

坡面薄层水流的流速分布特征分析^{*}

安翼，刘青泉

(中国科学院力学研究所环境力学重点实验室，北京，100190，Email: qqliu@imech.ac.cn)

摘要：坡面薄层水流水深浅，受地表形态的影响显著，其流动过程十分复杂。通过分析现有实验数据，使用反问题分析方法，重点探讨薄层水流的断面流速分布特征，得到了黏性力主导条件下，光滑或中小粗糙度坡面上的薄层水流速度分布特征规律，并比较了其与明渠流速分布对数律的异同。

关键词：薄层水流；流速分布；光滑床面；粗糙床面；对数分布律

1 引言

薄层水流通常指坡面上水深仅为毫米~厘米量级的流动过程，是一种自然界普遍存在的流动现象。最常见的是在自然降雨过程中，当降雨超过土壤的入渗能力或者超过土壤的持水能力时就会产生积水，并在重力作用下形成薄层水流，是流域产流和土壤侵蚀的根本原因和动力。同时，由于这类流动的水深很浅，受地表形态的影响显著，其流动过程十分复杂。长期以来，许多学者对薄层水流的流态、阻力、描述方法等进行了大量的研究，但由于受到观测手段的限制，对该类流动特性的认识仍很不完善，一直是学术界十分关注的科学问题之一。

由于坡面薄层水流运动的复杂性，该问题尚缺乏完整的理论描述，相关实验工作的条件也千差万别，经常得到不同的结论。以阻力问题为例，Emmett^[1]在较光滑的坡面上观测到阻力与 Re 数负相关，然而 Abrahams^[2]在不同的场地实验中分别观测到了阻力与 Re 数的正相关和负相关关系，张科利^[3]发现坡度也会影响两者的相关性；可以说这些争议往往是由于不同条件下薄层流动的主导机制不同而导致的，安翼^[4]等人指出，微地貌对薄层水流流态有着较大的影响（图 1），不同的淹没条件决定着不同的宏观流态和阻力构成，并建议使用水深与微地貌高度的比值作为区分标准，将不同微地貌与水深的工况分为六个区：水力光滑区、水力粗糙区、淹没粗糙区、未完全淹没区、少部淹没区和附面区分别讨论。

显然，将薄层流动分区域考虑并加以实验数据验证，有可能充实坡面流动的基础理论。

^{*} 国家杰出青年科学基金(No. 10825211)资助。

因此, 本研究将通过分析现有实验数据, 探讨在黏性力主导的条件下, 光滑或中小粗糙度坡面上薄层水流的断面速度分布特征。是否与明渠水流中得到的规律有所不同? 如借用明渠水流公式, 其有效范围有多大? 由于有关该类流动的实验比较困难, 直接的流速分布观测资料十分缺乏, 限制了人们对该问题的认识。在收集国内外相关实验资料基础上, 一方面, 通过细致分析光滑床面薄层水流的流动观测资料, 得到了其流速分布的基本特征; 另一方面, 考虑到观测资料非常缺乏的现状, 采用反问题分析方法, 在假定其分布规律的基础上, 通过预测流量与实际流量对比, 检验了光滑床面和中小粗糙床面上薄层水流的流速分布规律。

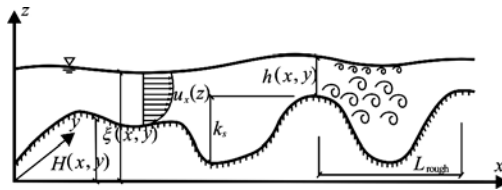


图 1 复杂粗糙条件下坡面薄层水流示意图

2 光滑斜面上的薄层水流

考虑最简单的情况, 即光滑斜面上的薄层水流流动问题。速度分布表征了流动的阻力, 同时也能部分地反映流态, 对于水深较大的明渠水流, 对数律速度剖面已经得到了大量的数据支持。对数律速度剖面包括粘性底层、过渡区和对数区三部分, 其中明渠流中对数区占支配地位, 其形式为:

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu_\tau}{\nu} + C \quad (1)$$

