第 24 卷第 12 期
2004 年 12 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 24, No. 12
Dec., 2004

# 人工林地浑水入渗性能与通用入渗模型

王进鑫[1*]，黄宝龙[2]，王迪海[1]

（1. 西北农林科技大学资源环境学院，杨凌 712100；2. 南京林业大学森林资源与环境学院，南京 210037）

**摘要**：采用双环法，通过 130 场田间的浑水与清水入渗对比试验，对两种土壤质地的刺槐、侧柏人工林地的浑水入渗性能进行了研究。结果表明，含沙径流——浑水可显著削弱人工林地土壤的入渗性能，降低天然降水与土壤水的转换能力及人工林涵养水源的作用，其削减能力随着入渗水流含沙量、泥沙中小于 0.01 mm 物理性粘粒含量的增加或入渗历时的延长而增大，并受到土壤质地的强烈影响。在土壤质地相同条件下，人工林地浑水的入渗能力随人工林树种的不同而异。刺槐林地土壤入渗能力大于侧柏林地；与相同立地退耕还林后仅 1 a 的新造林地相比较，退耕还林后 13 a 生的侧柏林地，土壤浑水入渗和清水入渗能力均减小；但退耕还林后 13 a 生的刺槐林地，清水入渗能力明显增强，浑水入渗能力因入渗水流特性不同而异。通过 Levenberg-Marquardt 非线性参数拟合，求得了两种土壤质地条件下，3 种林分积水型浑水与清水入渗的通用模型。该模型既可用于清水入渗预报，又可用于不同含沙量和泥沙粒度组成浑水入渗能力的预测。

**关键词**：人工林；刺槐；侧柏；浑水；入渗性能；入渗模型

# Infiltrability of muddy water and universal model for both muddy water and tap water in planted forest site

WANG Jin-Xin[1], HUANG Bao-Long[2], WANG Di-Hai[1] (1. *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling* 712100, *China*; 2. *College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*).

***Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2841～2847.**

**Abstract**: Infiltration can affect soil water recharge and soil water availability to plant, surface runoff and soil erosion. Although there have been many reports on infiltration for forest sites, none of them is conducted with muddy water. Muddy water is a type of available water resource with sediment from surface runoff and is used for irrigation in the semiarid and arid areas or direct into plantation sites. This study used 130 field sites i) to compare the infiltration of muddy water with tap water on black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), oriental arborvitae (*Platycladus orientalis* Franco) plantation sites, ii) to understand the impact of sediment content, physical clay content of less than 0.01 mm in the sediment and tree species on infiltrability on forest soils with various texture classes on the Loess Plateau in China, and iii) to develop an universal model to describe water infiltration on the different forest soils in the region. The muddy water for the infiltration test was divided into four types according to sediment content, that is 50 g/kg, 100 g/kg, 150 g/kg and 200 g/kg; and each type of sediment content was further divided into three subtypes according to physical clay content, that is 220.0 g/kg, 249.0 g/kg and 263.0 g/kg for light loam in Ansai experimental station, and 419.0 g/kg, 446.0 g/kg and 481.0 g/kg for loam in Chunhua experimental station. Field infiltration was measured with a double ring infiltrometer at the water head (pressure) of 40 mm. A volumetric cylinder with an agitator was used to supply muddy water and recorded the amount of infiltration water manually.

**基金项目**：国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043602)；国家“十五”重点科技攻关资助项目(2001BA510B0103)；西北农林科技大学回国人员科研启动基金资助项目(080804)。

**收稿日期**：2003-12-26；**修订日期**：2004-10-28

**作者简介**：王进鑫(1962～)，男，甘肃镇原县人，博士，副教授，主要从事旱区人工林生态系统水分运移调控与生物节水理论技术研究。E-mail: jwang118@tom.com

**Foundation item**: the National Key Project for Basic Research in China (No. G1999043602); the Key Project of Tenth Five-year Plan of China (No. 2001BA510B0103); the Scientific Research Foundation of Northwest A & F University for Returned Oversea Scholar (No. 080804)

**Received date**: 2003-12-26; **Accepted date**: 2004-10-28

**Biography**: WANG Jin-Xin, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in regulative mechanism on water transport of planted forest ecosystem and theory and technology of saving water in arid region. E-mail: jwang118@tom.com

万方数据

The results showed that muddy water decreased the infiltration capability of soil with light loam and loam, decreased the transfer capability of rainfall to soil water and impaired the role of forest in water conservation. The infiltrability decreased with increasing sediment content, physical clay content and infiltration duration; and was affected by soil texture. Under given soil texture condition, infiltrability of muddy water in plantation sites was affected by tree species. Infiltrability under black locust is superior to that under oriental arborvitae. The universal infiltration models for both muddy water and tap water were put forward for three stands of two different soil belts at the first time. The models can be used to evaluate the infiltration capacity of different muddy water in a plantation sites and predict runoff on a small watershed with different plantations.

**Key words**: planted forest; *Robinia pseudoacacia*; *Platycladus orientalis*; muddy water; infiltrability; infiltration model

**文章编号**:1000-0933(2004)12-2841-07 **中图分类号**:S152.72, S273.5, S714.7 **文献标识码**:A

人工林因树种不同,其根系分布和改良土壤的能力也不相同,土壤入渗性能必然存在差异[1]。周择福、刘向东、王幼民、杨艳生、候喜禄、陈丽华、仇才楼等曾采用传统的入渗水源——清水,对油松[2,3]、刺槐[4,5]、山杨[6]、柠条[5]、水杉等[7~12]人工林地的土壤入渗性能作了大量的研究,表明林地土壤的渗透性能因林分类型不同而异,且明显优于农田和草地。近年来,基于含沙水流在灌溉上的应用,许多学者对浑水入渗进行了深入的研究[13~16]。然而,有关不同林地含沙水(径)流——浑水的入渗规律、浑水对林地土壤入渗性能的影响、浑水与清水入渗的关系、土壤质地和人工林树种对浑水入渗的影响等基本理论问题,至今尚未见报道。而对这些问题的研究,有助于正确认识广大水土流失区水土保持与水源涵养林地的实际入渗能力,充分利用不同土壤质地区域各人工林地浑水与清水入渗资料,推求不同侵蚀强度区域、不同浑水特性条件下流域的入渗与产流情况,为科学进行人工林地水量平衡计算和流域产汇流等研究提供基础资料。本文以 130 场野外浑水与清水入渗试验资料为基础,对这一问题进行了研究。

