

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160305

高羊茅草地地表径流系数影响因素研究

魏小燕¹ 毕华兴^{1,2,3,4} 霍云梅¹ 肖聪颖¹ 杨晓琪¹

(1 北京林业大学水土保持学院 2 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心
3 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心 4 水土保持国家林业局重点实验室)

摘要:高羊茅作为我国北方典型冷季型城市草坪草,具有调蓄雨水的作用。为了进一步深入研究北方高羊茅草地的降雨径流,本文采用人工模拟降雨试验,研究了高羊茅草地在不同覆盖度(60%和90%)及不同雨强(30、60和90 mm/h)条件下的径流系数变化过程及其与影响因子之间的关系,并用裸地作为对照,得出高羊茅草地不同试验条件下的径流系数削减率。研究结果表明:1)高羊茅草地初始产流时间随雨强增加逐渐提前,随着覆盖度的增加逐渐延长,同时,雨强越大初始产流时间提前幅度越小,覆盖度越大草地延缓初始产流时间的效果越明显;2)裸地和高羊茅草地的径流系数随降雨时间变化规律相似,均随降雨时间的延长先迅速增加后逐渐变缓,经过拟合裸地及高羊茅草地的径流系数与降雨时间均呈对数关系;3)高羊茅草地地表径流系数随着覆盖度的增加而降低,随着雨强的增加而增加,且覆盖度越低雨强对径流系数的影响越显著,反之则越不显著;4)高羊茅草地对径流系数的削减能力有限,随着雨强的增加两种覆盖度草地径流系数削减率越相近,在雨强为30、60和90 mm/h时两种覆盖度草地径流系数削减率分别相差25%、24%和23%;5)建立试验条件下高羊茅草地径流系数与降雨强度、覆盖度、降雨时间的回归方程,经过验证,方程可用于试验条件下高羊茅草地径流系数的预测。

关键词:人工模拟降雨;覆盖度;降雨强度;径流系数

中图分类号:S715-3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)05-0082-07

WEI Xiao-yan¹; BI Hua-xing^{1,2,3,4}; HUO Yun-mei¹; XIAO Cong-ying¹; YANG Xiao-qi¹. **Study on the factors influencing surface runoff coefficient in *Festuca arundinacea* grassland.** *Journal of Beijing Forestry University*(2017)**39**(5) 82-88 [Ch., 26 ref.]

- 1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;
- 2 Forestry Ecological Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;
- 3 Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing, 102206, P. R. China;
- 4 Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Festuca arundinacea as a kind of typical grass in northern China, it has the advantage of storing and infiltrating rain water. In order to research the runoff of *F. arundinacea* grassland, we studied the changing process of runoff coefficient under different coverage (bare land, 60%, 90%) and varied rainfall intensities (30, 60, 90 mm/hour) in *F. arundinacea* grassland through artificial simulated rainfall experiments. And we also studied its relationship with different influencing factors. Taking bare land as control, we studied the runoff coefficient reduction rate of *F. arundinacea* grassland under varied experimental conditions. The results showed that: 1) The initial runoff time of *F. arundinacea* grassland

收稿日期: 2016-09-28 修回日期: 2017-03-12
基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2013ZX07304-001)、科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2016_014207_000083)。
第一作者: 魏小燕。主要研究方向:林业生态工程。Email: 1976835739@qq.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 毕华兴,教授。主要研究方向:水土保持与林业生态工程。Email: bhx@bjfu.edu.cn 地址:同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

decreased with the increase of rainfall intensity, and it prolonged with the increase of coverage. Simultaneously, the greater the rainfall intensity was, the smaller range the runoff coefficient reduction rate became. And the greater the coverage was, the more obvious the grassland delayed the initial runoff time. 2) The runoff coefficient of *F. arundinacea* grassland and bare land both rapidly increased and then tended to be stable with the increase of rainfall time. After simulation, it was found that the runoff coefficient all showed a logarithmic function with rainfall time. 3) Runoff coefficient of *F. rundinacea* grassland decreased with the increase of coverage, and it increased with the increase of rainfall intensity. Also, the lower the coverage was, the more significant the rainfall intensity affected runoff coefficient. But the larger the coverage was, the less significant the rainfall intensity affected runoff coefficient. 4) The ability of *F. arundinacea* grassland in reducing runoff coefficient was limited. With the increase of rainfall intensity, runoff coefficient reduction rates of two kinds of coverage grasslands were more close. When the rainfall intensities were 30, 60, 90 mm/hour, the differences in runoff coefficient reduction rate between the 60% and 90% coverage grassland were 25%, 24%, 23%, respectively. 5) The regression equation of the runoff coefficient of *F. arundinacea* with rainfall intensity, coverage and rainfall time was established under experimental conditions. After verification, the equation could be applied to predict the runoff coefficient of *F. arundinacea* grassland under the experimental conditions.

