

# 坡面流阻力研究进展

梁博, 张升堂, 宋词, 冯正

(山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 主要从坡面流流态对坡面流阻力的影响、坡面流阻力与雷诺数的关系、降雨对坡面流阻力的影响、坡面流阻力公式4个方面对前人关于坡面流阻力的研究成果进行了总结。结果表明:坡面流流态的不确定性导致了坡面流阻力变化更为复杂;坡面流阻力与雷诺数之间并无良好单一的相关关系;降雨对坡面流阻力有很大的影响作用但具体影响机理并未有明确的结论;坡面流阻力公式表征仍用明渠水流概念及表达方式,并且3个阻力系数 $n$ 、 $f$ 、 $C$ 哪个更适合表征坡面流阻力尚无统一的结论。进而对目前存在的问题进行了分析,对今后的发展进行了展望,认为需在研究方法和实验设备及量测技术方面有所突破,才可以更好的对坡面流阻力进行全面系统的研究。

**关键词:** 坡面流; 坡面流阻力; 流态; 雷诺数

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0055-05

## Progress on resistance study of overland flow

LIANG Bo, ZHANG Shengtang, SONG Ci, FENG Zheng

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The predecessors' research results about the overland flow resistance are summarized from the following four aspects that the influence of overland flow resistance on slope surface flow pattern, the relationship between overland flow resistance and Reynolds number, the influence of rainfall on slope surface flow resistance, and overland flow resistance formula characterization. The result indicated that the uncertainty of slope surface flow pattern led to the more complicated change of overland flow resistance; there is no single good correlation between the overland flow resistance and Reynolds number; rainfall has a great influence on slope surface flow resistance but the specific influence mechanism is not clear; open channel flow concept and expression are still used in characterization of overland flow resistance formula, and there is no unified conclusion that which is more suitable for characterization of overland flow resistance of three resistance coefficients  $n$ ,  $f$ ,  $C$ . The paper analyzed the existing problems and prospect the future development as well. In order to study the overland flow resistance in a more comprehensive and systematic way, it is necessary for us to make a breakthrough in research method, experiment equipment and measurement technology.

**Key words:** overland flow; overland flow resistance; flow pattern; Reynolds number

## 1 研究背景

坡面流阻力是研究坡面流水动力学特性的核心问题,它反映了下垫面对流动水体的阻力大小,是掌握坡面流侵蚀过程的基础,也是坡面流模拟时不可或缺的一个重要参数。然而由于自然流域中坡面坡度较大,重力作用更为突出,并且坡面水流水深很浅,受地表特征影响更为显著,因此坡面流阻力受地形地貌特征、土壤质地、植被覆盖以及降雨等条件的影

响,其特性复杂多变,在理论上很难描述和模拟。

坡面流阻力对地表径流的流速、渗透、土壤侵蚀等都具有很大的影响作用,研究坡面流阻力的变化规律对于估算洪峰流量以及水土保持措施决策等都具有重要意义。近几十年以来,关于坡面流阻力的研究主要在室内或室外通过放水、模拟降雨等实验方法进行,国内外诸多学者从不同的角度对坡面流阻力进行了实验研究,并且取得了一定的成果,出了很多结论。但是由于研究者的出发点、实验条件、

收稿日期:2014-04-14; 修回日期:2014-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(40971021)

作者简介:梁博(1990-),男,山东鄄城人,硕士研究生,研究方向:水文水资源。

通讯作者:张升堂(1970-),男,陕西凤翔人,副教授,主要从事水文水资源方面研究。

测量方法等方面的不同,使其得出的结论也不尽相同,甚至有的完全相反,并未形成统一的认识。因此本文总结了这方面的研究成果,找出存在的主要问题,并探讨解决的方法,以期对将来在该方面的研究提供指导作用。

## 2 研究进展

### 2.1 流态对坡面流阻力影响及研究进展

坡面流流态直接关系到坡面水流的阻力特性,是表征坡面水流水动力学特征的基本参数之一。由于坡面流属薄层水流范畴,受降雨影响显著,且边界条件复杂,致使坡面流流态也非常复杂。不同的流态下使同一流量具有不同的水深及流速,从而使得坡面流阻力变的复杂难以确定。因此研究坡面流流态特征及其变化规律对于研究坡面流阻力具有重要的指导意义。

