

黄土坡面不同土地利用下的降雨 入渗模拟与数值计算

李斌兵^{1,3}, 郑粉莉²

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 715600; 2. 西北农林科技大学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; 3. 武警工程学院, 陕西 西安 710086)

摘 要: 本文基于修正的 Green-Ampt 方程, 给出了改进的 Green-Ampt 模型在黄土坡面变雨强条件下入渗过程方程与数值求解的算法, 结合黄土高原纸坊沟小流域实测土壤数据, 借助计算数学和计算机编程, 建立了变雨强降雨入渗过程软件系统, 从软件系统运行结果中分析了坡耕地、草地和林地的入渗量和入渗率变化情况, 以及土壤初始含水率和饱和导水率对草地和林地入渗的影响。结果表明: 相同降雨情况下, 林地入渗量是草地的 2 倍, 是农地的 3 倍; 不同土地利用下土壤入渗率变化与入渗量类同; 草地入渗率对土壤初始含水率变化比较敏感, 林地入渗率对土壤饱和导水率变化比较敏感。

关键词: 降雨入渗; 改进 Green-Ampt 模型; 数值计算; 土地利用

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)05-0118-06

黄土高原高强度、低频率的暴雨是造成土壤侵蚀的主要原因, 从土壤侵蚀形成过程看, 当降雨强度超过土壤入渗能力时, 导致地面积水, 积水经过不断汇聚, 进而形成径流。在径流流向流域出口的过程中, 对地表的土壤进行了剥离, 造成土壤侵蚀。因此, 研究暴雨的入渗规律是进一步研究土壤侵蚀规律的基础性工作。目前国外研发的降雨入渗模型有 Green-Ampt 积水入渗模型, Horton^[1] 模型和 Philip^[2] 模型。这三个模型都有一定的物理意义, 相比之下, Green-Ampt 模型物理概念更明确, 特别是经过 Mein&Larson^[3] 和 Chu^[4] 的两次改进, 使其可应用于不均匀的降雨的入渗计算。国内应用 Horton 模型和 Philip 模型较多^[5-8], 而 Green-Ampt 模型尚未受到充分重视, 将 Green-Ampt 模型在黄土高原坡面进行实际应用、验证, 从中发现黄土高原入渗规律研究较少。事实上, 入渗研究从理论到实践, 从室内实验到流域现场仍有许多问题有待解决。本文旨在改进的 Green-Ampt 模型基础上, 给出变雨强情况下改进 Green-Ampt 模型的数值求解算法, 结合黄土高原纸坊沟小流域实测土壤数据, 借助计算数学和计算机编程, 求解模型, 从中得出黄土高原降雨入渗的变化规律。

1 变雨强降雨入渗过程模型建立

Green-Ampt 入渗模型基本形式为:

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s \left(1 + \frac{N_s}{F} \right) \quad (1)$$

其中, f 为入渗率 (mm/s); F 为累积入渗量 (mm); K_s 为土壤饱和导水率 (mm/s); t 是降雨历时 (s); $N_s = S_f(\theta_s - \theta_i)$ 为有效基质势 (mm); S_f 为土壤吸力参数 (mm); θ_s 为土壤饱和含水率, 即有效孔隙率 (%); θ_i 是土壤初始含水率 (%)。

Green-Ampt 模型是干土积水入渗模型, 其前提是在整个入渗过程中地表始终有积水。Mein&Larson 提出将其推广应用至降雨入渗的情况, 即设雨强恒定为 p , 在降雨初始阶段, 全部降雨入渗地下; 当 p 大于土壤入渗能力时, 地表才开始积水。而由模型可知, 入渗率随累计入渗量的增加而减小, 设 $t = t_p$ 时地表开始积水, 则整个入渗过程为:

$$\begin{cases} f = p & t \leq t_p \\ f = \frac{dF}{dt} = K_s \left(1 + \frac{N_s}{F} \right) & t > t_p \end{cases} \quad (2)$$

对公式(2)进一步求解, 依 f 的连续性, 应有:

$$P = K_s \left(1 + \frac{N_s}{F_p} \right) \quad t = t_p$$

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)(KZCX2-XB-05-03); 国家 973 项目(2007CB407201); 西北农林科技大学创新团队计划项目(01140202)

作者简介: 李斌兵, 女, 在读博士生, 主要研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: libinbing8@vip.sina.com。