Key words simulating rainfall; coverage; rainfall intensity; runoff coefficient

高羊茅(*Festuca arundinacea*)是我国北方典型冷季型城市草坪草,不仅适应气候能力强,而且其抗热、耐旱性能明显优于其他草种,因此在国内城市草坪绿地中被广泛使用^[1-2]。目前,针对城市高羊茅草坪绿地减少地表径流量、削减暴雨径流峰值、减少水土流失等方面开展了一系列相关研究,得出高羊茅草坪绿地对防治水土流失具有不可或缺的作用^[3-5],但是直接针对高羊茅草坪绿地径流系数变化过程的研究还不多。径流系数是指某一时段内流域的径流深度与相应的降水深度的比值,用于描述降雨和径流之间的关系^[6-7],是雨洪控制利用理论分析和工程设计常用的参数,因此有必要对城市草坪绿地的径流系数进行相关研究。已有的有关径流系数的研究主要集中在定性或定量的研究径流系数与影响因子之间的关系。国外一些学者的研究表明,径流系数随降雨量和暴雨重现期的增加而增大^[8-9],并认为居民区绿地覆盖度增加10%可以减少4.9%的地表径流,绿地覆盖度再增加10%可以减少5.7%的地表径流^[10]。国内学者主要通过一系列的人工模拟降雨试验对径流系数进行相关研究,认为径流系数随雨强、覆盖度、降雨时间的增加而增加,其中覆盖度对径流系数的影响存在临界值^[11-13]。但是不同学者得出关于径流系数与影响因子之间关系的结论时存在一定的差异。例如,武晟等^[11]通过对不同下垫面的径流系数与雨强及降雨历时之间关系的研究,得出径流系数与单影响因素之间的关系可用双曲线模型进行模拟。张凯凯

等^[14]等对不同下垫面进行径流系数与降雨强度及降雨时间之间关系的研究,得出径流系数与降雨时间的变化关系符合对数函数关系。李广等^[15]通过人工模拟降雨试验,得出径流系数与雨强呈负指数函数关系。另外,也有不少学者对城区或大区域综合径流系数及其影响因子进行了相关研究^[16-18]。总体来讲,现有大多数研究都表明,雨强、覆盖度和降雨时间均对径流系数产生了一定影响,但是这些研究都没有结合城市绿地植被,且缺乏关于北方高羊茅草坪绿地降雨径流的进一步深入研究。因此本文通过不同覆盖度、不同雨强的人工模拟降雨试验,分析了高羊茅草地径流系数的变化过程,并通过计算得出其削减径流系数的能力值,同时建立雨强、覆盖度、降雨时间——径流系数回归方程,为北方高羊茅草地径流的进一步深入研究提供理论参考,也为北方绿地在雨水收集及雨水资源化利用方面提供指导意见。

1 试验材料与设计

1.1 试验材料

1)人工模拟降雨。试验在北京林业大学鹫峰试验基地进行,采用 QYJY-503C 人工模拟降雨装置,该装置能够保证雨滴到达终点的速度并能够相对准确的模拟天然降雨过程,其试验组成、降雨分布等详见文献[19]。

2)试验土槽。试验土槽为铁质,其规格为 2.0 m(长)×0.5 m(宽)×0.3 m(深)。试验土槽可调

节坡度,可调节范围为 0°~30°。

3)供试土壤及植被。试验土壤为取自北京市昌平区的砂壤土,土壤密度为 1.33 g/cm³,通过对供试土壤机械组成进行分析,其土壤颗粒组成为砂粒(2~0.02 mm)占 77.04%,粉粒(0.02~0.002 mm)占 22.58%,黏粒(<0.002 mm)占 0.38%。试验用草为北方典型草被高羊茅。

