在相同投影坡长、供水流量,不同坡度条件下,荒草地坡面水流含沙量随时间变化整体呈减小的趋势。在产流开始的 5 min 内,水流含沙量随时间变化下降的很快,随后变化基本趋于稳定缓慢下降,也在大约 15 min 后,变化趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。

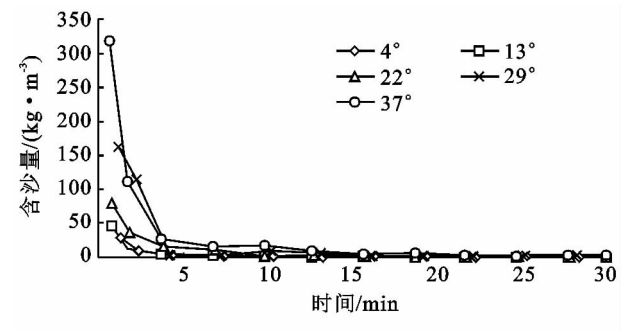


图 2 不同坡度下坡面水流含沙量随时间的变化
表 2 不同坡度下坡面水流含沙量随时间变化的经验方程

投影坡长/cm	供水流量/(L·min ⁻¹)	坡度/(°)	经验方程	相关系数
400	10	4	$G=31.073t^{-1.3182}$	0.92
400	10	13	$G=31.208t^{-1.4262}$	0.98
400	10	22	$G=87.720t^{-1.5051}$	0.97
400	10	29	$G=112.3t^{-1.2803}$	0.85
400	10	37	$G=210.09t^{-1.305}$	0.98

注:G 为含沙量(kg/m³);t 为时间(min)。

不同坡度条件下荒草地坡面水流含沙量随时间的变化与不同供水流量条件下水流含沙量的变化过程具有相似性,都是含沙量随着供水的进行呈先减小后趋于稳定的趋势。主要区别在于不同坡度条件下,水流含沙量随时间在产流后 5 min 内迅速下降,随后下降减缓,直至约 15 min 后趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。而不同供水流量条件下,水流含沙量随时间在产流后 5 min 内也迅速下降,但幅度不及前者,5 min 以后下降也减缓,但要大于前者,并直至约 15 min 后趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。

2.2 供水流量对水流含沙量的影响

将不同供水流量条件下,荒草地坡面次平均水流含沙量随供水流量变化的试验数据绘制成图 3。通过对试验结果进行分析,结果显示,次平均水流含沙量随供水流量的变化可用抛物线相关方程来描述,其经验方程为:

$G=0.3256Q^2-4.8114Q+23.921 \quad (R=0.69) \quad (1)$

式中: G ——次平均水流含沙量(kg/m^3); Q ——供水流量(L/min)。

从图 3 可以看出,荒草地坡面次平均水流含沙量随供水流量的变化存在一个临界值,通过计算得出该值对应的供水流量为 $7.3885 \text{ L}/\text{min}$,供水流量小于 $7.3885 \text{ L}/\text{min}$ 时,次平均含沙量随供水流量的增大而减少,表明沙相对于水减少;供水流量大于 $7.3885 \text{ L}/\text{min}$ 时,次平均含沙量随供水流量的增大而增大,表明沙相对于水增多。

坡面产流侵蚀过程也是水沙变化的消涨过程。供水流量小于临界流量时,坡面产流小,侵蚀能力有限,侵蚀随供水流量增加的增大速率相对小于产流随供水流量增加的增大速率,所以次平均水流含沙量随着供水流量增加而减小;供水流量大于临界流量时,坡面产流大,侵蚀能力强,侵蚀随供水流量增加的增大速率相对大于产流随着供水流量增加的增大速率,所以次平均水流含沙量随着供水流量增加而增大。