其中 u_τ 是剪切流速, κ 是卡门常数。

理论上, 在只考虑重力和粘性作用的情况下, 薄层水流的流速分布也应符合类似的在对数律, 但由于薄层水流速度测量的困难性, 对上述猜想的直接实验验证非常匮乏。Lu 等人^[5]在缓坡 (<0.3%)、较大水深 (4~10mm) 条件下通过 FLDV 激光多普勒测速设备测量了有降雨和无降雨条件下坡面流的平均速度剖面和脉动流速, 更陡的坡度、更小水深条件下的直接速度测量尚未见到。本研究使用 Lu 测量的坡度 0.3%、水深 10mm、 $Re = 2652$ 条件下的数据进行分析, 检验其与标准对数律之间的关系。比较结果见图 2, 从图 2 中可以看出, 速度剖面基本上符合对数律中的线性底层、过渡区、对数区的形态, 但过渡区比明渠水流中大得多。

事实上更多大范围的实验数据记录了坡度、水深、流速、流量等宏观信息, 通过这些数据也可以佐证光滑坡面薄层水流流速分布符合对数律的猜想。本文将根据实验数据按照对数律预测其流量, 并与实测流量加以对比, 以检验上述猜想。这个比较中使用了 Lu 等人^[5] ($S \sim [0.1, 0.3]\%$ 、 $h \sim [4, 10]\text{mm}$ 、 $Re \sim [218, 2652]$), 以及敬向锋^[6] ($S \sim [0.5\%, 15^\circ]$ 、 $h \sim [1.24,$

22.24]mm、 $Re \sim [354, 13042]$) 的数据, 比较的结果如图 3 所示, 可以看出对数律预测的流量值与实测值相关性较好, R^2 达到 0.972, 斜率 1.02, 这从侧面佐证了光滑斜面薄层水流流速整体上符合对数律。需要指出的是, 上述数据中在层流区域的数据较少(左下 6 个数据), 且预测值与实测值偏离略大, 以光滑斜面层流分布预测也不理想, 坡面薄层水流流速分布在层流区如何描述尚存疑问。

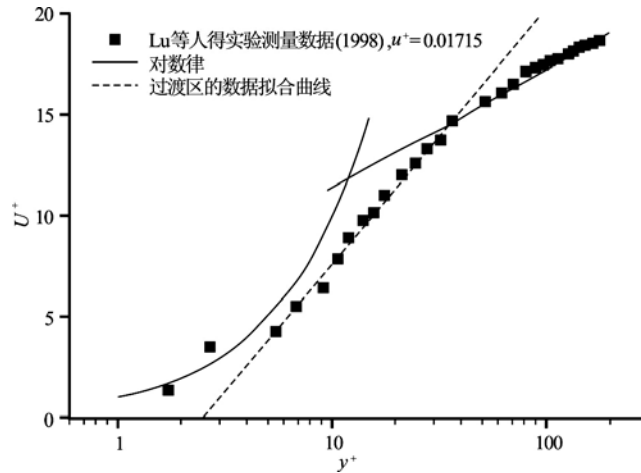


图 2 光滑斜面上薄层水流断面流速分布规律 ($S=0.3\%$, $h=10\text{mm}$)

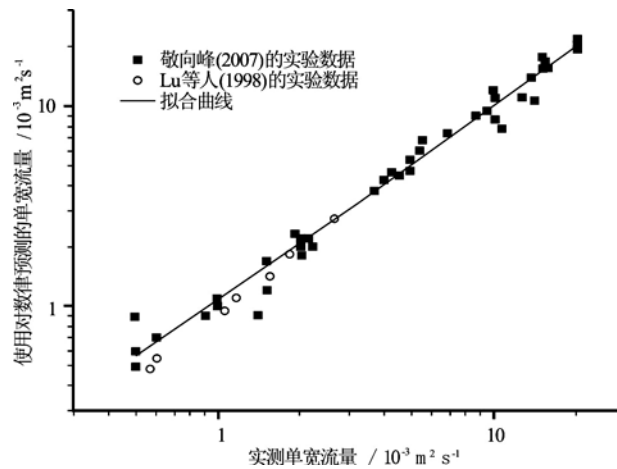


图 3 光滑斜面上薄层水流实测流量与对数律预测流量的比较

3 粗糙坡面上薄层水流

考虑粗糙斜面上的薄层水流流动问题。粗糙坡面上的薄层水流流动与壁面粗糙参数密切相关。对于明渠水流, 在粗糙高度相比水深较小时, 无量纲的流速 u^+ 通常满足以水深与粗糙高度之比 h/k_s 为无量纲长度的对数律分布, 即:

