

## 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究

郭雨华,赵廷宁,孙保平,丁国栋,成 晨,胡封兵

(北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083)

**摘 要:**利用野外实地放水试验,分析草地减流减沙效益,研究草地与裸地坡面的产流产沙过程与坡面流水动力学特性。试验结果表明,草地与裸地坡面土壤入渗过程均符合 Horton 入渗公式,且裸地坡面土壤入渗率约为草地的 45%;草地坡面含沙率平均值较裸地减少 70%左右、输沙率减少 80%左右、径流系数减少 30%左右;裸地与草地坡面流雷诺数  $Re$  均属于层流范畴,当坡面径流量较小时,裸地和草地坡面流的雷诺数和弗劳德数属于层流中的缓流范畴,当坡面径流量进一步增大,裸地坡面径流属于过渡流急流流态;草地和裸地坡面径流深没有明显差异,草地坡面径流流速明显较裸地低,而且 Darcy - weisbach 阻力系数  $f$  和曼宁糙率系数  $n$  的平均值分别是裸地的 3.4 和 2 倍。

**关键词:**草地坡面;坡面径流;减流减沙;水动力学特性

**中图分类号:**S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2006)04-0264-04

## Study on the Dynamic Characteristics of Overland Flow and Resistance to Overland Flow of Grass Slope

GUO Yu-hua, ZHAO Ting-ning, SUN Bao-ping, DING Guo-dong, CHENG Chen, HU Feng-bing

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The effect of grass on runoff and sediment reductions was analyzed by using field experiment. And the generation process of runoff and sediment erosion and the hydrodynamic characteristics of flow on grass slope were quantitatively studied. The result indicated that the process figure of water infiltration in the slope without grass was coincidental with Horton formula, as well as the grass slope. And the soil infiltration rate in the slope without grass is 45 % of the grass slope; compared with the slope without grass, the average runoff sediment concentration rate, sediment yield rate and runoff coefficient of grass slope decreased 70 %, 80 % and 30 %, respectively. When the runoff was little, the flow regime on both the slopes was tranquil and laminar flow. As the runoff increased, the flow regime on slope without grass was a rushing and transition flow. The runoff depth of both slopes was not significantly different. However, runoff velocity of grass slope will significantly reduced compared to slope without grass. The average flow resistance coefficients of grass slope,  $f$  and  $n$ , were 3.4 times and twice the coefficients of slope without grass.

**Key words:** grass slope; slope runoff; runoff and sediment reductions; hydrodynamic characteristics

在黄土高原侵蚀地区,降雨超渗径流的径流冲刷作用特别强烈,危害特别明显,而坡面径流是造成水土流失的主导因子,因此对坡面水蚀过程的研究,尤其是坡面流的水动力学特性的研究显得尤为重要。目前对坡面水动力学特性的研究<sup>[1~3]</sup>主要集中在裸土坡面,而涉及植被坡面的研究很少。曾伯庆等<sup>[4]</sup>、侯喜禄等<sup>[5]</sup>、Niwa<sup>[6]</sup>的研究结果表明,降雨条件对草地减流减沙效益影响很大。关于草地减流减沙效益的研究虽然进行了很多<sup>[7~11]</sup>,但还多局限于经验统计分析上,从坡面水动力学特性分析草地阻延地表径流机制的研究尚不多见。本文主要采用野外实地放水模拟降雨冲刷试验研究草地坡面的降雨产流产沙过程以及坡面流水动力学参数特征,揭示草地阻延地表径流作用机制,从而为进一步研究草地植被的减流减沙效应模型奠定基础。

### 1 研究区概况与研究方法

#### 1.1 研究区概况

本研究试验地在北京林业大学山西省吉县科研试验场。吉县位于晋西南黄土高原区吕梁山南端,属典型黄土丘陵沟壑区。位于东经 110°27' ~ 111°07' 与北纬 35°53' ~ 36°21' 之间。属暖温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季温度较高。年降水量为 575.9 mm,无霜期平均 170 d 左右,年平均气温 10℃。当地主要土壤类型为褐土,黄土母质,森林覆盖率为 33.1%。防护林主要林种为刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、灌木树种有沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊 (*Spiraea thunbergii*)、黄刺玫 (*Rosa Yanthin Lndl*) 和虎榛子 (*Ostryopsis davidiana Decne*) 等。该区大部