目前关于坡面流流态的研究已有很多,但得出的结论不尽相同,对其认识一直存在较多不同的意见。Woolhiser<sup>[1]</sup>等用运动波模型通过对牧场小流域的多次暴雨资料分析表明,层流可能是坡面流的主要流态。吴普特<sup>[2]</sup>认为坡面流虽然受到降雨和坡面糙率的扰动,但仍属层流范畴,与明渠水流的层流存在差异,并将其定义为“扰动层流”(disturbed flow)。姚文艺<sup>[3]</sup>则通过人工降雨试验研究表明,坡面径流存在层流、紊流和过渡流三种流区,并认为在降雨条件下的层流是一种“伪层流”,即雨滴扰动使水质点有局部混掺现象,但整体水流仍处于层流状态。雷俊山等<sup>[4]</sup>通过微型小区冲刷试验,表明坡面薄层水流的雷诺数均小于300,水流属于层流区。潘成忠等<sup>[5]</sup>通过上方来水和模拟降雨相结合的方法,发现坡面薄层水流如按传统雷诺数判定准则,应该属于层流区。张光辉<sup>[6]</sup>认为坡面薄层水流很少以层流流态出现,坡面流流态为以过渡流为主,紊流为辅的交替状态。贾婵娟等<sup>[7]</sup>通过实验研究结果表明坡面薄层水流基本属于紊流,在试验过程中没有出现层流。敬向锋等<sup>[8]</sup>通过研究分析发现,无论用传统水力学雷诺数还是绕流雷诺数,在其所做的试验中,水流流态大部分属于过渡流。

目前关于坡面流究竟属于何种流态仍未有统一的定论,但是坡面流流态与坡面流阻力之间存在影响关系是毋庸置疑的。张光辉<sup>[6]</sup>通过实验得出Darcy-Weisbach阻力系数与水流流态密切相关。张宽地等<sup>[9]</sup>通过对不同粗糙尺度床面和不同坡度下坡面薄层水流放水进行试验,对薄层水流阻力规律与明渠水

流阻力规律进行了比较分析,提出了粘性底层厚度与水深之比作为新的无量纲临界判数,结果表明该判数能更好的反映坡面薄层水流的流动型态。翟艳宾等<sup>[10]</sup>认为薄层水流流态与流量、坡度、糙率等有关,但是流量和糙率对流态影响比较显著。

### 2.2 雷诺数与坡面流阻力关系

雷诺数为水流的惯性力与黏滞力之比,不仅是用来判别水流流态的重要指标,许多学者认为坡面流阻力主要与坡面雷诺数有关,阻力系数可以表示为:

$$f = \frac{K}{Re} \quad (1)$$

式中: $f$ 为坡面阻力系数;在层流流态时, $K$ 为常数( $K = 24$ ),对于紊流和过渡流, $K$ 为与流态和地表条件有关的参数; $Re$ 为坡面流雷诺数。

Abrahams<sup>[11]</sup>于1994年深入研究了亚利桑那州南部有草地覆盖和灌木丛覆盖的山坡坡面流阻力特征,其研究结果表明在草地覆盖的山坡上 $f-Re$ 的关系呈正相关,而在灌木丛覆盖的山坡上 $f-Re$ 的关系呈负相关。Roche N等<sup>[12]</sup>研究了部分淹没情况下的粗糙面上地表径流流态、水头损失、流速、佛罗德数、雷诺数等之间关系。Hessel R等<sup>[13]</sup>在黄土高原野外实验显示Manning糙率系数 $n$ 可以像Darcy-Weisbach阻力系数 $f$ 一样由雷诺数估计。Tartard L等<sup>[14]</sup>等研究了坡面流阻力与其他水力要素的关系,显示坡面流阻力明显地随雷诺数的增加而减小。张科利<sup>[15]</sup>分别在坡度为 $6^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $12^\circ$ 和 $15^\circ$ 的实验条件下研究发现 $f-Re$ 的关系存在临界坡度的问题,在缓坡下二者呈负相关,陡坡下呈正相关,其转折大约发生在坡度 $10^\circ \sim 12^\circ$ 之间。吴宏平等<sup>[16]</sup>通过试验研究认为坡面流基本表现出层流的特性,阻力系数与传统水力学雷诺数之间的关系在进入层流区后表现为线性关系。闫旭峰等<sup>[17]</sup>通过试验研究得出由于植被阻水及水流混掺效应,Darcy-Weisbach阻力系数基本随雷诺数增大而增大。丁文峰等<sup>[18]</sup>通过放水冲刷实验研究得出坡面流阻力系数的大小与水流雷诺数有关,但其变化趋势受坡度的影响。在坡度较缓时,阻力系数随雷诺数的增大而减小;在坡度较大时,阻力系数随雷诺数的增大而增大。张光辉<sup>[6]</sup>通过变坡实验水槽研究了坡面薄层水流水动力学特性,结果表明随着雷诺数的增大,阻力系数呈良好的幂函数形式减小。王文龙等<sup>[19]</sup>根据人工模拟降雨实验,研究了黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀水动力过程。结果表明阻力系数是雷诺数的减函数,它随着雷诺数的增大有减小的趋势,在不同的