## 1 试验地概况

试验地位于陕西省安塞县沿河湾镇玉家河小流域和淳化县大店乡祁家沟流域,均为退耕还林地。分别代表了黄土高原退耕还林区域中最为典型的两种质地土壤——轻壤土和中壤土;两个地貌类型——丘陵沟壑区和高原沟壑区;两种不同的自然植被区——森林草原区和落叶阔叶林区。安塞属于黄土丘陵沟壑区,土壤质地轻壤,多年平均降雨量 505.3mm,平均蒸发量 1594.6mm,流域年均土壤侵蚀模数 8337t/(km$^2$ · a)。试区人工刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 林 23 龄,林分密度 1111 株/hm$^2$,林下草本植物盖度 50%,有薄层枯枝落叶;新造人工侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) 林,采用反坡梯田整地,林龄 1 a,株行距 2m×3m,地面裸露;淳化属于黄土高原沟壑区,土壤质地中壤,多年平均降雨量 600.6mm,平均蒸发量 1450.6mm,流域年土壤侵蚀模数约 5000t/(km$^2$ · a)。祁家沟人工刺槐林 13 龄,林分密度 1333 株/hm$^2$,林下草本植物盖度 90%,枯枝落叶层较厚;人工侧柏林 13 龄,林分密度 2000 株/hm$^2$,林下草本植物盖度较大,枯枝落叶稀少;新造侧柏林(CKt),采用反坡梯田整地,林龄 1 a,株行距 2m×2.5m,地面仅有少量草本植物。试验地土壤水分状况及土壤密度测定结果见表 1。

**表 1 浑水入渗测定试验地土壤密度与土壤质量含水量测定结果**

**Table 1 Soil density and soil water content before tests of plantation soil in experimentation plots**

| 土层深度 Soil depth (cm) | 安塞试区 Ansai test area | | | | 淳化试区 Chunhua test area | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 新造林地 New planted site | | 刺槐林地 Plantation site of *Robinia pseudoacacia* | | 新造林地 New planted site | | 刺槐林地 Plantation site of *Robinia pseudoacacia* | | 侧柏林地 Plantation site of *Platycladus orientalis* | |
| | 土壤含水量 SWC (g/kg) | 土壤密度 Soil density (mg/m$^3$) | 土壤含水量 SWC (g/kg) | 土壤密度 Soil density (mg/m$^3$) | 土壤含水量 SWC (g/kg) | 土壤密度 Soil density (mg/m$^3$) | 土壤含水量 SWC (g/kg) | 土壤密度 Soil density (mg/m$^3$) | 土壤含水量 SWC (g/kg) | 土壤密度 Soil density (mg/m$^3$) |
| 0~20 | 82.0 | 1.15 | 77.2 | 0.98 | 108.3 | 1.20 | 97.6 | 1.18 | 110.4 | 1.25 |
| 20~40 | 102.0 | 1.33 | 90.2 | 1.17 | 127.5 | 1.39 | 102.7 | 1.26 | 131.1 | 1.30 |
| 40~60 | 119.3 | 1.32 | 113.9 | 1.24 | 140.3 | 1.40 | 113.3 | 1.31 | 134.9 | 1.40 |
| 60~80 | 122.1 | 1.30 | 120.1 | 1.28 | 159.1 | 1.43 | 139.8 | 1.15 | 133.8 | 1.27 |
| 80~100 | 132.6 | 1.31 | 121.2 | 1.30 | 160.1 | 1.33 | 145.4 | 1.45 | 136.0 | 1.31 |
| 100~120 | 137.4 | 1.32 | 122.2 | 1.32 | 162.4 | 1.37 | 153.1 | 1.35 | 139.3 | 1.31 |

SWC is soil water content

## 2 材料与方法

万方数据

### 2.1　供试水样

入渗水样分清水(CK)和浑水两种。其中,浑水样是由两个试区典型土壤剖面、不同层位的风干土,按质量比配制,设计含沙量分别为 50 g/kg、100 g/kg、150 g/kg 和 200 g/kg。由于风干土含水量存在差异,故采集土样带回室内用烘干法测定实际含水量,对浑水的含沙量进行校正(表 2)。不同层位土壤的机械组成采用沉降法测定,用泥沙颗粒组成中<0.01 mm 物理性粘粒的含量表示泥沙粒度[17]。

### 2.2　试验方法

在两个试验区人工林地,各选择田面较为平整的栽植带 2 条,先清除枯枝及杂草,再对地面稍加平整,以便使供试水头一致。由于林木栽植带的浑水径流入渗属于有压入渗,故采用双环法(Double ring infiltrometer)[9,13,16,18~20]测定不同含沙量及泥沙颗粒组成条件下的入渗情况,以清水作对照(CK)。两个试验区共设入渗测点 130 个。其中,每一树种林地设置测点 26 个,同一处理设置测点 2 个(重复 2 次)。试验水头稳定在 40mm[13,15]。由于浑水径流中的泥沙易于沉淀,不宜采用马氏瓶自动供水,故改由量筒法人工供水。每次供水前反复搅拌,以免泥沙沉淀而改变入渗水样的含沙量。同时,依据不同土壤质地条件下的入渗快慢,调节供水时间间隔,保持水头基本稳定,水头由内环中央一根带有刻度的细钢丝标定,同一处理 2 次重复取平均值。