\* 收稿日期:2006-03-07

基金项目:国家 973 项目(2002CB111503)资助

作者简介:郭雨华(1982-),男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向:水土保持与荒漠化防治。

分为典型黄土高原侵蚀地形。

1.2 研究方法

本试验采用野外实地放水试验模拟降雨冲刷过程。具体做法是选择两块坡度为 15° 的径流坡面,一块做裸地坡面,另一块种草,作草地坡面。两径流坡面的试验装置均由相同的供水系统、冲刷系统、测定系统三部分组成。具体设计是在研究区将两块白铁皮沿坡面插入土中做成冲刷槽,冲刷区规格为 10 m ×2 m。用容积为 500 L 的敞口刻度桶作为供水装置(图 1)。在放水口处安装可调流量的阀门,调节设计流量,出水口水平,出水量均匀。冲刷区下方装有集流桶,每次实验后取样观测。

试验草种为黄土高原常见的多年生黑麦草,土壤为褐土,机械组成如表 1。装土时间为 2005 年 4 月上旬,采用穴播,每穴播种草种 2~3 粒。试验时间为 2005 年 6 月,黑麦草长势良好,草高约为 18 cm,覆盖度为 60% 左右。

表 1 试验土壤的机械组成						mm
土壤粒径组成/%						
<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.25	0.25~1	
18.261	11.542	13.564	53.418	3.210	0.005	

根据当地径流小区观测资料推算和当地地形条件,考虑到地面径流经过汇集后可能出现最大径流量,本试验设计流量为:1.0~4.0 m³/h。

放水试验前、后均用 TRIME-EZ/IT 便携式土壤水分速测仪测定土壤含水量。每隔 3 min 收集一次坡面径流过程样,并通过烘干称重法测定径流泥沙含量。测定径流流速。其方法是从冲刷开始,每隔 3 min 测定水流流过固定坡面区间的时间,并最后选取流速基本稳定后的多次平均值作为坡面的平均流速,并考虑到用染色法测定的径流流速为坡面优势流流速,实测流速乘以修正系数 0.75 作为水流断面平均流速<sup>[12]</sup>。

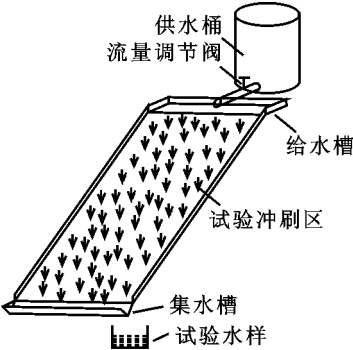


图 1 试验装置模式图

1.3 试验数据分析

根据实测土壤水分含量,推求试验前后土壤水分变化量。根据放水量(换算为雨强)与径流资料计算推求坡面土壤入渗过程。土壤的入渗率*i*可以通过式(1)计算:

$$i = I \cos \theta \frac{10 R_j}{S \times t} \tag{1}$$

式中:*I*——降雨强度(mm/min),通过放水流量与过水断面面积计算; $\theta$ ——地表坡度(°);*t*——取样间隔时间(min);*R<sub>j</sub>*——第*j*次取的径流量(ml);*S*——坡面受雨面积(cm²);10——单位换算系数。

不同盖度坡面的径流系数和平均入渗率,可以通过径流总量、降雨历时以及雨强求得。径流深是反映水力特征的重要因子。由于坡面水流水层极薄,且土壤下垫面条件不断发

生变化,采用实测法难以准确测定。因此假定水流沿坡面均匀分布,可采用下式计算径流深:

$$h = q/U = Q/(U \cdot B \cdot t) \tag{2}$$

式中:*q*——单宽流量 m³/(m·min);*Q*——*t* 时间内的径流量(m³);*t*——径流取样时间间隔(min);*U*——断面平均流速(m/min);*B*——过水断面宽度(m)。