坡度和雨强条件下,递减的速率有所不同。

### 2.3 降雨对坡面流阻力影响

许多学者研究了降雨对坡面流阻力的影响,认为在降雨过程中,雨滴打击将会扰动坡面水流,进而影响坡面流阻力。因此在坡面流阻力研究过程中,降雨对坡面流阻力的影响也是一个不可或缺的研究重点。

Yang<sup>[20]</sup>和 Shen 等<sup>[21]</sup>根据试验资料,以降雨强度为参数,研究 Darcy - Weisbach 阻力系数与雷诺数的关系。结果表明,当雷诺数小于 2000 时,薄层水流阻力系数随雨强的增大而增大;当雷诺数大于 2000 时,降雨的影响基本可忽略不计。Savat<sup>[22]</sup>模拟降雨的水槽实验研究表明,层流情况下,降雨阻力占了坡面流阻力的 20%。姚文艺等<sup>[3]</sup>在分析坡面阻力规律时发现:坡面流阻力与雷诺数、坡度、降雨和地表的粗糙度密切相关,并得到了降雨影响下的不同雷诺数范围内的阻力系数关系式。陈国祥等<sup>[23]</sup>研究了降雨强度分别为 1.05、1.30 和 2.4 mm/min 的 3 种降雨对浅层水流阻力的影响,研究表明降雨可使浅层水流的阻力系数增大,而且降雨强度并不是影响水流阻力的独立因素,床面越光滑,降雨增加的阻力越大,并且当坡度大于某个值时,降雨的增阻作用相对较小。梅欣佩<sup>[24]</sup>研究了雨滴打击强度对坡面薄层水流阻力的影响,水槽试验结果表明阻力系数随雨滴打击强度的增加而增加,土槽试验结果表明阻力系数随雨滴打击强度的增加而降低。潘成忠等<sup>[5]</sup>研究了降雨和坡度(2.6% ~ 25.9%)对坡面流阻力系数的影响,结果表明坡度增大,阻力系数减小,且降雨对阻力系数无显著影响。肖培青等<sup>[25]</sup>利用变坡度坡沟系统概化模型和人工模拟降雨试验,分析了不同降雨强度下坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征,结果表明坡沟系统不同断面的阻力系数随降雨强度的增大呈减小的趋势。张小娜等<sup>[26]</sup>等通过实验研究表明随着降雨强度的增大,阻力系数和曼宁糙率均呈现先增大后减小的趋势。

### 2.4 坡面流阻力公式表征

坡面流阻力是反映坡面流水力学特性的重要参数,通过诸多学者的实验研究可以看出,坡面流阻力由于受土壤类型、植被覆盖、床面粗糙度及降雨等众多因素的影响,其特性并不同于传统明渠水流阻力,在理论上很难模拟和描述。然而在目前的坡面流研究中,为了解决实际问题,作为一种近似计算,仍用

明渠的阻力概念和表达式,即:  $\frac{\tau}{\rho v} = \frac{f}{8} = \frac{g}{C^2} = \frac{gn^2}{y^{1/3}}$