**表 2　入渗浑水水样的含沙量**

**Table 2　Sediment content of muddy water in infiltration experimentation**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 设计含沙量(g/kg) Design sediment content | 50 | 100 | 150 | 200 |
| 安塞试区实际含沙量(g/kg) Actual sediment content in Ansai | 49.5 | 99.0 | 148.5 | 198.0 |
| 淳化试区实际含沙量(g/kg) Actual sediment content in Chunhua | 46.5 | 93.0 | 139.5 | 186.0 |

## 3　结果与分析

### 3.1　浑水特性与林地土壤浑水累积入渗量

**3.1.1　浑水含沙量对累积入渗量的影响**　在土壤和植被组成一定的情况下,浑水含沙量常因降雨特性的不同而有较大差异。从图 1 可以看出,随着含沙量的增大,人工林地土壤浑水累积入渗量减小。表明含沙径流可显著降低人工林地天然降水与土壤水的转换效率,削弱人工林的涵养水源作用,且浑水含沙量越高,这种作用越明显。

**3.1.2　浑水泥沙中物理性粘粒含量对累积入渗量的影响**　土壤颗粒组成是土壤质地分级的重要依据。在黄土高原,土壤颗粒组成自西北向东南逐渐由粗变细,具有明显的水平地带性;从土壤剖面状况来看,土壤颗粒由上到下虽有一定幅度的变化,但总的来说差别并不大。这与黄土土壤剖面质地的均一性有关。然而,由于侵蚀性降雨的类型不同,其侵蚀力有所不同,从而导致入渗水流中泥沙的颗粒组成相差较大。据初步研究,泥沙颗粒组成中与入渗水流和沉积层阻渗特性密切相关的是<0.01mm 物理性粘粒含量[21~24]。图 2 是含沙量一定条件下不同物理性粘粒含量浑水的累积入渗曲线。从图 2 可以看出,随着浑水中物理性粘粒含量的增大,浑水累积入渗量减小,且减小幅度与物理性粘粒含量成反相关。

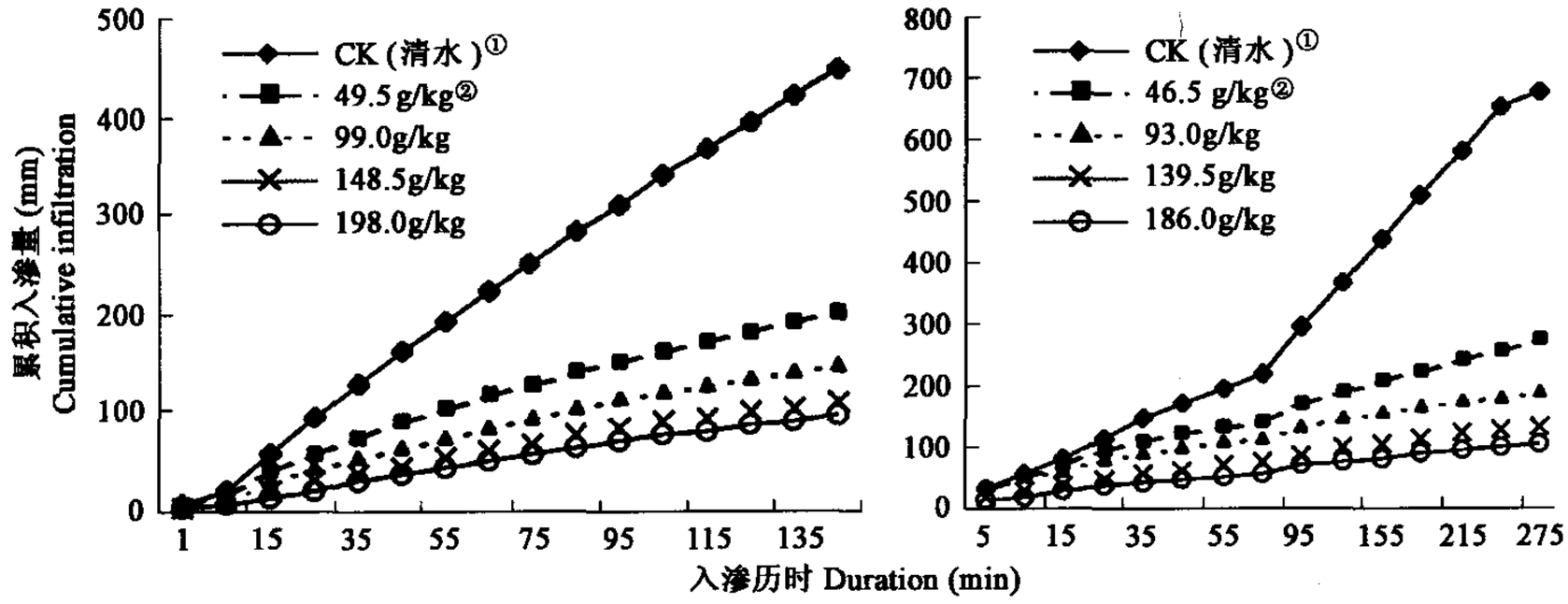


图 1　浑水含沙量对人工刺槐林地浑水累积入渗量的影响

Fig. 1　Influence of sediment content on cumulative infiltration of muddy water in *Robinia pseudoacacia* plantation site

① 清水 Tap water as control;② 浑水 Sediment content

### 3.2　人工林树种与林地土壤浑水累积入渗量和瞬时入渗速率

树种不同,其根系大小与分布、枯枝落叶累积量与分解速率以及对土壤理化性质的改良作用有较大差异,土壤入渗性能必然会受到影响,但影响程度并不清楚。对淳化相同立地条件下的新造林地、刺槐林地和侧柏林地浑水、清水入渗测定结果进行了统计(表 3)。从表 3 可以看出,在立地条件相同而造林树种不同的情况下,浑水累积入渗量确实有较大差异。其中,刺槐林地的