通讯作者: 郑粉莉, 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀过程、预报及效应评价。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

即

$$F_p = \frac{N_s}{\frac{p}{K_s} - 1} \quad (3)$$

对公式(2) 第一式积分得:

$$F = \int_0^t f dt = \int_0^t p dt = pt \quad t \leq t_p \quad (4)$$

从而可知:

$$t_p = \frac{F_p}{p} \quad (5)$$

对公式(2) 第二式积分得:

$$K_s(t - t_p + \frac{F_p}{K_s} - \frac{1}{K_s}N_s \ln(1 + \frac{F_p}{N_s})) = F - N_s \ln(1 + \frac{F}{N_s}) \quad t > t_p$$

记

$$t'_p = \frac{F_p - N_s \ln(1 + \frac{F_p}{N_s})}{K_s} \quad (6)$$

则上式可写为:

$$K_s(t - t_p + t'_p) = F - N_s \ln(1 + \frac{F}{N_s}) \quad t > t_p \quad (7)$$

综合(4) 与(7) 可得:

$$\begin{cases} F = pt & t \leq t_p \\ K_s(t - t_p + t'_p) = F - N_s \ln(1 + \frac{F}{N_s}) & t > t_p \end{cases} \quad (8)$$

Mein&Larson 的最大贡献就是将 Green - Ampt 模型推广到降雨入渗计算中,但是它要求雨

强为恒定值,这显然不符合实际降雨情况,因此 Chu 将 Mein&Larson 改进的 Green - Ampt 模型再作推广,提出了变雨强条件下入渗模型。其基本思路是,首先将降雨分成若干个计算时段,然后对每个计算时段将地表状态分为 4 种情况:即① 开始无积水,结束无积水;② 开始无积水,结束有积水;③ 开始有积水,结束有积水;④ 开始有积水,结束无积水。当前时段内状态只能取 4 种情况之一。在每个时段中针对某种情况应用 Green - Ampt 模型进行计算,从而可以得到整个降雨过程的入渗规律。

2 变雨强降雨入渗过程模型算法和数值求解

Chu 虽然给出了改进的 Green - Ampt 模型的基本思路,但在实际求解过程中,还需进一步给出在计算机上编程实现的算法。我们认为,在变雨强条件下,可依据雨强的变化拐点,将降雨过程划分为若干个降雨时段,每个时段内降雨强度恒定,以图 1 为例,整个降雨时段从 t_1 开始至 t_{end} 结束, t_1 至 t_2 雨强为 P_1 ,依次为 $P_2, P_3 \dots P_{n-1}$, t_1 时刻累计降雨量为 R_1 ,依次为 $R_2, R_3 \dots, R_{end}$,不同时段对应着非积水下入渗和饱和积水入渗两种状态, t_p 为积水时间, t'_p 为无积水阶段的时间换算为积水情况下的虚拟时间。以任意时段 t_{i-1} 到 t_i 为例,说明算法如下:

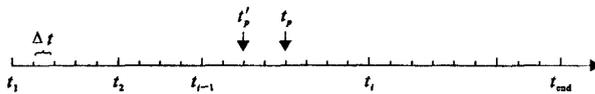


图 1 次降雨时段划分

Fig. 1 The division of rainfall event time step

1) 开始无积水,结束无积水;

2) 开始无积水,结束有积水;

这两种情况的判别用指标 C_u , C_u 为负时,发生第①种情况; C_u 为正则发生第②种情况。 C_u 表达式如下:

$$C_u = R_i - (R_{i-1} - F_{i-1}) - \left[\frac{K_s N_s}{p_i - K_s} \right] \quad (9)$$

① 情况表明,降雨强度未达到土壤的入渗能力,因此, t_i 时刻累积入渗量等于累积降雨量即: $F_i = R_i$;

② 情况表明这一时段有积水和无积水两种状态出现,则首先要确定积水发生时间 t_p 和虚拟积水

时间 t'_p ,其计算式见公式(3)、(5) 和(6)。计算出 t_p 及 t'_p 后, t_i 时刻累积入渗量用公式(8) 下式计算。

3) 开始有积水,结束有积水;

4) 开始有积水,结束无积水;