式中:  $f$  为 Darcy - Weibach 阻力系数;  $C$  为 Chezy 系数;  $n$  为 Manning 糙率系数。

由于 Darcy - Weibach 阻力系数公式表达具有良好的物理意义,且符合量纲一致的原则,因此在目前被广泛应用。其公式表达式为:

$$f = \frac{8ghs}{v^2} \quad (2)$$

式中:  $v$  为坡面水流流速, m/s;  $h$  为坡面水流水深, m;  $s$  为坡面水流能坡;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

目前对于坡面流阻力系数的确定,国内外诸多学者或是通过实验资料、或是通过经验回归分析,将其与降雨的因子结合起来,得出了许多经验公式。Sadeghian 等<sup>[27]</sup>于 1990 年由野外小区试验资料给出了一个考虑粗糙床面的阻力公式:

$$f = 298.18 \frac{(V_*/V)^{2.24} (q/I \cdot L_z)^{0.9}}{(h/GRI)^{0.75}} \quad (3)$$

式中:  $V_*$ ,  $V$  分别为剪切流速和平均流速, m/s;  $q$  为单宽流量, m<sup>2</sup>/s;  $I$  为雨强, mm/min;  $L_z$  为水流方向的降雨强度, mm/min;  $h$  为水深, m;  $GRI$  为颗粒糙度, 与水深  $h$  单位相同, m。

Shen 等<sup>[21]</sup>通过试验进一步验证了 Yong 等<sup>[20]</sup>的结论,并把  $Re < 900$  时的 Darcy - Weibach 阻力系数  $f$  表示为无降雨下的阻力系数  $f_0$  与降雨增加的阻力系数  $f_R$  之和,即

$$f = f_0 + f_R \quad (4)$$

通过回归分析得到:

$$f_R = \frac{27.162I^{0.407}}{Re} \quad (5)$$

$f_0$  取用光滑矩形水槽层流的表达式:

$$f_0 = \frac{24}{Re} \quad (6)$$

$Re > 2000$  时,阻力系数表示为:

$$f = 1.048f_0 \quad (7)$$

$900 > Re > 2000$  时,作为近似估算,Shen 采用内插的方法得到:

$$f = 0.0392 \left( \frac{Re}{2000} \right)^{-1.251 \ln(0.68 + 0.77I^{0.407})} \quad (8)$$

式中:  $f$  为 Darcy - Weibach 阻力系数;  $f_0$  为无降雨下的阻力系数;  $f_R$  为降雨增加的阻力系数;  $I$  为雨强, mm/min;  $Re$  为雷诺数。

姚文艺<sup>[3]</sup>对坡面浅层水流的阻力问题进行了试验研究,得到在考虑降雨情况下的阻力系数关系式,当  $Re < 800$  时,

$$f = \frac{24 + 34.453 + (1 + 1.359\sqrt{\Delta})S_0^{0.403}I^{0.743-0.315/\Delta}}{Re} \quad (9)$$

当  $Re > 2000$  时,陡坡下 ( $S_0 > 3^\circ$ )

$$f = \frac{(1.340 + 3.514\Delta)S_0^{0.465}}{Re^{0.5}} \quad (10)$$

缓坡情况下 ( $S_0 \leq 3^\circ$ )

$$f = \frac{0.285}{Re^{0.25}} \quad (11)$$

式中:  $I$  为雨强, mm/min;  $S_0$  为坡度 ( $^\circ$ );  $\Delta$  为糙高, mm。

蒋昌波等<sup>[28]</sup>认为有推移质运移的光滑床面上的坡面流,其阻力  $f$  由颗粒阻力  $f_g$  以及推移质运移阻力  $f_{bt}$  组成。即

$$f = f_g + f_{bt} \quad (12)$$

粗糙床面水流阻力主要有颗粒阻力、形态阻力  $f_f$  和波阻力  $f_w$  组成。此外还包括推移质运移阻力和河床变形阻力。即

$$f = f_g + f_f + f_w \quad (13)$$

Abrahams 等<sup>[29]</sup>认为坡面流阻力主要由颗粒阻力  $f_g$ 、形态阻力  $f_f$ 、波阻力  $f_w$  和降雨阻力  $f_R$  组成,并且认为这些阻力是可以相加的,即