1.2 试验设计

试验前将土样过 10 mm 土筛,并装填于土槽。为保证在进行模拟降雨试验时土壤的入渗产流过程与自然坡面相似,需要在槽底铺 10 cm 的细沙,再分 4 层进行填土,以 5 cm 为一层并进行人工压实以确保下垫面土壤条件的变异性达到最小。填土完成后,行播高羊茅使其覆盖度分别达到 60%、90%,采用照相法^[20]对其覆盖度进行分析。每次试验前需要利用 TDR 测定土壤水分以保证每次试验土壤前期含水率基本一致。

试验时固定坡度为 5°,固定雨量为 90 mm,设置 2 种覆盖度(60%、90%)及对照组裸地,3 种雨强 30、60 和 90 mm/h,试验时保证土壤前期含水率基本一致。每组试验均设 1 组平行试验,共 18 场人工模拟降雨试验。

降雨开始后用秒表记录初始产流时刻。由于产流前期产流不稳定,因此产流前 20 min,每隔 2 min 取 1 次径流样品;产流时间为 20~60 min 时,每隔 5 min 取 1 次样;产流 60 min 以后每隔 10 min 取一次样。降雨结束后,利用量筒量取径流体积。

1.3 径流系数及径流系数削减率

$$\alpha = \frac{R}{P}$$

(1)

式中: α 为径流系数; P 为某一时段内的降雨量,mm; R 为同一时段内的径流量,mm。

$$\beta = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1} \times 100\%$$

(2)

式中: β 为削减率,%; α_1 为裸地的场降雨径流系数; α_2 为相对应高羊茅草地的场降雨径流系数。

2 结果与分析

2.1 覆盖度及雨强对初始产流时间的影响

从降雨开始到初始产流这一时段内,径流系数为 0,因此径流系数发生时间既是初始产流时间。根据表 1 可以看出在试验条件下,对于 60% 盖度草地,60 mm/h 雨强的初始产流时间比 30 mm/h 提前了 50 min,90 mm/h 比 60 mm/h 提前了 6 min;对于 90% 盖度草地,60 mm/h 雨强的初始产流时间比 30 mm/h 提前了 33 min,90 mm/h 比 60 mm/h 提前了 19 min。由此可以看出在相同覆盖度下随着雨强的增加初始产流时间显著提前,且初始产流时间提前幅度降低,因此可以推断当雨强增大到一定程度时,雨强对初始产流时间不再产生影响。根据表 1 还可以看出,在雨强一定的条件下,裸地的初始产流时间明显小于草地的,草地覆盖度越大,达到初始产流时间所需越短,草地延缓初始产流时间的效果越明显。通过上述分析可以得出覆盖度和雨强均是影响初始产流时间的因子。

表 1 高羊茅草地及裸地初始产流时间

Tab. 1 Initial runoff time of *Festuca arundinacea* grassland and bare land

覆盖度 Coverage	坡度 Slope degree/(°)	雨强 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	初始含水率 Initial moisture content/%	初始产流时间 Initial runoff time/min
裸地 Bare land	5	30	24.8	20
		60	24.9	8
		90	24.8	2
60%	5	30	24.9	60
		60	25.9	10
		90	24.8	4
90%	5	30	24.8	63
		60	24.8	30
		90	25.3	11

2.2 覆盖度及雨强对径流系数的影响

高羊茅草地及裸地径流系数随时间变化过程规律相似(图 1):在相同试验条件下高羊茅草地及裸地径流系数均在降雨初期迅速增加,随降雨时间的延长增长速度逐渐趋于平缓,这是由于试验属于均匀降雨,单位时间单位面积降雨量一致,且径流量随

着降雨时间的增加最后趋于稳定造成的^[21]。说明随着降雨时间的延长,地表径流量占降雨量的比例在逐渐增加,最后该比例无限趋于一定值。对高羊茅草地及裸地径流系数与降雨时间进行拟合(如表 2 所示),发现径流系数 α 与降雨时间 t 呈对数函数关系, R^2 均大于 0.9,拟合效果良好。