这两种情况的判别用指标 C_p , C_p 为正时,发生第③种情况; C_p 为负则发生第④种情况。

$C_p = t_i$ 时刻累积降雨量 - 本时段新入渗量 - t_{i-1} 时刻净雨量

用公式表示如下:

$$C_p = R_i - (F_i - F_{i-1}) - (R_{i-1} - F_{i-1}) \quad (10)$$

对于第③种情况,时段初有积水,时段末有积

水,表明此时段是在饱和积水的状态下入渗, t_i 时刻累积入渗量计算用公式(11)。

$$K_s(t) = F - N_s \ln(1 + \frac{F}{N_s}) \quad t > t'_p \quad (11)$$

第④种情况,时段初有积水,时段末无积水。表明此时段已不产生净雨, t_i 时刻累积入渗量表达如
下:

$$F_i = R_i - (R_{i-1} - F_{i-1}) \quad (12)$$

在进行计算时,公式(8)和(11)是一个超越方程,求解时可用牛顿迭代求 F 也可用龙格—库塔方法求解,然后利用公式(1)求 f 。

牛顿迭代:

即

$$F_{i+1} = F_i - \frac{n(F_i)}{n'(F_i)} \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$n(F) = F - N_s \ln(1 + \frac{F}{N_s}) - K_s(t - t_p + t'_p)$$

$$n'(F) = 1 - N_s \frac{1}{N_s + F}$$

当 $|F_{i+1} - F_i| < \epsilon$, 则 $F_{i+1} = F$

龙格—库塔方法求解:

$$F_{n+1} = F_n + \frac{1}{6}(R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4)$$

$$R_1 = \Delta t \times n(t_n, F_n)$$

$$R_2 = \Delta t \times n(t_n + \frac{1}{2}\Delta t, F_n + \frac{1}{2}R_1)$$

$$R_3 = \Delta t \times n(t_n + \frac{1}{2}\Delta t, F_n + \frac{1}{2}R_2)$$

$$R_4 = \Delta t \times n(t_n + \Delta t, F_n + R_3)$$

$$F_0 = \frac{N_s}{\frac{p}{K_s} - 1}$$

$$F_{n+1} = F_n + \frac{1}{6}(R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

其中:

$$R_1 = \Delta t \times K_s(1 + \frac{N_s}{F_n})$$

$$R_2 = \Delta t \times K_s(1 + \frac{N_s}{F_n + R_1/2})$$

$$R_3 = \Delta t \times K_s(1 + \frac{N_s}{F_n + R_2/2})$$

$$R_4 = \Delta t \times K_s(1 + \frac{N_s}{F_n + R_3})$$

本文基于变雨强降雨入渗过程模型和算法,利用计算机编程语言,结合实测数据,建立了变雨强降雨入渗过程软件系统,系统部分界面和部分结果见图 2 所示。

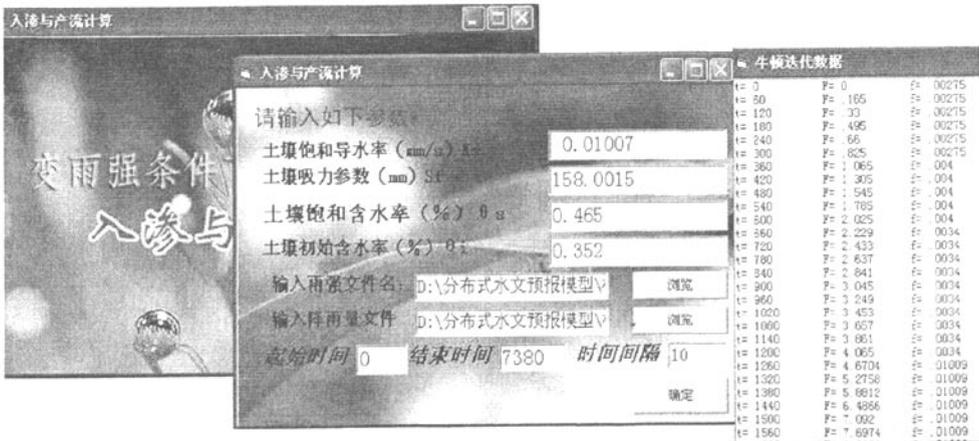


图 2 系统界面和结果显示
Fig.2 The interface of software

3 变雨强降雨入渗过程模型应用及验证

选取陕北黄土高原纸坊沟流域 1998 年 7 月 12 日的降雨,该次降雨从开始至 1 h 内为强降雨时段,

平均雨强为 1.08 mm/min,见图 3 所示。

利用小型野外模拟降雨试验装置在纸坊沟流域进行实测,得到了坡耕地、草地和林地的多个样点的降雨入渗率和土壤参数(表 1)。

表 1 纸坊沟流域实测土壤参数和土壤入渗率

Table 1 The measured soil parameter and infiltration rate in Zhifanggou watershed