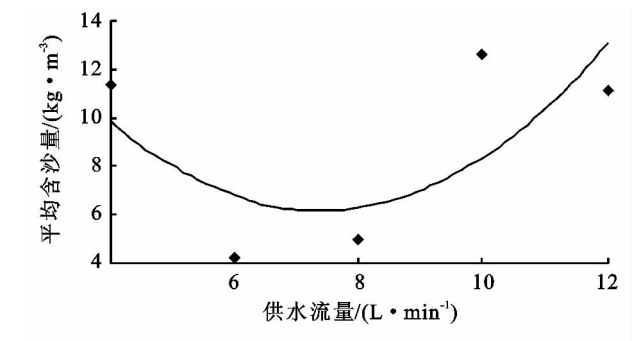


图 3 供水流量对坡面水流含沙量的影响

2.3 坡度对水流含沙量的影响

将不同坡度条件下,荒草地坡面次平均水流含沙量随坡度变化的试验数据绘制成图 4,可以看出,次平均水流含沙量随坡度的增大而增加。通过对试验结果进行相关分析得出,次平均水流含沙量随坡度的变化可用指数相关方程来描述,其经验方程为:

$G=2.6577e^{0.0751S} \quad (R=0.9916) \quad (2)$

式中: G ——次平均水流含沙量(kg/m^3); S ——坡度($^\circ$)。

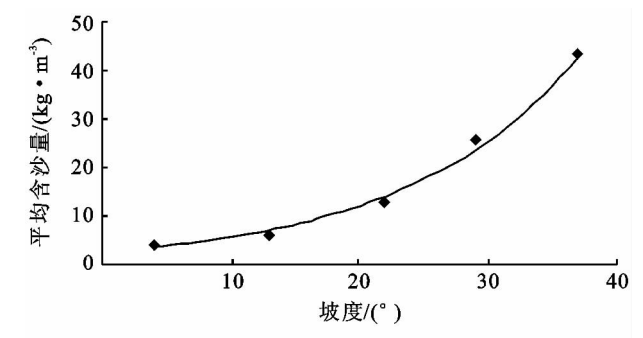


图 4 坡度对坡面水流含沙量的影响

随着坡度的增大,坡面产流量增大,但增大的产流其侵蚀能力增强,而坡度增大后,土体的稳定性下降,土壤的抗侵蚀性减弱,结果侵蚀强度也增大。由于坡度对侵蚀的双重增大作用,使坡面侵蚀随坡度的增大速率相对大于坡面产流随坡度的增大速率,因此,次平均水流含沙量随坡度的增大就必然增加。

2.4 供水流量及坡度对水流含沙量的影响

通过对不同供水流量、坡度条件下,水流含沙量的全部试验观测数据进行多元回归分析,得出二因子综合作用描述方程为:

$G=-23.673+1.1543S+1.3896Q \quad (R=0.8474; F=8.9186>F_{0.025}(2,7)\approx 6.54) \quad (3)$

式中: G ——次平均水流含沙量(kg/m^3); S ——坡度($^\circ$); Q ——供水流量(L/min)。

模拟与检验结果表明,荒草地坡面次平均水流含沙量随坡度、供水流量的动态变化可用二元线性方程描述。式(3)表明,供水流量与坡度两个因子对次平均水流含沙量的影响基本相当,供水流量的影响稍大于坡度。

3 结论

(1) 不同供水流量与不同坡度下,荒草地坡面水流含沙量随时间的动态变化皆可用幂函数相关方程描述,含沙量随时间的变化整体呈减小后趋于稳定的趋势。

(2) 不同坡度下荒草地坡面水流含沙量随时间的变化与不同供水流量下水流含沙量的变化过程主要区别在于:不同坡度下,水流含沙量随时间在产流后 5 min 内迅速下降,随后下降减缓,直至约 15 min 后趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。而不同供水流量下,水流含沙量随时间在产流后 5 min 内也迅速下降,但幅度不及前者, 5 min 以后下降也减缓,但要大于前者,并直至约 15 min 后趋于平缓、稳定,且各供水流量下差异极小。

(3) 不同供水流量下,荒草地坡面次平均水流含沙量随供水流量的变化可用抛物线相关方程来描述,其变化存在一个临界供水流量 $7.3885 \text{ L}/\text{min}$;不同坡度下,坡面次平均水流含沙量随坡度的增大而增加,可用指数相关方程来描述;坡面水流含沙量随坡度、供水流量的动态变化可用二元线性方程很好地描述。供水流量与坡度对坡面水流含沙量的影响基本相当。

参考文献:

- [1] 孙厚才,赵永军. 我过开发建设项目水土保持现状及发展趋势[J]. 中国水土保持,2007(1):50-52.