表 2 径流系数与降雨时间的回归分析

Tab. 2 Regression analysis on rainfall and runoff coefficient

雨强 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	覆盖度 Coverage	回归方程 Regression equation	R ²
30	裸地 Bare land	$r = 0.306\ 9\ln t - 0.890\ 9$	0.985\ 9
	60%	$r = 0.382\ 2\ln t - 1.568\ 2$	0.996\ 8
	90%	$r = 0.229\ 0\ln t - 0.940\ 9$	0.992\ 3
60	裸地 Bare land	$r = 0.355\ 7\ln t - 0.600\ 4$	0.940\ 0
	60%	$r = 0.270\ 2\ln t - 0.624\ 9$	0.997\ 5
	90%	$r = 0.352\ 3\ln t - 1.219\ 4$	0.998\ 5
90	裸地 Bare land	$r = 0.225\ 1\ln t + 0.094\ 3$	0.957\ 9
	60%	$r = 0.273\ 3\ln t - 0.448\ 8$	0.990\ 1
	90%	$r = 0.310\ 4\ln t - 0.870\ 5$	0.988\ 5

覆盖度是影响径流系数的重要因子之一,不同覆盖度对径流系数的影响程度不同。根据图 1 可以看出在相同雨强条件下径流系数随着覆盖度的增加而减少,且覆盖度越高,曲线斜率越小,说明植被覆盖度越大,径流系数变化速率也就越小。对同一覆盖度下不同雨强的径流系数进行差异性分析,发现在覆盖度 60%、90% 时雨强对径流系数的影响均有显著差异 ($P < 0.01$),同时显著性大小为 60% < 90%。说明随着覆盖度的增加,雨强对径流系数的影响逐渐降低,即覆盖度越低雨强对径流系数的影响越显著,反之则越不显著。这是由于植被覆盖度主要是通过阻滞地表径流、延长入渗时间以及水量的再分配来影响径流的^[22-23],同时由于高覆盖度的草地,对降雨的截留作用显著减小了到达地面的降

雨量,此外,植被还能增加地表粗糙度阻滞径流流速且其根系能增加土壤的渗透性^[10,24],因此高覆盖度草地更能降低降雨强度对地表径流的影响。经过分析,还可以看出 60% 盖度草地、90% 盖度草地,在雨强为 30 mm/h 时从产流开始到降雨结束其径流系数分别在 0.009 ~ 0.401、0.006 ~ 0.240 之间,分别增长了 97%、98%;在雨强为 60 mm/h 时从产流开始到降雨结束其径流系数分别在 0.035 ~ 0.572、0.013 ~ 0.362 之间,分别增长了 94%、96%;在雨强为 90 mm/h 时从产流开始到降雨结束其径流系数分别在 0.086 ~ 0.683、0.027 ~ 0.464 之间,分别增长了 87%、94%。由此可以看出草地覆盖度越大,从产流开始到降雨结束草地径流系数增长幅度越大;雨强越大,从产流开始到降雨结束草地径流系数