土地利用方式 Landuse type	θ_i	θ_s	K_s (mm/s)	S_f (mm)	入渗率范围(mm/s) Infiltration scope
林地 Forest	0.331	0.465	0.01007	191.1711	0.012~0.030
草地 Grassland	0.358	0.439	0.00579	63.88524	0.006~0.015
坡耕地 Slope cultivated land	0.366	0.393	0.00405	37.90161	0.005~0.008

注:表中数据均为流域多个样点平均值。

Note: The figures in the table are mean values of date collected from different sample points.

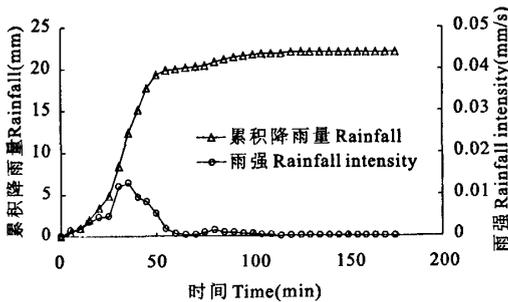


图 3 1998 年 7 月 12 日降雨数据

Fig.3 Rainfall process in July 12, 1998

将表 1 测得的土壤参数代入变雨强降雨入渗过程软件系统中,得到了次降雨过程中坡耕地、草地和林地的累积入渗量随时间变化过程数值(图 4);坡耕地、草地和林地的入渗率随时间变化过程数值(图 5);在其它参数相同情况下,调整草地的不同初始含水率数值,得到草地的不同初始含水率下,入渗率随时间变化过程数值(图 6);在其它参数相同情况下,调整林地的不同土壤饱和和导水率,得到林地的不同土壤饱和和导水率下的入渗率随时间变化过程数值(图 7)。

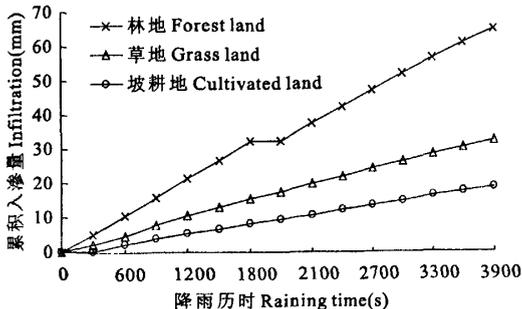


图 4 坡耕地、草地和林地的累积入渗量对比

Fig.4 Comparison of cumulative infiltration in slope cultivated land, grassland and forest land

图 4 和图 5 表明,在相同降雨情况下,土地利用对土壤入渗有较大影响。模型计算的林地累积入渗量分别是草地的 2 倍和坡耕地的 3 倍,同时林地的入渗速率也皆大于草地和坡耕地,与实际情况相吻合。由于 1998 年 7 月 12 日降雨前发生过前期降雨,导致实测的土壤前期含水量比较大,造成本次降雨的入渗率比较小。如草地在降雨开始后 10 min 内就出现了积水,而入渗率最小的坡耕地,积水时刻几乎和降雨同时出现,林地在降雨开始后 30 min 左右出现积水。

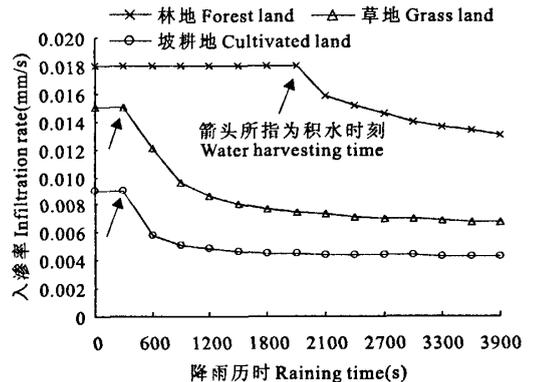


图 5 坡耕地、草地和林地的入渗率对比

(箭头所指分别为坡耕地、草地和林地积水时刻)