$$f = f_g + f_f + f_w + f_R \quad (14)$$

Abrahams, Sadeghian 等人的分析表明:3个阻力系数  $n$ 、 $C$ 、 $f$  并非都适合表达坡面流阻力,  $f$  比  $n$  和  $C$  更适合描述地表水流的阻力。然而, Podmore 等人则认为  $n$  和  $C$  更为适合表征坡面流阻力。Noarayanan L 等<sup>[30]</sup>验证了不同水流条件、植物参数下的曼宁糙率系数,并认为曼宁糙率系数  $n$  是计算和描述薄层水流坡面阻力的理想方法。曾玉红等<sup>[31]</sup>利用曼宁糙率系数  $n$ 、谢才系数  $C$ 、达西-维斯巴赫沿程阻力系数  $\lambda$  研究了坡面植被对坡面流的阻滞影响,并得出糙率系数  $n$  表达坡面阻力比其他更为理想。

### 3 问题分析

虽然目前国内外诸多学者都对坡面流阻力进行了研究,并取得了相应的成果,但是由于其问题的复杂性,试验设备及量测技术达不到理想要求等因素影响,目前仍没有掌握其变化规律,存在以下几个问题有待解决。

#### 3.1 流态的不确定

通过对过去的研究综合分析可以看出,坡面流究竟属于何种流态仍未有统一的结论,对坡面流流态认

识的不确定导致了坡面流阻力研究结果的复杂多变。坡面流特性与明渠水流和管流有很大的区别,地表粗糙度、雨滴打击等诸多因素都将对坡面流流态造成影响,因此用确定明渠水流流态的方法来判别坡面流流态就存在了很大的误差。虽然有很多学者意识到这一点并对判别坡面流流态的方法进行了改进,但是由于坡面流自身的复杂性及试验条件的不同,所得到的结论也不尽相同,并不具有代表性。

#### 3.2 降雨的影响作用

研究表明,降雨将会扰动坡面水流,进而影响坡面流阻力,其对坡面流阻力的影响程度与水流流态有关。目前降雨对坡面流阻力的研究大都是通过人工降雨设备模拟现实流域自然降雨,从而进行分析研究。但是在人工降雨试验中,人工模拟降雨试验的降雨特性与天然降雨特性之间联系不够紧密,对应特性之间存在了差异,使人工模拟降雨设备并不能准确的模拟自然降雨特性,从而导致试验分析存在了误差。因此在目前的研究中,对于雨滴大小、降雨高度、降雨强度等因素对坡面流阻力的具体影响机理,仍缺乏必要的认识。

#### 3.3 公式表征

关于坡面流阻力系数的表征目前一般仍用二维明渠的阻力概念和表达方式,有所改进的只是根据实测实验资料来确定阻力系数,或是通过经验回归分析,与影响阻力的因素如雷诺数、降雨、土壤粒径和坡度等联系起来,建立阻力系数计算公式,然而由于试验方法,量测技术及试验条件等的差异,所建立的计算公式具有局限性,尚未达到直接应用的程度。并且对于 Manning 糙率系数  $n$ 、Chezy 系数  $C$  和 Darcy-Weibach 阻力系数  $f$  哪个更适合表征坡面流阻力,不同的学者持有不同的观点,目前仍未有统一的认识。

### 4 结 语

综上所述,目前大多数研究成果都是在特定的试验条件下得出的,并不具备普遍性,所以迄今为止仍有很多问题存在分歧,未有统一的结论,对于坡面流阻力的变化机理及各影响因素与坡面流阻力的相应关系等一些问题仍缺乏必要的认识。其根本原因是试验设备及研究方法的局限性,因此在今后的研究中,应在这两方面加强研究,从根本上解决问题。