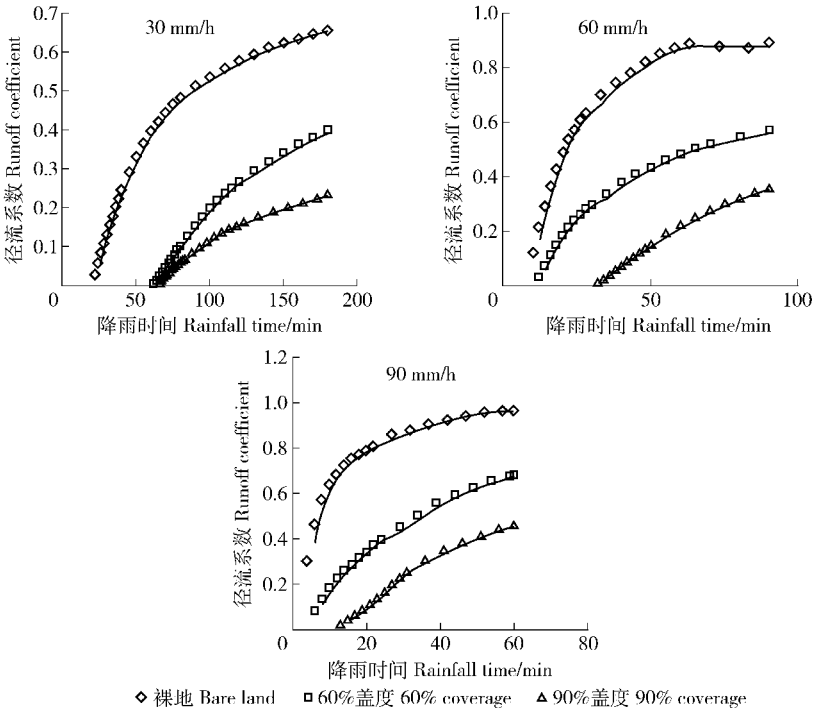


图 1 不同雨强下草地及裸地径流系数过程

Fig. 1 Process of runoff coefficient of grassland and bare land under different rainfall intensities

增长幅度越小。

根据图 1 还可以看出,在相同覆盖度条件下,径流系数随雨强的增加而增加,且雨强越大,径流系数由急速增加到趋于平缓所需时间越短。这是由于随着雨强的增加,单位时间内单位面积承雨量较多,且雨滴变大速度加快,土壤表层结构破坏,降低土壤入渗,增加径流^[25],使得径流流速增加更快,径流达到稳定产流时间提前导致的。在场降雨径流系数方面,裸地、60% 盖度草地及 90% 盖度草地在 60 mm/h 雨强下的场降雨径流系数比 30 mm/h 雨强的分别增加 46% ,20% ,29%; 在 90 mm/h 雨强下的场降雨径流系数比 60 mm/h 雨强的分别增加 2% ,27% ,23% 。由此可以看出随着雨强的增加裸地的场降雨径流系数增长程度显著降低,而草地的场降雨径流系数增长程度变化幅度不大,这是由于在雨强为 60 mm/h、90 mm/h 时裸地的场降雨径流系数接近于 1,几乎没有增长空间,而草地在这两种雨强下径流系数较小仍有较大的增长空间导致的。

2.3 高羊茅草地削减径流系数能力

高羊茅草地对场降雨径流系数的削减能力如表 3 所示。雨强为 30、60 和 90 mm/h 时,裸地的径流系数在 0.66~0.97 之间,60% 盖度高羊茅草地的径

流系数在 0.40~0.68 之间,90% 盖度高羊茅草地的径流系数在 0.24~0.46 之间。由此可以看出高羊茅草地能够有效降低径流系数,同时也说明雨强一定时,草地覆盖度越大,其削减径流系数的能力越强。在各雨强条件下 60% 盖度草地径流系数平均削减率为 35% ,90% 盖度草地径流系数平均削减率为 59% ,两者相差 24% 。覆盖度一定时,随着雨强的增加草地径流系数削减率逐渐降低,且径流系数削减率降低幅度增加。60% 盖度下 60 mm/h 比 30 mm/h 降低 3% ,90 mm/h 比 60 mm/h 降低 6% ; 90% 盖度下 60 mm/h 比 30 mm/h 降低 4% ,90 mm/h 比 60 mm/h 降低 7% 。此外,随着雨强的增加,两种覆盖度草地径流系数削减率的差距逐渐降低,在雨强为 30 mm/h、60 mm/h、90 mm/h 时分别相差 25%、24%、23% ,说明随着雨强的增加,草地对径流系数的削减是有限的,存在临界值,当雨强增加到一定程度,草地覆盖度对径流系数的削减效果不再显著。这是由于在强降雨过程中,植株经受不住降雨的冲击而倒伏,枯落物和腐殖质也被水流冲走,在降雨后期由于缺乏植株阻拦,径流快速流走,坡面积水降低,此时植株的抗倒伏能力成为影响蓄水能力的关键因素^[26]。