Fig.5 Comparison of infiltration rate in cropland, grassland and forestland

图表还表明,从图 6 看出,在其它条件相同情况下,将初始土壤含水率由 $\theta_i = 0.165$,依次增大到 $\theta_i = 0.2, \theta_i = 0.33, \theta_i = 0.4$,对应的草地入渗率随初始土壤含水量的增加衰减越快,而地表开始积水时刻依次提早。从草地的入渗率随时间变化曲线看,当 $\theta_i = 0.165$ 时,由于草地土壤初始含水率小,草地土壤入渗率为 0.9 (mm/min) ,地表开始积水时刻出现的晚,大约在降雨开始后 60 min 出现,而当 $\theta_i = 0.4$ 时,由于土壤初始含水率大,土壤入渗率为 0.84 (mm/min) ,地表开始积水时刻由降雨后的 60

min 出现提早到 15 min 出现。因此,草地的入渗率对土壤初始含水率变化比较敏感。

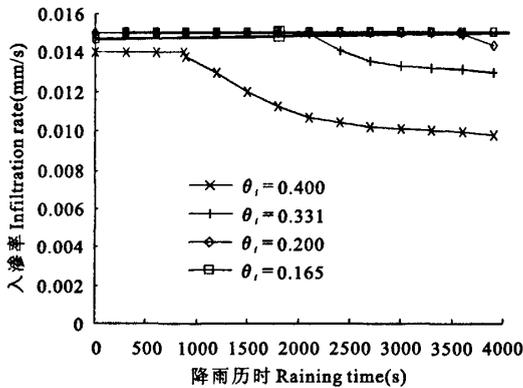


图 6 草地不同初始含水率下的入渗率随时间变化
Fig. 6 Comparison of infiltration rate in grassland under different initial soil moisture content

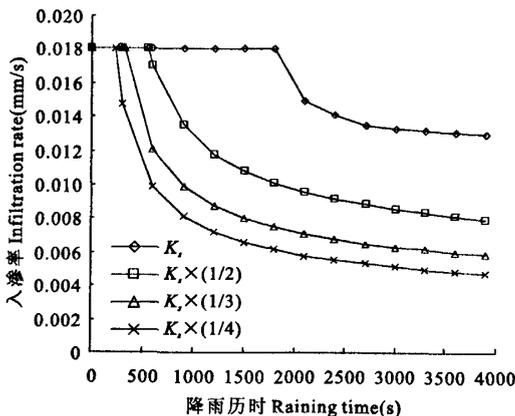


图 7 林地不同土壤饱和导水率下的入渗率随时间变化
Fig. 7 Comparison of infiltration rate forestland under different soil saturated hydraulic conductivities

图 7 显示,在其它条件相同情况下,将林地的土壤饱和导水率 K_s 由 0.6042 (mm/min)(实测值)依次减小 0.5 倍、0.33 倍和 0.25 倍时,入渗率相应衰减的越快,积水时间相应提前。从林地入渗率随时间变化曲线看,当 K_s 减小到原值的 0.5 倍后,地表开始积水时刻由降雨后的 30 min 出现,提前到降雨后 9 min 出现。因此,林地的入渗率对土壤饱和导水率变化比较敏感。

鉴于次降雨条件下,坡耕地、草地和林地不同土地利用方式下的实测累计入渗量、入渗率数据获取有限,只将模型计算得到的入渗率与不同坡耕地、草

地和林地实测入渗率进行了比较,发现模型计算入渗率在实测数据范围之内,说明了利用本文所建模型计算降雨入渗是可行的,且此模型可模拟土地利用、初始土壤含水量和土壤饱和导水率对降雨入渗过程的影响,对坡面水文过程研究有重要意义。

4 结论与讨论

本文基于修正的 Green - Ampt 方程,给出了改进的 Green - Ampt 模型在黄土高原地区变雨强条件下入渗过程方程与数值求解的算法,结合黄土高原纸坊沟小流域实测土壤数据,借助计算数学和计算机编程,建立了变雨强降雨入渗过程软件系统;利用软件系统的运行结果分析了坡耕地、草地和林地的入渗量和入渗率变化情况,以及土壤初始含水率和饱和导水率对草地和林地入渗过程影响,主要结论如下:

1) 在相同降雨情况下,黄土高原的林地入渗量大于草地和坡耕地,分别是草地的 2 倍和坡耕地的 3 倍。同时林地土壤入渗率也大于草地和坡耕地。

2) 草地的入渗率对土壤初始含水率 (θ_i) 变化比较敏感。在其它条件相同情况下,随着初始含水率的减小,草地的入渗率随时间变化衰减的越快,地表开始积水时间推迟。当 θ_i 由 0.4 减小到 0.165 时,地表开始积水时刻由降雨后的 15 min 出现推迟到 60 min。

3) 林地的入渗率对土壤饱和导水率 (K_s) 变化比较敏感。在其它条件相同情况下,随着林地的土壤饱和导水率的减小,林地的入渗率随时间变化相应衰减的越快,地表积水时刻相应提前。当 K_s 减小 0.5 倍后,地表开始积水时刻由降雨后的 30 min 出现,提早到降雨后 9 min 出现。

4) 土壤饱和导水率和土壤初始含水率是影响土壤入渗率和地表开始积水时刻的关键因子。

参考文献:

- [1] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1940,5:399-417.
- [2] Philip J R. The theory of infiltration[J]. Soil. Sci. 84, 1957. 254-264.
- [3] Mein R G. Lason C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973,9(2):384-394.
- [4] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resources Research, 1978,14(3):461-466.
- [5] 文 康,顾文燕,李 琪.西北干旱地区——陕北岔巴沟产流模型的研究[J].水文,1982,4:24-29.
- [6] 许继军,杨大文,刘志雨,等.长江上游大尺度分布式水文模型

- 的构建及应用[J].水利学报,2007,38(2):182—190.
 [7] 王玉杰,王云琦.重庆缙云山典型林分林地土壤入渗特性研究[J].水土保持研究,2006,13(2):193—256.

- [8] 杨 聪,于静洁,刘昌明,等.华北山区坡地径流规律试验研究[J].地理学报,2005,60(6):1021—1028.

Rainfall infiltration simulation and numerical computation at different landuse on the loessial hillslope

LI Bin-bing^{1,3}, ZHENG Fen-li²

(1. College of Tourism and Environmental Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Collage of Armed Police Forces of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710086, China)

Abstract: Based on modified Green - Ampt equations, infiltration process equation and numerical calculation method under variable rainfall intensity were given; and combining field soil data on Zhifanggou watershed and through computer language, the software system under unstable rainfall infiltration was developed. According to the software run results, analysis was also made of cumulative infiltration and infiltration rate under different forestland, grassland, and cropland as well as effects of initial soil water content and saturated hydraulic conductivity on infiltration at different landuse. The results showed that the cumulative infiltration in forestland was 2 times greater than that in grassland and 3 times in cropland. The infiltration rate in forestland was larger than that in grassland and cropland. Meanwhile, the effect of initial soil moisture content on infiltration rate in grassland was sensitive, and impacts of soil saturated hydraulic conductivity on infiltration rate in forestland was sensitive too.

Keywords: rainfall infiltration; modified Green - Ampt model; numerical method; landuse

(上接第 117 页)

Study on ecological environment influence of different age of hippophae in hilly and gully region on the Loess Plateau

LI Zhong, CHAO Shi-jun, DONG Jin-qun

(Qinghai Provincial Research and Design Academy of Environmental Sciences, Xi'ning, Qinghai 810007, China)

Abstract: In order to discuss the effect of hippophae with different ages to the ecological environment in hilly and gully region on the Loess Plateau, an experiment was made in a plot in Ansai station to study the soil moisture and nutrient change characteristics of the field with different ages of hippophae. The result indicated that the soil moisture content of hippophae forest land in the root system weak use level (0~20 cm) and normal use level (20~300 cm) showed a decline tendency along with aging of hippophae and increase of soil layer depth. The average exactable nitrogen accumulation quantity of 4~15 a-aged hippophae is 28.0 g/kg, while the 8 a-aged hippophae's exactable nitrogen, fast-acting P are 28.0 and 1.72 g/kg respectively; and the 12 a-aged hippophae's exactable nitrogen, fast-acting P are 29.2 and 1.18 g/kg respectively. Along with the increase of hippophae's age, the fast-acting P accumulation quantity assumes a drop tendency, but exactable nitrogen assumes an increase one, with the maximum value of accumulation quantity of 15 a hippophae being 30.2 g/kg. Tests in the region show that the soil assumes the alkalinity, the pH value changes between 8.0~8.6. which displays a trend of escalation along with the hippophae treeage growth.

Keywords: hippophae; soil moisture; soil nutrient; pH value