万方数据

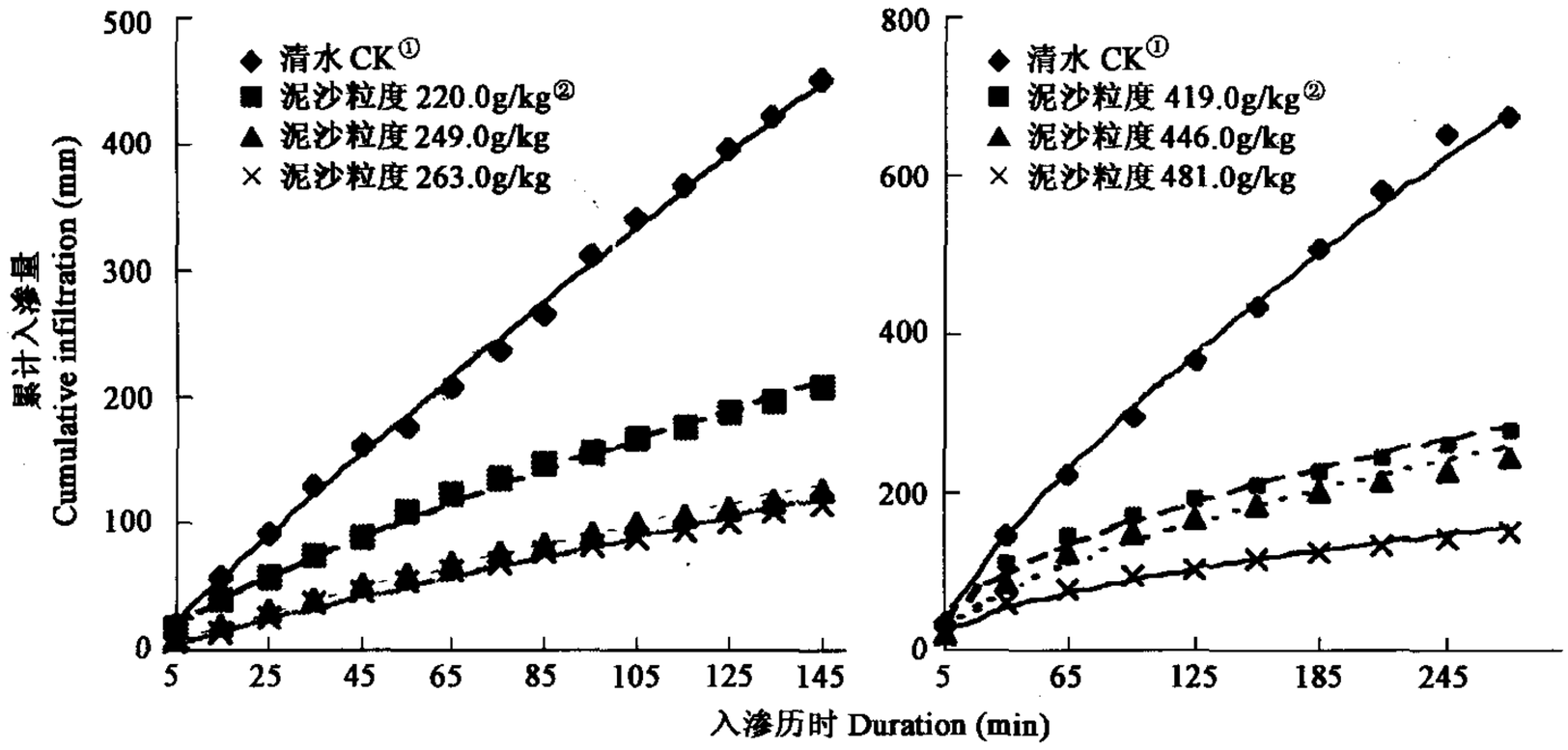


图 2 浑水泥沙中物理性粘粒含量对累积入渗量的影响

Fig. 2 Influence of physical clay content on cumulative infiltration of muddy water

①Tap water as control; ②Physical clay content of sediment

浑水累积入渗量远大于侧柏林地的浑水累积入渗量。通过对两林地土壤密度、土壤质量含水量及根系分布调查发现，侧柏林地0～80cm 土层的土壤密度均大于刺槐林地的土壤密度，同时侧柏林地表层土壤质量含水量也高于刺槐。由此说明，不同树种人工林地浑水累积入渗量的差异，是不同林分在土壤水分消耗、土壤物理性质改良等方面综合作用的结果。

与相同条件下退耕还林只有 1 a 的新造幼林地(对照)相比较，退耕还林后 13 a 生的侧柏人工林地土壤的累积入渗量，无论是清水还是浑水均有所减小；从侧柏林地的瞬时入渗速率来看，以初始入渗时段减小幅度最大，到达中后期则浑水含沙量＜100 g/kg 的处理有略高于新造林地的趋势，然而统计分析表明，中后期侧柏瞬时入渗速率与新造林地相比并无显著差异($p>0.05$)；而退耕还林后 13 a 生的刺槐人工林地清水入渗量和入渗速率则明显高于新造林地，而浑水入渗则随着入渗水流含沙量的不同而异。对中壤土，当含沙量＜150 g/kg、＜0.01mm 物理性粘粒含量＜446.0 g/kg 时，浑水累积入渗量与瞬时入渗速率均明显高于新造林地；当含沙量≥150 g/kg 时，累积入渗量显著小于新造人工林地($p<0.01$)，且瞬时入渗速率以初始入渗阶段减小幅度最大，中后期入渗速率则变化甚徼。

### 3.3 人工林地浑水入渗性能的综合分析与通用模型

从上述各项分析可以看出，人工林地浑水入渗与清水入渗相比，更为复杂。其入渗量不仅与浑水特性、土壤质地有关，而且与人工林树种有关。由于浑水入渗涉及因素多，田间试验工作量极大。因此，如能对已经取得的试验资料进行综合分析，采用物理数学的方法从中概化出能切实反映不同林分浑水入渗规律的通用模型，必将对进一步探索人工林地浑水入渗机理起到推动作用。