(1) 设计或改进试验设备;坡面流阻力研究试验一般包括水槽与人工降雨装置或放水装置,水槽内铺设用以模拟坡面地表,通过放水或是人工降雨

来模拟坡面水流,观察测量坡面流的各项水力学参数进而确定坡面流阻力。但是目前所用的试验水槽并不能准确模拟坡面地表的复杂多变,并且水槽流向单一,在现实流域地表,坡面水流并非单一方向流动,不同的流向可能由于地表类型的差异而具有不同的坡面阻力<sup>[32]</sup>。同时采用人工降雨设备模拟自然降雨也存在了诸多不确定性,并不能很好的模拟自然降雨。试验设备的不适用必将导致试验结果的误差与失真,因此设计或改进试验设备使其尽可能准确的模拟现实流域地表以及自然降雨特性,将是今后研究工作的首要任务。未来的实验设备应与计算机高度一体化,使其试验结果更加准确。

(2) 研究方法改进;目前对于坡面流阻力的研究,一般仍采用明渠水流方法,如坡面流流态的确定、坡面流阻力公式表征等都是用明渠水流概念和表达方式,虽然很多学者对这些研究方法进行了改进,但都是在特定的条件下进行的修改,不具有普遍性。众多的研究指出,坡面流水力特性远比明渠水流复杂,土壤类型、植被覆盖、地表粗糙度等都对坡面流阻力有很大的影响作用,影响因素众多。因此在研究坡面流阻力时采用明渠水流概念和表达方式并不能准确的表达坡面流阻力的变化机理,所得结论存在了失真和不准确性。因此应采用改进后的试验设备进行大量实验,观察模拟坡面水流流动特性,分析用明渠水流方法探讨坡面流阻力时,其适用范围及可能产生的误差,坡面流阻力与明渠水流在机理上明显不同,需进一步研究其形成机理,从而对坡面流进行全面系统的研究,建立完整的坡面流水力学理论。

## 参考文献:

[1] Woolhiser D A, Hanson C L, Kuhlman A R. Overland flow on rangeland watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 9(2): 336 - 356.

[2] 吴普特,周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 40 - 45.

[3] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. *泥沙研究*, 1996(1): 74 - 82.

[4] 雷俊山,杨勤科. 坡面薄层水流侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J]. *泥沙研究*, 2004(6): 22 - 26.

[5] 潘成忠,上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(6): 843 - 851.

[6] 张光辉. 坡面薄层水流动力学特性的实验研究[J]. *水科学进展*, 2002, 13(2): 159 - 165.

[7] 贾婵娟,孙三祥,张建东,等. 坡面水流流态的试验研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2008, 44(5): 300 - 301.

[8] 敬向锋,吕宏兴,潘成忠,等. 坡面薄层水流流态判定方法的初步探讨[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 56 - 61.

[9] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 坡面浅层明流流态界定方法之商榷[J]. *实验流体力学*, 2011, 25(4): 67 - 73.

[10] 翟艳宾,吴发启,王健,等. 不同人工糙率床面水力学特性的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 38 - 42.

[11] Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 156(1): 431 - 446.

[12] Roche N, Daian J F, Lawrence D S L. Hydraulic modeling of runoff over a rough surface under partial inundation [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(8): 1 - 11.

[13] Hessel R, Jetten V, Guanghai Z. Estimating Manning's n for steep slopes [J]. *Catena*, 2003, 54(1): 77 - 91.

[14] Tatar D, Planchon O, Wainwright J, et al. Measurement and modelling of high - resolution flow velocity data under simulated rainfall on a low slope sandy soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 348(1): 1 - 12.

[15] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究 [J]. *人民黄河*, 1998, 20(8): 13 - 16.

[16] 吴宏平,王玉强,张宽地,等. 坡面薄层水流水力特性试验研究 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(22): 5455 - 5458.

[17] 闫旭峰,周苏芬,黄尔,等. 植被条件下坡面薄层水流动力学特性试验研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(2): 26 - 30.

[18] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究 [J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 72 - 75.

[19] 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究 [J]. *水利学报*, 2003, 34(9): 66 - 70.

[20] Yoon Y N, Wenzel H G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1971, 97(9): 1367 - 1386.

[21] Shen H W, Li R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface [J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 99 (HYS): 771 - 792.

[22] Savat J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall [J]. *Earth Surface Processes*, 1977, 2(2 - 3): 125 - 140.