无量纲参数雷诺数 *Re* 是水流的惯性力与黏滞力的比值,是水流流态的重要判据, *Re* 越大,说明水流惯性力越大,水流发生紊流的可能性也就越大。在水力学中弗劳德数 *Fr* 也是表征水流流态的重要参数,它反映了水流的惯性力和重力之比。弗劳德数 *Fr* 是否大于 1,可以作为判别明槽水流是急流还是缓流的标准。其计算公式分别为:

$$Re = \frac{Uh}{\nu}; Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \tag{3}$$

Darcy - weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数 *n* 分别为:

$$f = \frac{8ghJ}{U^2}; n = \frac{h^{2/3} J^{1/2}}{U} \tag{4}$$

式中:  $\nu$  是水运动黏性系数(可取值 6.0 ×10<sup>-5</sup> m²/s);*g*——重力加速度(m/s²);*J*——水力坡降,可近似取 sin  $\theta$ 。

2 结果与分析

2.1 草地对坡面土壤入渗过程的影响

由于草地上部分的截流效应在降雨后期较小,在不考虑地上部分截流的情况下,利用人工降雨试验对草地坡面土壤入渗过程进行研究。由表 2 可看出,裸地坡面土壤入渗率约为 0.253 mm/min,而草地约为 0.569 mm/min,裸地坡面土壤入渗率约为草地的 45%。说明草地坡面可以有效拦蓄降雨,更大地发挥土壤水库效应。另外,随着放水量的增加,裸地土壤入渗率呈现先降后增的趋势,但总体上呈下降的趋势。草地坡面的土壤入渗率随放水量的增加呈递增趋势。这主要是由于随着放水量的增加,裸地坡面的水流速度增加,坡面薄层水流深降低,而且很容易形成细小的侵蚀沟,导致水流沿沟道快速流走而来不及下渗。草地坡面由于有植物的拦蓄,坡面水流速度大大减小,坡面径流深加大,水分大量下渗。同时,随放水量的增加,裸地和草地的输沙率均呈现递增趋势,而径流系数在放水流量达到 1.5 m³/h 后逐渐趋于稳定。

表 2 不同放水流量下裸地与草地坡面径流特征

处理 方式	放水流量 /(m³·h <sup>-1</sup> )	入渗率 /(mm·min <sup>-1</sup> )	含沙率/ (kg·m <sup>-3</sup> )	输沙率/ (g·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	径流系数
裸地	1.0	0.446	26.746	2.785	0.181
	1.5	0.452	63.563	27.985	0.547
	2.0	0.478	21.121	13.064	0.562
	2.5	0.533	22.532	17.243	0.561
	3.0	0.715	24.954	21.316	0.545
草地	4.0	0.772	25.237	28.962	0.571
	1.0	0.378	94.635	23.654	0.512
	1.5	0.232	139.568	81.236	0.764
	2.0	0.205	113.265	82.356	0.798
	2.5	0.213	89.653	83.751	0.812
坡面	3.0	0.257	80.659	95.632	0.856
	4.0	0.231	84.925	120.633	0.803

为了更直观地研究草地与裸地的土壤入渗性,在数据分

析中选择 3.0 m<sup>3</sup>/h 放水流量的试验结果进行研究(图 2)。从图 2 中可以看出,草地坡面土壤的稳定入渗率明显高于裸地土壤,说明草地坡面对降雨具有明显的拦蓄作用。这主要因为草地植被对降雨动能削减从而使坡面土壤不易形成结皮以及植物根系对土壤构型的改善增强了土壤的入渗性能造成的。在坡面含水量基本相同的情况下,裸地坡面在降雨后 1 min 左右开始产流,而草地坡面在 2 min 左右产流。

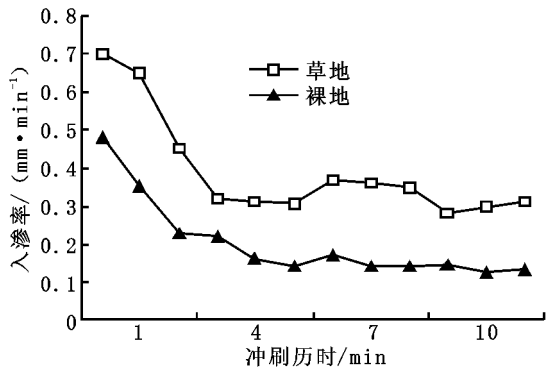


图 2 3.0 m<sup>3</sup>/h 放水量下坡面的入渗过程

对不同放水量下的土壤入渗过程进行拟合,发现裸地和草地坡面的土壤入渗率均符合 Horton 入渗公式:

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt}$$

式中:  $i_0$ ——初渗率 (mm/min);  $i_c$ ——稳渗率 (mm/min);  $k$ ——系数;  $t$ ——降雨历时。拟合结果为:裸地为  $i_{裸} = 0.0443 + 0.432e^{-0.85t}$ ;草地为  $i_{草} = 0.392 + 0.287e^{-0.16t}$ ,决定系数  $R^2$  均在 0.95 上。

2.2 草地坡面的减流减沙效应

草地的水土保持效应主要是通过草地的地上和地下两部分共同实现的,地上部分主要是通过对降雨截留,减少地表净雨以及削减降雨动能减小降雨侵蚀力,以及增加地表糙率,降低径流对地表的冲刷能力多方面来实现的。而地下部分的作用主要体现在根系增强土壤的抗冲性能以及改善土壤构型<sup>[13~15]</sup>。

表 3 不同放水流量下草地的减流减沙效应

放水流量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	含沙率减 少量/%	输沙率减 少量/%	径流系数 减少量/%
1.0	71.74	88.23	15.85
1.5	54.46	65.55	28.40
2.0	92.14	84.14	29.57
2.5	74.87	79.41	30.91
3.0	69.06	77.71	36.33
4.0	70.28	75.99	28.89

由表 3 可知,草地坡面较裸地具有显著的减流减沙效应。含沙率较裸地减少 70 %左右、输沙率减少 80 %左右、径流系数减少 30 %左右。与草地的减沙功能相比,其削减径流作用明显弱于减沙效应。

2.3 草地对坡面产流产沙过程的影响

坡面产流过程是降雨特性与下垫面条件共同作用的结果。下垫面状况决定着土壤入渗过程,进而影响坡面产流产沙过程。试验中选择 3 m<sup>3</sup>/h 的放水流量研究草地对坡面产流产沙过程的影响。

由图 3 可知,在冲刷初期,裸地和草地坡面的输沙率均急剧下降,但随着冲刷历时的增加,草地土壤坡面的产沙过程与裸地坡面明显不同。裸地土壤坡面的输沙率呈增减再

增的变化趋势,草地坡面的输沙率随降雨历时的增加呈递减趋势。从产沙机理分析,坡面产沙主要由坡面的水流动能对土粒的分散和径流搬运能力两个方面决定。在冲刷初期,由于溅蚀作用,坡面产流初期的输沙率较大,而随着坡面径流水深的增大,雨滴动能直接打击分散土粒作用减小,从而输沙率减小。随着降雨历时的增加,坡面土壤入渗量逐渐减小,径流冲刷作用增强,使裸地坡面的土壤冲刷作用增强,进而形成细沟。随着降雨历时持续增加,细沟基本稳定,坡面的输沙率也趋于一个稳定值。而草地由于有植被的拦蓄,减小了径流的冲刷作用,坡面的土壤冲刷作用也随之减弱,输沙量逐渐变小并趋于稳定。由图 3 可以看出,即使在坡面产流的初期,径流能量较小的情况下,坡面的输沙率仍大于径流能量较大的降雨后期,这进一步说明草地坡面的产沙贡献主要来自降雨初期的溅蚀。