[2] 曹月娥,塔西甫拉提·特依拜,王新军,等. 县级土地利用结构优化研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(7): 1339-1346.

[3] 胡雪丽,徐凌,张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1652-1660.

[4] Doyen É, Vannière B, Berger J F, et al. Land-use changes and environmental dynamics in the upper Rhone valley since Neolithic times inferred from sediments in Lac Moras[J]. The Holocene, 2013, 23(7): 961-973.

[5] 汤洁,汪雪格,李昭阳,等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用景观格局变化趋势预测[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(2): 405-411.

[6] Iacono M, Levinson D, El-Geneidy A. Models of transportation and land use change: a guide to the territory [J]. Journal of Planning Literature, 2008, 22(4): 323-340.

[7] 唐嘉琪,石培基. 民勤土地利用格局时空变化研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 928-936.

[8] 陈颖彪,李雁,千庆兰,等. 基于 TM 数据的广州市番禺区土地覆被格局分析[J]. 地理科学, 2012, 32(4): 458-463.

[9] 段峥,宋现锋,石敏俊. 密云县土地利用景观格局时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 55-59.

[10] 刘家福,王平,李京,等. 基于 Markov 模型的长岭县土地利用时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 16-19.

[11] Holzkamper A, Seppelt R. A generic tool for optimising land-use patterns and landscape structures [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(12): 1801-1804.

[12] 庞莎,刘康. 基于 GIS 的延安市城郊区土地利用格局优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 230-234.

[13] 贾科利,姚玉玲,郭占军,等. 生态脆弱区土地利用格局变化及其环境效应:以宁夏回族自治区中部干旱带为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 218-222.

[14] 梁烨,刘学录,汪丽. 基于灰色多目标线性规划的庄浪县土地利用结构优化研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(3): 93-98.

[15] 张鸿辉,曾永年,刘慧敏. 多目标土地利用空间优化配置模型及其应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(4): 1056-1065.

[16] 赵东娟,齐伟,赵胜亭,等. 基于 GIS 的山区县域土地利用格局优化研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 101-106.

[17] 张旭. 基于 CA-MARKOV 模型的甘南州土地利用预测研究[D]. 兰州:兰州大学, 2012.

[18] 黎夏,杨青生,刘小平. 基于 CA 的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(9): 1242-1251.

[19] 张鸿辉,曾永年,谭荣,等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 972-984.

[20] 李娜,董立国,刘长宁,等. 黄土丘陵区土地利用格局与生态系统服务价值分析:以中庄流域为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 144-147.

[21] 王丽萍,金晓斌,杜心栋,等. 基于灰色模型一元胞自动机模型的佛山市土地利用情景模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 237-242.

[22] 缪丽娟,刘强,何斌,等. 库尔勒城市化进程对土地利用格局变化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 162-168.

.....

(上接第 75 页)

[2] 焦居仁. 开发建设项目水土保持[M]. 北京:中国法制出版社, 1998.

[3] 甘枝茂,孙虎,甘锐. 黄土高原地区城市化对侵蚀环境的负面影响及防治对策[J]. 西北大学学报, 1999, 29(4): 348-352.

[4] Lei T, Nearing M A, Haghighi K, et al. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model[J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.

[5] 雷廷武,张晴雯,赵军,等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-481.

[6] 付艳红,时铁彬,徐岩. 含沙量测量方法及比较分析[J]. 东北水利水电, 2010(9): 35-36, 45.

[7] 张欧阳,马怀宝,张红武等. 不同含沙量水流对河床形态调整影响的实验研究[J]. 2005, 16(1): 1-5.

[8] 雷廷武,张晴雯,赵军. 陡坡细沟含沙水流冲刷率的试验研究及其计算方法[J]. 2001, 17(5): 24-27.

[9] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow[J]. Water Resources Research, 1993, 29(9): 3021-3028.

[10] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 坡面水流速度与坡面含沙量得关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-77.