依据考斯加可夫入渗模型对安塞、淳化两地侧柏与刺槐林地浑水入渗分别建模。以清水入渗作对照。其结果列于表 4。

以表 4 各模型参数为基础，应用 Levenberg-Marquardt 非线性参数拟合统计分析，得出各林分浑水与清水入渗通用模型。

安塞刺槐林：

$$I_t = 5.854494\alpha \cdot T^{0.869135+\beta}$$

其中，

$$\alpha = 1 + 1.35091 \times 10^{-3}S - 1.09566 \times 10^{-6}S^2 + 3.91822 \times 10^{-3}P - 3.07520 \times 10^{-5}P^2 \quad R^2 = 0.9786, \quad F = 91.43$$

$$\beta = -6.02050 \times 10^{-5}S + 6.08043 \times 10^{-8}S^2 - 4.67661 \times 10^{-3}P + 1.83030 \times 10^{-5}P^2 \quad R^2 = 0.9642, \quad F = 53.79$$

淳化刺槐林：

$$I_t = 10.075583\alpha \cdot T^{0.748453+\beta}$$

其中，

$$\alpha = 1 - 9.36122 \times 10^{-3}S + 1.21360 \times 10^{-5}S^2 + 1.59766 \times 10^{-2}P - 3.20640 \times 10^{-5}P^2 \quad R_2 = 0.9123, \quad F = 20.81$$

$$\beta = -1.94141 \times 10^{-4}S + 1.63056 \times 10^{-6}S^2 - 1.72209 \times 10^{-3}P + 2.72478 \times 10^{-6}P^2 \quad R^2 = 0.9455, \quad F = 34.72$$

淳化侧柏林：

$$I_t = 7.190962\alpha \cdot T^{0.72056+\beta}$$

其中，

$$\alpha = 1 - 1.69513 \times 10^{-3}S - 3.64319 \times 10^{-6}S^2 + 3.10738 \times 10^{-3}P - 8.20304 \times 10^{-6}P^2 \quad R^2 = 0.9769, \quad F = 88.76$$

$$\beta = -1.60335 \times 10^{-3}S + 5.29231 \times 10^{-6}S^2 + 1.19110 \times 10^{-5}P - 5.25519 \times 10^{-8}P^2 \quad R^2 = 0.9400, \quad F = 31.31$$

式中，$S$ 为浑水含沙量(g/kg)，$P$ 为浑水泥沙中＜0.01 mm 物理性粘粒含量(g/kg)。

万方数据

在 99 %的置信度下,复相关指数 $R^2$ 和 $F$ 检验均达到极显著水平($R^2_{0.01}=0.7782$,$F_{0.01}=7.01$)。表明所拟合的 $\alpha$、$\beta$ 参数模型具有较高的拟合度。

然而,参数的拟合度高并不能直接反映所推求的累积入渗通用模型 $I_t$ 在预测和控制中也具有同样的精度。为此,各选取 39 个未参与回归模型构建的不同含沙量(轻壤土 0～198 g/kg,中壤土 0～186 g/kg)、不同物理性粘粒含量(轻壤土 0～263 g/kg,中壤土 0～481 g/kg)的累积入渗量实测值($y$)与通用模型的预测值($x$),建立一元直线回归方程 $y=a+bx$,采用 $t$ 检验确定方程参数 $a$ 是否显著地区别于 0、参数 $b$ 是否显著地区别于 1[25]。结果表明,淳化刺槐林、侧柏林累积入渗通用模型,预测值与实测值在显著水平 0.05 下无显著差异;安塞刺槐林通用模型,预测值与实测值在显著水平 0.001 下无显著差异。说明所推求的浑水与清水入渗通用模型具有较高的精度。