[23] 陈国祥,姚文艺. 降雨对浅层水流阻力的影响 [J]. *水科学进展*, 1996, 7(1): 42 - 46. (下转第 64 页)

转化为气态含氮产物,溢出了溶液。在二维电极电解过程中,受到电场的影响,硝酸盐作为一种阴离子,其扩散至阴极的速率非常慢,因此去除效率不高,影响了工艺的实用价值。在今后的研究过程中,应该进一步提高硝酸盐扩散至阴极的速率,提高其电化学还原效率。在阴阳极之间添加阳离子交换膜形成隔膜电解池,可能有助于减少硝酸盐向阳极区扩散,提高阴极区硝酸盐浓度,从而进一步提高硝酸盐在阴极被还原的几率,值得进一步探讨和研究。

### 参考文献:

- [1] 胡筱敏,叶舒帆,和英滇,等. 电解催化还原-氯氧化无害化去除水中硝酸盐氮[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 533-539.
- [2] Robinson-Lora M A, Brennan R A. The use of crab-shell chitin for biological denitrification: batch and column tests[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(2): 534-541.
- [3] 张岚,陈昌杰,陈亚妍. 我国生活饮用水卫生标准[J]. 中国公共卫生, 2007, 23(11): 1281-1282.
- [4] 范潇梦,关小红,马军. 零价铁还原水中硝酸盐的机理及影响因素[J]. 中国给水排水, 2008, 24(14): 5-9.
- [5] 崔宝臣,张富,徐胜利,等. 催化还原法去除饮用水中硝酸盐氮研究进展[J]. 应用化工, 2008, 37(9): 1081-1085.
- [6] 曹国民,盛梅,迟峰,等. 反渗透法脱除地下水中硝酸盐的中试试验[J]. 净水技术, 2011, 30(5): 7-10.
- [7] 童桂华,彭昌盛,贾永刚,等. 离子交换树脂去除水中硝酸盐的研究[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(4): 73-76.
- [8] 张立辉,曹国民,黄海苏,等. 复合膜生物反应器脱除地下水中硝酸盐的性能[J]. 华东理工大学学报:自然科学版, 2011, 37(5): 594-600.
- [9] Reyter D, Bélanger D, Roué L. Nitrate removal by a paired electrolysis on copper and Ti/IrO<sub>2</sub> coupled electrodes - Influence of the anode/cathode surface area ratio [J]. *Water research*, 2010, 44(6): 1918-1926.
- [10] Fan Nianwen, Li Zhengkui, Zhao Lin, et al. Electrochemical denitrification and kinetics study using Ti/IrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> as the anode and Cu/Zn as the cathode [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 214(1): 83-90.
- [11] Katsounaros I, Kyriacou G. Influence of nitrate concentration on its electrochemical reduction on tin cathode: Identification of reaction intermediates [J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(17): 5477-5484.
- [12] Li Miao, Feng Chuanping, Zhang Zhenya, et al. Simultaneous reduction of nitrate and oxidation of by-products using electrochemical method [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1): 724-730.
- [13] Vanlangendonck Y, Corbisier D, Van Lierde A. Influence of operating conditions on the ammonia electro-oxidation rate in wastewaters from power plants (ELONITA? technique) [J]. *Water Research*, 2005, 39(13): 3028-3034.
- (上接第59页)
- [24] 梅欣佩. 降雨条件下坡面薄层水流水动力学特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2004.
- [25] 肖培青,郑粉莉,姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 236-240.
- [26] 张小娜,冯杰,张超,等. 不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 264-269.
- [27] Sadeghian M R, Mitchell J K. Hydraulics of micro-braided channels: Resistance to flow on tilled soils [J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(2): 458-468.
- [28] 蒋昌波,隆院男,胡世雄,等. 坡面流阻力研究进展[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 189-197.
- [29] Abrahams A D, Parsons A J, Hirsch P J. Field and laboratory studies of resistance to interrill overland flow on semiarid hillslopes, Southern Arizona [C] // *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics University College*. London, 1992: 1-24.
- [30] Noarayanan L, Murali K, Sundar V. Manning's 'n' coefficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration [J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2012, 6(1): 51-62.
- [31] 曾玉红,槐文信,张健,等. 非淹没刚性植被流动阻力研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 834-838+847.
- [32] 张升堂,康绍忠. 基于矢量糙率的栅格单元流量分配模型[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1326-1330.