表 3 高羊茅草地对径流系数的削减能力

Tab.3 Reducing capability of *F. arundinacea* grassland on runoff coefficient

试验条件		裸地场降雨径流系数	草地场降雨径流系数	径流系数削减率
Experiment condition		Runoff coefficient of bare land	Runoff coefficient of grassland	Reduction rate of runoff coefficient/%
60% 覆盖 60% coverage	雨强 30 mm/h Rainfall intensity 30 mm/h	0.66	0.4	39
	雨强 60 mm/h Rainfall intensity 60 mm/h	0.89	0.57	36
	雨强 90 mm/h Rainfall intensity 90 mm/h	0.97	0.68	30
90% 覆盖 90% coverage	雨强 30 mm/h Rainfall intensity 30 mm/h	0.66	0.24	64
	雨强 60 mm/h Rainfall intensity 60 mm/h	0.89	0.36	60
	雨强 90 mm/h Rainfall intensity 90 mm/h	0.97	0.46	53

2.4 高羊茅草地径流系数模型建立

通过回归分析得出高羊茅草地径流系数关于降

$$\alpha = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 0.333C - 0.900I + 58.667 \\ -0.006C + 0.009I + 0.261\ln(t) - 0.852, & 0.27C - 0.7I + 51.619 \leq t \end{cases} \quad (3)$$

式中: C 为覆盖度,% ; I 为雨强,mm/h ; t 为降雨时间,min。方程 $R^2=0.880$,说明该回归方程有意义。根据方程发现,径流系数与覆盖度呈负相关,与雨强和降雨时间呈正相关,且径流系数与降雨时间呈对数关系,这与上述研究一致。对方程进行进一步检验,如图 2 所示。

根据图 2 发现 6 组试验预测径流系数与试验实测径流系数线性拟合效果较好, R^2 均十分接近 1,说明方程相关性较好。除了在雨强为 30 mm/h、覆盖度为 90% 时,线性方程的斜率小于 1 外,其他条件

雨强度、覆盖度、降雨时间的回归方程为:

下线性方程的斜率均大于 1,并接近于 1.3,说明模型预测值整体较实测值逐渐偏小,因此,在利用该模型时需要修正。

目前,在快速城市化进程中,由于城市地表环境结构与功能、城市土地利用方式等均遭到改变,导致降雨径流过程发生显著变化,如降雨径流总量及洪峰流量增大、峰现时间提前,加剧了城市洪涝灾害发生的频率和强度。根据本文研究,高羊茅草地能够有效延长初始产流时间、削减径流系数、改善城市水循环,对控制城市雨水径流及土壤侵蚀具有关键作