**表 3　人工林树种对浑水累积入渗量和瞬时入渗速率的影响(淳化)**

**Table 3　Influence of tree species on cumulative infiltration and infiltration rate of muddy water**

| 浑水含沙量 Sediment content (g/kg) | 泥沙粒度 Physical clay content(g/kg) | 入渗历时 Duration (min) | 新造林地($CK_t$) New planted site | | 13 龄侧柏林地 13-year-old *Platycladus orientalis* site | | 13 龄刺槐林地 13-year-old *Robinia pseudoacacia* site | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 累积入渗量 $I$ Accumulation infiltration (mm) | 入渗速率 $i$ Infiltration rate (mm/min) | 累积入渗量 $I$ Accumulation infiltration (mm) | 入渗速率 $i$ Infiltration rate (mm/min) | 累积入渗量 $I$ Accumulation infiltration (mm) | 入渗速率 $i$ Infiltration rate (mm/min) |
| 清水 Tap water | 0 | 5 | 33.96 | 6.79 | 25.20 | 5.04 | 34.04 | 6.81 |
| | 0 | 125 | 273.09 | 1.48 | 229.43 | 1.41 | 364.74 | 2.39 |
| | 0 | 185 | 342.32 | 1.15 | 312.58 | 1.36 | 507.94 | 2.49 |
| 46.5 | 419.0 | 5 | 27.72 | 5.54 | 16.37 | 3.27 | 32.74 | 6.55 |
| | 419.0 | 125 | 172.42 | 0.80 | 151.52 | 0.51 | 190.68 | 2.08 |
| | 419.0 | 185 | 218.30 | 0.75 | 180.10 | 0.49 | 226.01 | 1.66 |
| | 446.0 | 5 | 21.66 | 4.33 | 12.21 | 2.44 | 21.83 | 4.37 |
| | 446.0 | 125 | 164.11 | 0.42 | 104.45 | 0.55 | 167.59 | 0.66 |
| | 446.0 | 185 | 186.71 | 0.36 | 130.95 | 0.44 | 199.80 | 0.49 |
| 93.0 | 481.0 | 5 | 20.13 | 4.03 | 10.13 | 2.03 | 17.40 | 3.48 |
| | 481.0 | 125 | 103.54 | 0.42 | 96.14 | 0.49 | 103.80 | 0.39 |
| | 481.0 | 185 | 125.87 | 0.31 | 119.26 | 0.38 | 124.37 | 0.33 |
| | 419.0 | 5 | 23.07 | 4.61 | 14.30 | 2.81 | 32.48 | 6.50 |
| | 419.0 | 125 | 124.54 | 0.42 | 103.68 | 0.45 | 145.26 | 0.45 |
| | 419.0 | 185 | 147.87 | 0.38 | 126.54 | 0.36 | 165.52 | 0.31 |
| 139.5 | 446.0 | 5 | 20.25 | 4.05 | 9.35 | 1.87 | 11.43 | 2.29 |
| | 446.0 | 125 | 104.30 | 0.33 | 70.94 | 0.35 | 95.89 | 0.44 |
| | 446.0 | 185 | 121.01 | 0.25 | 90.16 | 0.30 | 115.89 | 0.31 |
| | 481.0 | 5 | 13.36 | 2.73 | 6.24 | 1.25 | 10.39 | 2.08 |
| | 481.0 | 125 | 67.18 | 0.22 | 61.35 | 0.24 | 72.89 | 0.34 |
| | 481.0 | 185 | 79.57 | 0.19 | 76.43 | 0.23 | 87.28 | 0.22 |
| 186.0 | 419.0 | 5 | 21.60 | 4.32 | 11.43 | 2.29 | 17.93 | 3.59 |
| | 419.0 | 125 | 113.12 | 0.33 | 76.66 | 0.35 | 98.23 | 0.36 |
| | 419.0 | 185 | 131.75 | 0.28 | 94.32 | 0.29 | 115.12 | 0.27 |
| | 446.0 | 5 | 17.89 | 3.58 | 6.24 | 1.25 | 7.28 | 1.46 |
| | 446.0 | 125 | 93.01 | 0.30 | 40.30 | 0.22 | 59.25 | 0.29 |
| | 446.0 | 185 | 106.90 | 0.22 | 54.34 | 0.23 | 73.55 | 0.21 |
| | 481.0 | 5 | 13.66 | 2.73 | 5.72 | 1.14 | 8.57 | 1.71 |
| | 481.0 | 125 | 63.56 | 0.19 | 32.76 | 0.15 | 42.67 | 0.20 |
| | 481.0 | 185 | 75.02 | 0.16 | 41.08 | 0.12 | 53.50 | 0.16 |
| | 419.0 | 5 | 19.96 | 3.99 | 8.06 | 1.61 | 12.47 | 2.49 |
| | 419.0 | 125 | 99.79 | 0.28 | 56.92 | 0.33 | 75.12 | 0.29 |
| | 419.0 | 185 | 115.59 | 0.24 | 72.77 | 0.24 | 89.16 | 0.22 |
| | 446.0 | 5 | 13.66 | 2.73 | 5.72 | 1.14 | 6.76 | 1.35 |
| | 446.0 | 125 | 73.70 | 0.27 | 35.88 | 0.19 | 48.36 | 0.22 |
| | 446.0 | 185 | 86.88 | 0.20 | 48.10 | 0.20 | 61.10 | 0.21 |
| | 481.0 | 5 | 10.36 | 2.07 | 5.72 | 1.14 | 6.76 | 1.35 |
| | 481.0 | 125 | 47.41 | 0.17 | 32.76 | 0.15 | 35.40 | 0.20 |
| | 481.0 | 185 | 57.46 | 0.14 | 41.08 | 0.12 | 45.33 | 0.14 |

## 4　结论

(1)人工林地浑水径流的入渗性能与浑水特性密切相关　浑水累积入渗量既与浑水含沙量成反相关,也与以浑水泥沙中<0.01 mm物理性粘粒含量所表示的泥沙粒度成反相关。泥沙粒度对浑水入渗的影响程度又与特定的入渗土壤质地条件相关联。浑水径流显著削弱了人工林地土壤的入渗能力,降低了人工林的水源涵养作用,减弱了地表水与土壤水及地下水的转化能