$$\frac{u}{u_\tau} = B \ln \frac{y}{k_s} + C \quad (2)$$

式中各参数含义同前。随着 k_s/h 的增加，不同断面流速分布逐渐显现出较大的差异，特征流速剖面的定义也变得困难，同时参数 B 和 C 也逐渐受粗糙 k_s 的影响。与光滑斜面相似，目前尚未见到 mm 量级的直接速度剖面测量结果，Ancy 等人^[7]在较大单宽流量（约 8L/ms）、缓坡（5.7°）、大水深（12mm）条件下测量了水流速度剖面，所得流速剖面基本符合上述对数律，其结果可作为参考。同时也有很多记录了宏观量的实验数据，可以使用与光滑斜面类似的方法来检验在粗糙坡面上应用对数律的合理性。对式(2)进行积分即可得流量 q ：

$$q = \int_{k_s}^h u_\tau \left(B \ln \frac{y}{k_s} + C \right) dy = \sqrt{ghS_f} \left[(C - B)(h - k_s) + Bh \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \right] \quad (3)$$

式中各项参数意义同前。

实验数据来自于张光辉等^[8]、敬向锋^[6]的实验，其中张光辉的数据中并未提供地表粗糙特征，但称多组数据均在相似的地表粗糙条件下得到，本研究对不同的 k_s 进行计算，选定吻合最好的 k_s 。张光辉数据的对数律预测值与实测值的比较如图 4 所示。

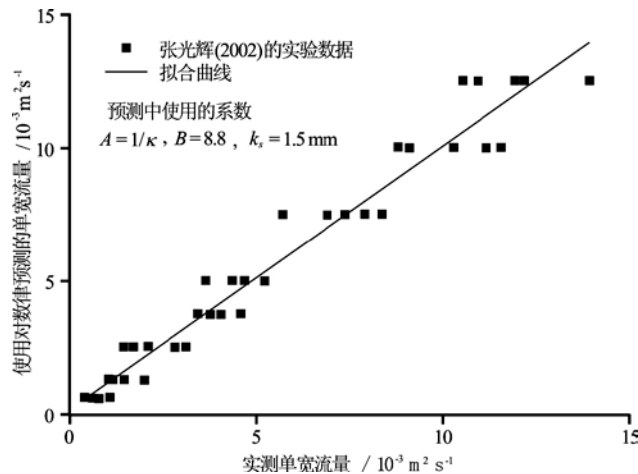


图 4 粗糙坡面上薄层水流实测流量与对数律预测流量的比较（张光辉数据）

敬向锋数据的对数律的预测值与实测值的比较如图 5 所示；b, c, d 三张图数据比 a 数据少，一方面是因为原始数据就少，另一方面是由于很多情况下水深小于地表粗糙而无法套用对数律。从两张图中可以看出在粗糙高度相比水深较小时，对数律所预测的流量和实测值吻合的很好，当粗糙高度逐渐增加接近水深时，对数律预测的流量逐渐偏离实验点，这是非粘性阻力（如兴波阻力）逐渐替代黏性阻力占据主导因素的一个表现，其临界值大约出现在粗糙高度为平均水深的 1/3~1/2 附近。