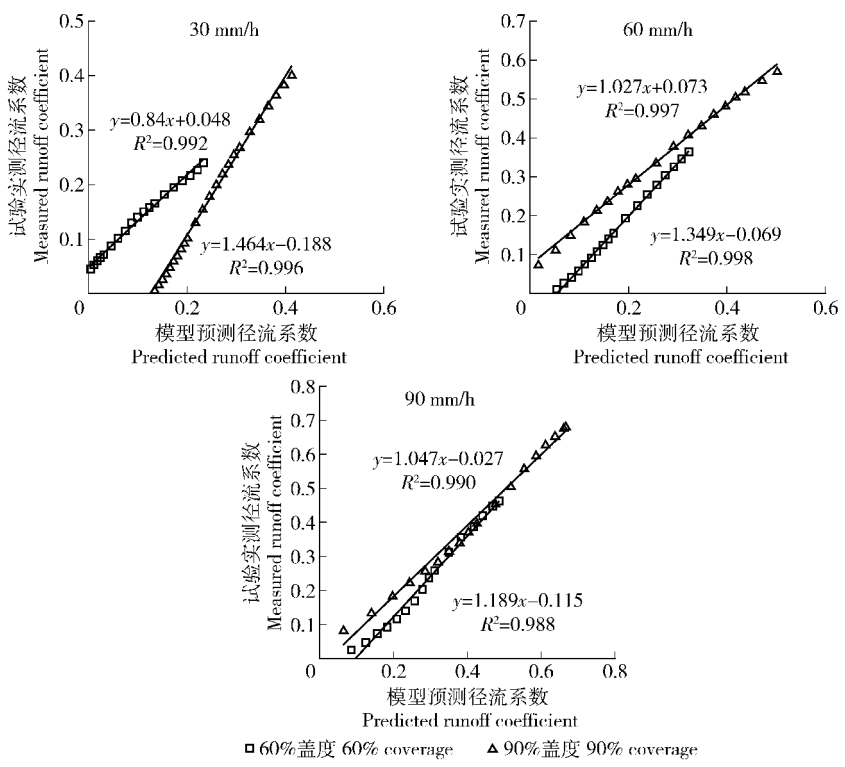


图 2 径流系数模型预测值与实测值对比

Fig. 2 Comparison in the predicted and measured values of runoff coefficient

用。另外,径流系数是城区设计排水系统的基础,因此通过建立高羊茅草地径流系数的预测模型,对于城市化地区水文、水利分析具有重要意义。

3 结论与讨论

1)裸地和高羊茅草地地表径流系数随时间变化规律相似,均随着降雨时间延长,径流系数先迅速增加然后逐渐趋于平缓。经过拟合裸地和高羊茅草地地表径流系数与降雨时间均呈对数函数关系。

2)草地对径流系数的削减能力有限,随着雨强的增加两种覆盖度草地径流系数削减率越相近,在雨强为 30、60 和 90 mm/h 时两种覆盖度草地径流系数削减率分别相差 25%、24%、23%。另外,覆盖度越低雨强对径流系数的影响越显著,反之则越不显著。因此,城市草坪绿地的设计应根据区域降雨强度控制好绿地覆盖度。

3)根据本文研究,高羊茅草地具有延长初始产流时间,削减径流系数的作用,且随着覆盖度的增加雨强对径流系数的影响降低,因此建议在城市草坪绿地规划和建设过程中尽量增加草坪绿地的比例,从而增加土壤入渗和地下水资源,减缓城区洪涝灾害,充分发挥绿地滞蓄暴雨功能。

4)在试验条件下,60% 盖度高羊茅草地的径流系数在 0.40~0.68 之间,90% 盖度高羊茅草地的径流系数在 0.24~0.46 之间。该研究的初步成果可

用于评价雨洪利用措施的效果,还可为有关部门进行雨洪利用措施的规划和设计提供参考。

5)目前大多数城市雨洪模型用于规划设计,而用于暴雨灾害预测预报的较少,且多数模型计算复杂,而本文通过建立高羊茅草地径流系数关于降雨强度、覆盖度、降雨时间的回归方程,经过验证可用于北方地区高羊茅草地地表径流系数的预测。

本研究只是研究了高羊茅草地在不同覆盖度和不同雨强条件下的径流系数变化过程和径流系数的削减效果,而对不同坡度、坡长的径流系数以及其他绿地条件的径流系数没有进行相关研究,还需进一步进行试验研究分析。

参 考 文 献

[1] KRANS J V, MORRIS K. Determining a profile of protocols and standards used in the visual field assessment of turfgrasses; a survey of national turfgrass evaluation program-sponsored university scientists[EB/OL]. (2007-11-30) [2017-01-10]. <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/.../1/IND44030817.pdf>.
[2] 余高镜,林奇田,柯庆明,等. 草坪型高羊茅的研究进展与展望[J]. 草业科学, 2005, 22(7):77-81.
YU G J, LIN Q T, KE Q M, et al. Progress and prospects of tall fescue turfgrass[J]. Pratacultural Science, 2005,22(7):77-81.
[3] OSTERKAMP W R, HUPP C R, STOFFEL M. The interactions between vegetation and erosion; new directions for research at the interface of ecology and geomorphology [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2012, 37(1):31-36.
[4] 朱永杰. 城市典型草坪绿地对地表径流削减作用研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.