万方数据

力,且这种削弱作用随着含沙量的增大而增强。

**表 4 不同浑水特性条件下各人工林地浑水入渗模型**

**Table 4 Infiltration models of muddy water into plantation site**

| 林分 Stand | 泥沙粒度 Physical clay content(g/kg) | 含沙量 Sediment content(g/kg) | $I_i(t)=A_iT^{Bi}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $A_i$ | $B_i$ | $R$ | $N$ | $F$ |
| 安 | 0.0 | 0.0 | 5.854494 | 0.869135 | 0.99850 | 22 | 6300.36 |
| 塞 | 222.0 | 49.5 | 5.446320 | 0.732342 | 0.99941 | 20 | 15283.98 |
| 23 | 222.0 | 99.0 | 3.615798 | 0.755143 | 0.99887 | 20 | 7981.957 |
| 龄 | 222.0 | 148.5 | 3.078041 | 0.717659 | 0.99931 | 20 | 13011.216 |
| 人 | 222.0 | 198.0 | 2.627607 | 0.712846 | 0.99441 | 17 | 1330.238 |
| 工 | 249.0 | 49.5 | 2.144987 | 0.825753 | 0.99910 | 16 | 7744.119 |
| 刺 | 249.0 | 99.0 | 1.796862 | 0.831958 | 0.99806 | 16 | 3605.586 |
| 槐 | 249.0 | 148.5 | 1.653961 | 0.839151 | 0.99876 | 16 | 5620.181 |
| 林 | 249.0 | 198.0 | 1.633045 | 0.800167 | 0.99831 | 16 | 4124.589 |
| ① | 263.0 | 49.5 | 1.537520 | 0.878355 | 0.99829 | 15 | 3797.643 |
| | 263.0 | 99.0 | 1.100204 | 0.902182 | 0.99688 | 15 | 2075.914 |
| | 263.0 | 148.5 | 0.957197 | 0.901399 | 0.99913 | 15 | 7442.240 |
| | 263.0 | 198.0 | 0.764070 | 0.933073 | 0.99977 | 15 | 28527.324 |
| 淳 | 0.0 | 0.0 | 10.075583 | 0.748453 | 0.99930 | 28 | 18500.764 |
| 化 | 419.0 | 46.5 | 18.206571 | 0.490162 | 0.99285 | 18 | 1106.627 |
| 13 | 419.0 | 93.0 | 20.198579 | 0.409344 | 0.99242 | 18 | 1043.472 |
| 龄 | 419.0 | 139.5 | 9.681171 | 0.480654 | 0.99481 | 18 | 1528.695 |
| 人 | 419.0 | 186.0 | 6.664833 | 0.502421 | 0.99462 | 18 | 1475.378 |
| 工 | 446.0 | 46.5 | 11.019440 | 0.562307 | 0.99168 | 14 | 712.388 |
| 刺 | 446.0 | 93.0 | 5.307355 | 0.590890 | 0.99416 | 14 | 1018.349 |
| 槐 | 446.0 | 139.5 | 2.936427 | 0.619957 | 0.99859 | 14 | 4250.683 |
| 林 | 446.0 | 186.0 | 2.837956 | 0.588179 | 0.99892 | 14 | 5551.367 |
| ② | 481.0 | 46.5 | 8.960382 | 0.508424 | 0.99548 | 15 | 1428.993 |
| | 481.0 | 93.0 | 4.743595 | 0.561311 | 0.99761 | 15 | 2714.407 |
| | 481.0 | 139.5 | 3.887667 | 0.498738 | 0.99772 | 15 | 2846.657 |
| | 481.0 | 186.0 | 2.529107 | 0.545702 | 0.99657 | 15 | 1882.835 |
| 淳 | 0.0 | 0.0 | 7.190962 | 0.720560 | 0.99880 | 15 | 5388.975 |
| 化 | 419.0 | 46.5 | 5.347059 | 0.655571 | 0.99478 | 16 | 1331.666 |
| 13 | 419.0 | 93.0 | 5.964917 | 0.583241 | 0.99904 | 16 | 7310.693 |
| 龄 | 419.0 | 139.5 | 4.766159 | 0.566404 | 0.99970 | 16 | 22968.334 |
| 人 | 419.0 | 186.0 | 2.679016 | 0.623235 | 0.99850 | 16 | 4666.811 |
| 工 | 446.0 | 46.5 | 4.538407 | 0.646486 | 0.99958 | 15 | 15367.672 |
| 侧 | 446.0 | 93.0 | 3.759193 | 0.610680 | 0.99934 | 15 | 9816.088 |
| 柏 | 446.0 | 139.5 | 1.942844 | 0.638093 | 0.99667 | 15 | 1940.977 |
| 林 | 446.0 | 186.0 | 1.864331 | 0.621723 | 0.99727 | 15 | 2370.840 |
| ③ | 481.0 | 46.5 | 4.036904 | 0.649164 | 0.99736 | 15 | 2447.985 |
| | 481.0 | 93.0 | 2.528608 | 0.656267 | 0.99472 | 15 | 1221.778 |
| | 481.0 | 139.5 | 2.130573 | 0.565557 | 0.99905 | 15 | 6825.384 |
| | 481.0 | 186.0 | 1.998889 | 0.560033 | 0.99953 | 15 | 13922.626 |

① Denote plantation of 23-year-old *Robinia pseudoacacia at* Ansai; ② and ③ Denote plantations of 13-year-old *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus* orientalis at Chunhua, respectively

(2)人工林地浑水入渗能力随着人工林树种的不同而异 无论是浑水入渗还是清水入渗,刺槐人工林地土壤的入渗性能均大于侧柏林地。其中,与退耕还林只有 1 a 的新造幼林地相比较,退耕还林后 13 a 生的侧柏林地土壤清水、浑水累积入渗量均减小,而退耕还林后 13 a 生的刺槐林地清水入渗能力明显增强,但浑水入渗能力因入渗水流特性的不同而异。对中壤土,当浑水含沙量<150 g/kg,且泥沙中<0.01 mm 物理性粘粒含量<446.0 g/kg 时,刺槐林地浑水入渗能力增强;若浑水含沙量≥150 g/kg,则浑水入渗能力减小。

(3)通过对清水、浑水入渗综合分析,得出了 3 种林分积水型浑水与清水入渗通用模型。统计检验表明,在浑水含沙量 0~198 g/kg 范围内,实测值与预测值之间均无显著差异,进一步表明了所推求的浑水与清水入渗通用模型,既可用于常规清水入渗预报,又可预测不同浑水特性的浑水径流入渗量。

**References:**

[1] Chen Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(2): 246~352.

[2] Zhou Z F, Hong L X. Study on infiltration and infiltration simulation of soil water in different woodlands. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, **33**(1): 10~16.

[3] Liu X D, Wu Q X, Zhao H Y. A study on hydro-ecological functions of litters of artificial Chinese pine forest on the loess plateau. *Acta Conservationis Soli Et Aquae Sinica*, 1991, **5**(4): 87~92.

[4] Wang Y M, Liu B Z. *The eco-characteristics of protective forest on the loess plateau*. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1996. 236~239.