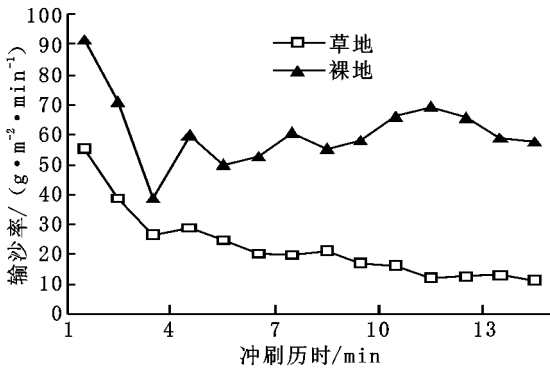


图 3 3.0 m<sup>3</sup>/h 放水量下坡面的产沙过程

2.4 草地对坡面流水动力学参数的影响

在黄土丘陵沟壑区,坡面径流是土壤侵蚀产沙的主要动力,对坡面流水动力学特性的研究将有助于更加深入地认识坡面侵蚀产沙过程的本质,从而揭示植被对坡面侵蚀的作用机理。坡面流流速、径流深、雷诺数  $Re$ 、弗劳德数以及阻力系数和曼宁糙率系数  $n$  等水力要素是反映水流动力学特征的主要指标,在目前还没有成熟的坡面流理论时,可以借鉴河流动力学的原理和方法,用相应的水力学公式对坡面流的上述水力要素进行测定或计算,结果如表 4。

表 4 不同放水流量下坡面水流动力学参数特征

处理 方式	放水流量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	平均流速 (cm·s <sup>-1</sup> )	径流深 /mm	$Re$	$Fr$	$f$	$n$
草 地 坡 面	1.0	5.15	0.613	31.57	0.665	4.693	0.0679
	1.5	9.95	1.432	142.48	0.840	2.937	0.0650
	2.0	11.25	1.587	178.54	0.902	2.546	0.0616
	2.5	9.53	1.756	167.35	0.726	3.926	0.0777
	3.0	13.60	1.965	267.24	0.980	2.157	0.0587
裸 地 坡 面	4.0	14.05	2.535	356.17	0.891	2.608	0.0674
	1.0	10.34	0.439	45.39	1.576	0.834	0.0284
	1.5	14.09	1.296	182.61	1.250	1.326	0.0429
	2.0	16.85	1.738	292.85	1.291	1.243	0.0437
	2.5	21.35	1.686	359.96	1.661	0.751	0.0338
面	3.0	22.87	1.816	415.32	1.714	0.705	0.0331
	4.0	23.98	1.975	473.61	1.724	0.697	0.0334

分析表 4 可以看出,不论是草地还是裸地,坡面流流速和径流深均随着放水量的增加而呈现增大趋势,但草地坡面

流流速明显较裸地低。两地径流深没有明显差异。这主要是由于裸地坡面单宽流量较草地大,同时,断面平均流速也较草地大,单宽流量与断面平均流速比值变化不大,由公式(2)可知径流深变化不大。由于坡面水深很小,一般在 1~2 mm 左右,表征惯性力与黏性力之比的雷诺数  $Re$  也很小,根据明渠均匀流的基本理论<sup>[16]</sup>,层流和紊流的临界雷诺数  $Re$  为 500,因此,由试验结果可知,坡面径流量较小时,裸地和草地坡面流属于层流,当坡面径流量进一步增大,裸地坡面流由层流转为过渡流。根据河流动力学<sup>[17]</sup>,由于水深和流速的大小决定着径流侵蚀力及其泥沙搬运强度,弗劳德数是表征水流流态的重要参数,它综合地反映了流速和水深的对比关系。在径流量基本相同的情况下,弗劳德数  $Fr$  越大,说明坡面径流的流速越大,径流挟沙能力越强,水深越浅,坡面的径流侵蚀力越小。试验结果表明,草地坡面径流的弗劳德数明显小于裸地坡面。根据明槽水流的判别标准,裸地坡面的弗劳德数  $> 1$ ,说明裸地坡面流态属急流范畴。而草地坡面的弗劳德数  $< 1$ ,说明草地坡面流态属于缓流范畴,说明草地坡面抵抗径流侵蚀的能力强于裸地。

阻力系数反映了坡面流在流动过程中所受的阻力大小,阻力系数越大,说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大,则用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量就越小,坡面侵蚀产沙就越少。从表 4 可以看出,裸地坡面的 Darcy - weisbach 阻力系数平均值为 0.926,而草地的平均阻力系数为 3.145,是裸地的 3.4 倍。曼宁糙率系数  $n$  反映坡面粗糙程度。裸地的为 0.035 9,而草地的曼宁糙率系数  $n$  为 0.0664,约是 2 倍。这主要是因为坡面流受