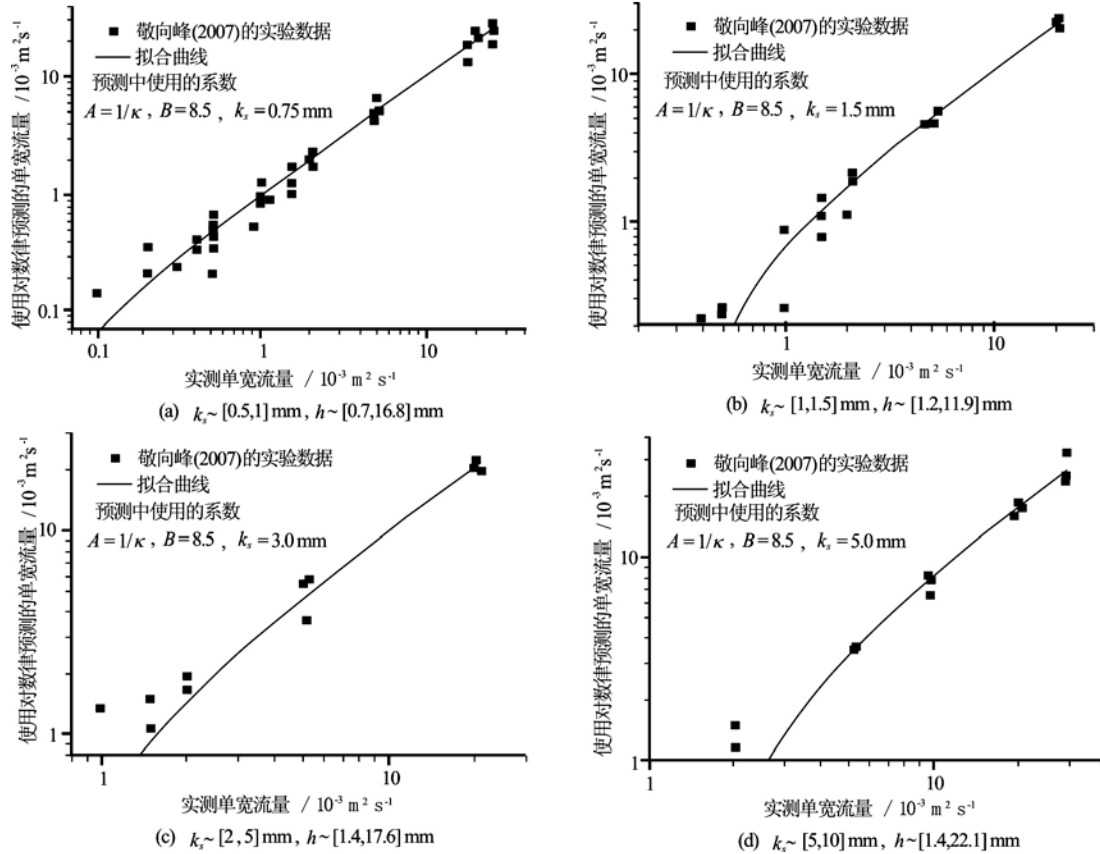


图 5 粗糙坡面上薄层水流实测流量与对数律预测流量的比较（敬向锋数据）

4 结论

针对坡面薄层水流，通过分析前人的实验成果，发现坡面薄层水流在黏性力主导时，总体上其流速分布特征与明渠水流相近，在一定范围内可以使用对数律描述，粗糙条件下对数律的有效范围大约在粗糙水深比小于 $1/3 \sim 1/2$ 附近。具体的，光滑床面上薄层水流的速度剖面基本上符合对数律中的线性底层、过渡区、对数区的形态，但过渡区比明渠水流中大得多。而对于粗糙床面，在粗糙高度相比水深较小时，对数律所预测的流量和实测值吻合的很好，说明流速分布近似符合对数律；而当粗糙高度逐渐增加接近水深时，对数律预测的流量逐渐偏离实验点，说明流速分布随着粗糙高度的增加逐渐偏离对数律，这正是粗糙床面复杂阻力构成规律的一个重要表现。

参 考 文 献

1. Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslopes. Washington: U.S. Govt. Print. Off. 1970. 68.
2. Abrahams A D, Parsons A J. Hydraulics of interrill overland-flow on stone-covered desert surfaces. CATENA, 1994, 23(1-2): 111-140.
3. 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究. 人民黄河, 1998(8):13-16 .
4. 安翼. 坡面水蚀中的水动力特性及侵蚀模型研究. 中国科学院力学研究所, 博士学位论文, 2011.
5. Lu J Y, Chen J Y, Chang F H et al. Characteristics of shallow rain-impacted flow over smooth bed. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 1998, 124(12): 1242-1252.
6. 敬向锋. 坡面薄层流水动力学规律的试验研究. 西北农林科技大学, 硕士学位论文, 2007.
7. Ancey C, Bigillon F, Frey P et al. Rolling motion of a bead in a rapid water stream. PHYSICAL REVIEW E, 2003, 67(0113031Part 1).
8. 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002 (2):159-165.

Analysis on the characteristics of velocity distribution of shallow overland-flow on rough surface slopes

AN Yi, LIU Qing-quan

(Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.

Email: qqliu@imech.ac.cn)

Abstract: The overland sheet flow, of which water depth is comparable with slope microrelief, is so complex that its foundation of flow characteristics has not been well established. In this paper, the velocity profile characteristics of the sheet flow are carefully examined with inverse problem method based on collected experimental data. The logarithmic velocity distribution law from open channel flow is found also works in some extent for sheet flow on smooth or low-roughness slopes, in which occasion the viscous stress dominates the flow. The deference between velocity distribution laws of the sheet flow and open channel is also analyzed.

Key words: Shallow overland-flow; velocity distribution; Smooth bed; Rough bed; Logarithmic distribution