万方数据

[5] Hou X L, Bai G S, Cao Q Y. Contrast study on soil infiltration capacity and ant-scourability in *Robinia pseudoacacia*, *Caragana microphylla* and *Hippophae rhamnoides* woodlands. *J. of Soil and Water Conservation*, 1995,**9**(3):90～95.
[6] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Mechanism of water and soil conservation of forest vegetation on the loess plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001,**37**(5):140～144.
[7] Qiu C L, Liang Z H, Kang L X, *et al*. Influence of coastal protective forests on soil permeability in northern Jiangsu. *Chinese J. of Ecology*, 1997,**16**(2):13～16.
[8] Chen L H, Yu X X. A study on the infiltration property of forests for soil and water conservation in west Shanxi province. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995,**17**(1):42～47.
[9] Chen L H. A study on the infiltration pattern of forests for soil and water conservation in the loess area. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995,**17**(3):51～55.
[10] Guo Z S, Wu Q X, Ren S T. Influence of forest on infiltration capability of soil. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 1996,(3):27～31.
[11] Zhang W R, Pong H P, Yang C D, *et al*. The forest soil moisture regimes of Wolong natural reserve. *Forest Research*, 1990,**3**(2):103～112.
[12] Zhou G Y, Pan H C. Infiltration law of rainfall in the forest land. *Acta Conservationis Soli Et Aquae Sinica*, 1990,**4** (2): 79～83.
[13] Wang W Y, Zhang J F, Wang Q Y, *et al*. Experimental studies on infiltration capability of silt-laden water into the loess. *J. of Soil and Water Conservation*, 1994,**8**(1):59～62.
[14] Bai D, Li Z B, Hong X K, *et al*. Experimental research on infiltration capability of muddy water. *J. of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999,**15**(1):59～62.
[15] Wang Q J, Wang W Y, Shao M A, *et al*. Mechanism and simulating model for muddy water infiltration. *Transactions of the CSAE*, 1999,**15**(1):135～138.
[16] Fei L J. Research on the intermittent infiltration behaviours of laden water. *J. of Xi'an University of Technology*, 1995,**11**(3):280～288.
[17] Fei L J, Wang W Y. Effect of clay and sand grade of muddy-water on its characteristics of intermittent infiltration. *Transactions of the CSAE*, 1999,**15**(1):139～143.
[18] Qing Y D, Anlauf R, Richter J. A new method for scaling Philip's equation of infiltration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989, (9):1～8.
[19] Ankeny M D, Ahmed M, Kaspar T C, *et al*. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 1991,**55**:467～470.
[20] Liu X Z, Kang S Z. Contrast experimental research on continuous and intermittent infiltration under ponded conditions. *Advances in Water Science*, 1999,**10**(1):53～58.
[21] Yang M Q. The micro-structure of flocculation for fine sediment. *Journal of Sediment Research*, 1996,(3):32～37.
[22] Wang W Y, Zhang J F. The relativity of clay and sand grade and hydraulic conductivity for loess soil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991,(1):13～17.
[23] Han P, Ni J R. Grain size variation suspended sediment due to soil conservation in the middle reach of Yellow river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001,(8):69～74.
[24] Chen H S, Shao M A. Flocculation and settling properties of fine sediment. *Chinese J. of Soil Science*, 2002,**33**(5):356～359.
[25] Deng B. *The application of statistics on experiment and analysis*. Beijing: Chinese Chemical Industry Publishing House, 1982. 199～203.

**参考文献:**

[1] 陈玉福,董鸣. 生态学系统的空间异质性. 生态学报,2003,**23**(2):346～352.
[2] 周择福,洪玲霞. 不同林地土壤水分入渗模拟的研究. 林业科学,1997,**33**(1):10～16.
[3] 刘向东,吴钦孝,赵鸿雁. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层水文生态功能研究. 水土保持学报,1991,**5**(4):87～92.
[4] 王佑民,刘秉正. 黄土高原防护林生态特征. 北京:中国林业出版社,1996. 236～239.
[5] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原森林植被水土保持机理研究. 林业科学,2001,**37**(5):140～144.
[6] 候喜禄,白岗拴,曹清玉. 刺槐、柠条、沙棘林地土壤入渗及抗冲性对比试验. 水土保持学报,1995,**9**(3):90～95.
[7] 仇才楼,梁珍海,康立新,等. 苏北沿海防护林对土壤渗透性的影响. 生态学杂志,1997,**16**(2):13～16.
[8] 陈丽华,余新晓. 黄土地区水土保持林地土壤水分入渗性能的初步研究. 北京林业大学学报,1995,**17**(1):42～47.
[9] 陈丽华. 黄土地区水土保持林地土壤入渗规律的研究. 北京林业大学学报,1995,**17**(3):51～55.
[10] 郭忠升,吴钦孝,任锁堂. 森林植被对土壤入渗速率的影响. 陕西林业科技,1996,(3):27～31.
[11] 张万儒,庞鸿宾,杨承栋,等. 卧龙自然保护区植物生长季节森林土壤水分状况. 林业科学研究,1990,**3**(2):103～112.
[12] 周国逸,潘淮寿. 林地土壤的降雨入渗规律. 水土保持学报,1990,**4**(2):79～83.
[13] 王文焰 ,张建华,王全九,等. 黄土浑水入渗能力的试验研究. 水土保持学报,1994,**8**(1):59～62.
[14] 白丹,李战斌,洪小康,等. 浑水入渗规律试验研究. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,**15**(1):59～62.
[15] 王全九,王文焰,邵明安,等. 浑水入渗机制及模拟模型研究. 农业工程学报,1999,**15**(1):135～138.
[16] 费良军. 浑水间歇入渗特性研究. 西安理工大学学报,1995,**11**(3):280～288.
[17] 费良军,王文焰. 泥沙粒度组成对浑水间歇入渗特性的研究. 农业工程学报,1999,**15**(1):139～143.
[18] 秦耀东,Anlauf R, Richter J. Philip 入渗公式标定计算的改进. 水利学报,1989,(9):1～8.
[20] 刘贤赵,康绍忠. 连续与间歇积水入渗对比试验研究. 水科学进展,1999,**10**(1):53～58.
[21] 杨美卿. 细泥沙絮凝的微观结构. 泥沙研究,1996,(3):32～37.
[22] 王文焰,张建丰. 黄土的粒度组成与水分运动参数的相关性. 水利学报,1991,(1):13～17.
[23] 韩鹏,倪晋仁. 水土保持对黄河中游泥沙粒径影响的统计分析. 水利学报,2001,(8):69～74.
[24] 陈洪松,邵明安. 细颗粒泥沙的絮凝沉降特性. 土壤通报,2002,**33**(5):356～359.
[25] 邓勃. 数理统计方法在分析测试中的应用. 北京:化学工业出版社,1982. 199～203.

万方数据