植物拦蓄流速减小,在坡面流量基本相同条件下,水深与流速成反比,流速小则水深大,由式(4)可知,此时坡面的 Darcy - weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数  $n$  就大。

### 3 讨论与小结

通过模拟降雨冲刷对比试验,研究草地坡面与裸地坡面的降雨产流产沙过程与坡面流动力学特性,为阐明草地植被阻延径流机制提供了理论依据。

试验分析草地对坡面土壤入渗过程的影响,裸地坡面土壤入渗率约为草地的 45%,说明草地坡面可以有效拦蓄降雨。并发现裸地和草地坡面的土壤入渗率均符合 Horton 入渗公式:  $i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt}$ ,拟合结果为:裸地为  $i_{裸} = 0.0443 + 0.432e^{-0.85t}$ ;草地为  $i_{草} = 0.392 + 0.287e^{-0.16t}$ ,决定系数  $R^2$  均在 0.95 以上;草地坡面含沙率较裸地减少 70% 左右、输沙率减少 80% 左右、径流系数减少 30% 左右,草地坡面较裸地具有显著的减流减沙效应;草地坡面流流速明显较裸地低,两地径流深没有明显差异;裸地与草地坡面流雷诺数  $Re$  均小于 500,坡面径流量较小时,裸地和草地坡面流属于层流,当坡面径流量进一步增大,裸地坡面流由层流转为过渡流;裸地坡面的弗劳德数  $> 1$ ,裸地坡面流态属急流流态。草地坡面的弗劳德数  $< 1$ ,草地坡面流态属于层流中的缓流流态;草地坡面的 Darcy - weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数的平均值分别是裸地的 3.4 和 2 倍。可见,草地坡面具有较好的水土保持效益

#### 参考文献:

- [1] Foster G R., User requirements:USDA - water erosion prediction project (WEPP) [R]. National Soil Erosion Research Laboratory Report No. 1 (USDA - ARS:W. Lafayette, IN.), 1987.
- [2] Abrahams A D, Parson A J Hydraulic of interrill overland flow on stone - covered desert surfaces[J]. Catena, 1993, 21: 111 - 140.
- [3] Atkinson J F, Abrahams A D, Krishnan C, et al. Shear stress partitioning and sediment transport by overland flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(1): 37 - 40.
- [4] 曾伯庆, 马文中, 李俊文, 等. 人工草地植被对产流产沙影响的研究[A]. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集[C]. 北京:水利电力出版社, 1990, 80 - 86.
- [5] 侯喜禄, 梁一民, 曹清玉. 黄土丘陵区主要水保林类型及草地水保效益的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1991, (14): 96 - 103.
- [6] Niwat Ruangpanit. 林冠郁闭度对水土流失的影响[J]. 中国水土保持, 1984, (7): 56 - 58.
- [7] 郝建忠. 黄丘一区水土保持单项措施及综合治理减水减沙效益研究[J]. 中国水土保持, 1993, (3): 26 - 31.
- [8] 熊运阜, 王宏兴, 等. 梯田、林地、草地减水减沙效益指标初探[J]. 中国水土保持, 1996, (8): 10 - 13.
- [9] 赵有恩. 黄河中游水保减沙效益分析方法的改进与应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 29 - 34.
- [10] 吴永红, 李焯, 冉大川, 等. 水土保持坡面措施减水减沙效益计算方法探讨[J]. 水土保持通报, 1998, 18(1): 43 - 47.
- [11] 侯喜禄, 曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减水减沙效益研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33 - 40.
- [12] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 509 - 515.
- [13] 李勇, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991, (12): 935 - 938.
- [14] 李勇, 徐晓琴, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, (4): 366 - 369.
- [15] 刘国彬, 蒋定生, 等. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21 - 28.
- [16] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
- [17] 张瑞谨. 河流泥沙运动力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1989.

更正:本刊 2006 年第 3 期“东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状”一文作者中李景云的工作单位应要求改为:国土资源部土地利用重点实验室,中国土地勘测规划院,北京 100035。

第 3 期付新峰等“雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及站点气候因子的关系”,文中图 5 上的“降水量”应为“平均气温”,特此更正。