- ZHU Y J. Experimental study of reduction on typical urban lawn green surface runoff [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [5] 霍云梅. 覆盖度、雨强及坡度对城市典型草坪绿地地面产沙影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- HUO Y M. Effects of coverage, rainfall intensity and slope degree on soil erosion of typical urban green spaces [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [6] 唐宁远, 车伍, 潘国庆. 城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(22): 4-8.
- TANG N Y, CHE W, PAN G Q. Runoff coefficient analysis for urban stormwater and flood control and utilization [J]. China Water and Waste Water, 2009, 25(22): 4-8.
- [7] 赵会娟. 地面坡度对草坪径流的影响试验研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- ZHAO H J. Experimental research on the impacts of ground slope on the runoff of turf [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [8] MAIDMENT D R. Urban storm drainage criteria manual [M]. Denver Colo: Urban Drainage and Flood Control District, 1991.
- [9] SCHAAKE J C, GEYER J C, KNAPP J W. Experimental examination of the rational method [J]. Journal of the Hydraul Division, 1967, 93(6): 353-370.
- [10] GILL S E, HANDLEY J F, ENNOS A R, et al. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure [J]. Built Environment, 2007, 33(1): 115-133.
- [11] 武晟, 汪志荣, 张建丰, 等. 不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(5): 55-59.
- WU S, WANG Z R, ZHANG J F, et al. Experimental study on relationship among runoff coefficients of different underlying surfaces, rainfall intensity and duration [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(5): 55-59.
- [12] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407.
- ZHU B B, LI Z B, LI P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 401-407.
- [13] 武晟. 西安市降雨特性分析和城市下垫面产汇流特性实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- WU S. Analysis of rainfall characteristics and experimental study of runoff-producing and flow concentration characteristics of city's underlying surface in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [14] 张凯凯, 马娟娟, 孙西欢, 等. 太原市高校不同下垫面条件下降雨径流系数试验研究[J]. 节水灌溉, 2014(12): 29-32.
- ZHANG K K, MA J J, SUN X H, et al. Experimental study on rainfall runoff coefficient under different underlying surface of universities in Taiyuan City [J]. Water Saving Irrigation, 2014(12): 29-32.
- [15] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用对黄土丘陵区径流系数及蓄积系数的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2014-2019.
- LI G, HUANG G B. Effects of rainfall intensity and land use on rainfall runoff and storage in loess hilly region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 2014-2019.
- [16] 樊慧静, 赵红莉, 蒋云钟. 不同气候情景下土地利用变化对径流系数影响研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 11-14.
- FAN H J, ZHAO H L, JIANG Y Z. Study on impact from change of land-use on runoff coefficient under different climate scenarios [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(4): 11-14.
- [17] ACKERMAN D, SCHIFF K. Modeling storm water mass emissions to the southern California bight [J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(4): 308-317.
- [18] CRISTINA C M, SANSALONE J J. Kinematic wave model of urban pavement rainfall-runoff subject to traffic loadings [J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(7): 629-636.
- [19] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 等. QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 31-36.
- HUO Y M, BI H X, ZHU Y J, et al. Characteristics of artificial rainfall produced by QYJY-503C simulation system [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 31-36.
- [20] 路炳军, 刘洪鹄, 符素华, 等. 照相法结合数字图像技术计算植被覆盖度精度研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 78-85.
- LU B J, LIU H H, FU S H, et al. Accuracy and feasibility analysis of plant coverage measurement by overhead photograph and image processing [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1): 78-85.
- [21] 朱永杰, 毕华兴, 常译方, 等. 90% 盖度狗牙根草地对次降雨径流削减作用[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 103-109.
- ZHU Y J, BI H X, CHANG Y F, et al. Effects of *Cynodon dactylon* grassland with 90% coverage on reducing single rainfall runoff [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(10): 103-109.
- [22] 张洪江, 孙艳红, 程云, 等. 重庆缙云山不同植被类型对地表径流系数的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 11-13.
- ZHANG H J, SUN Y H, CHENG Y, et al. Effect on surface runoff coefficient of different vegetation types in Jinyun Mountain of Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 11-13.
- [23] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 23-27.
- WANG S, WANG Q J, DONG W C, et al. Runoff and sediment generations and nutrient losses under different vegetation coverage in loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 23-27.
- [24] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- ZHANG X S, XUE T Z, MA C, et al. Impacts of rainfall intensity and grass coverage on runoff and sediment yield on typical sloping land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 66-70.
- [25] 李建生, 何增化. 不同雨强下红壤坡地径流及土壤侵蚀研究[J]. 环境, 2006(增刊1): 10-11.
- LI J S, HE Z H. Study on runoff and soil erosion of red soil slopes under different rainfall intensity [J]. Environment, 2006(Suppl. 1): 10-11.
- [26] 许翼, 徐向舟, 于通顺, 等. 强降雨条件下城市回填土草坪径流系数的影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 82-87.
- XU Y, XU X Z, YU T S, et al. Factor analysis of runoff coefficient subjected to heavy rainfall on urban lawns with backfill soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 82-87.

(责任编辑 范娟
责任编委 余新晓)