金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究

刘芝芹[1,2]，郎南军[1,2,3]，彭明俊[3]，温绍龙[3]，李甜江[3]，吴云飞[2]

（1. 昆明理工大学 环境科学与工程学院，云南 昆明 650093；
2. 西南林业大学，云南 昆明 650224；3. 云南省林业科学院，云南 昆明 650204）

摘　要：对金沙江流域典型森林生态系统的土壤水文特征进行了研究。结果表明，研究区不同森林类型的土壤容重随着土层深度的增加而逐渐增大，土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层深度的增加而逐渐减小；土壤水分入渗受土壤容重的影响，随容重增加，稳渗率降低；不同森林类型土壤前 120 min 平均入渗速率介于 0.78～2.42 mm/min 之间，稳渗率介于 0.10～0.53 mm/min 之间；无论是平均入渗率还是稳渗率均表现为：华山松林地＞滇杨林地＞圣诞树林地＞水冬瓜林地＞荒坡地；土壤入渗的渗润阶段发生在 0～5 min；渗漏阶段约发生在 5～80 min；渗透阶段发生在 80 min 以后。采用 Kostiakov 模型拟合双环入渗法测得的入渗过程效果最佳，其次为 Philip 模型，而用 Horton 模型的拟合效果最差。

关键词：金沙江；森林；土壤水分；入渗特征

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)02-0043-05　　**中图分类号**：S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.010

Infiltration Characteristics of Different Forest Soils in Jingsha River Basin

LIU Zhi-qin[1,2], LANG Nan-jun[1,2,3], PENG Ming-jun[3], WEN Shao-long[3], LI Tian-jiang[3], WU Yun-fei[2]

(1. *Institute of Environment Sciences and Engineering, Kunming University of Sciences and Technology, Kunming, Yunnan* 650093, *China*; 2. *Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*; 3. *Yunnan Academy of Forestry, Kunming, Yunnan* 650204, *China*)

Abstract: Soil hydrological characteristics were studied for different forest ecosystems in Jingsha River basin. Results showed that soil bulk density increased with the increase in soil depth, while total soil porosity and capillary porosity decreased. Average infiltration rates of different forest soil types ranged from 0.78 to 2.42 mm/min and stable infiltration rates ranged from 0.10 to 0.53 mm/min. Average and stable infiltration rates presented such an order as: *Pinus armandii* forest land＞*Pobulus yunnenensis* forest land＞*Acacia bealbata* forest land＞*Aluns cremastogyne* forest land＞wasteland. The transient phase of infiltration occurred in the first 5 min, the gradual phase occurred between 5 and 80 min, and the stable phase occurred after 80 min. Kostiakov Model best fitted the infiltration process determined by double-ring method compared with Philip and Horton Model.

Keywords: **Jingsha River; forest; soil moisture; infiltration characteristic**

土壤水分入渗是地表径流和地下径流之间分配降水或其它形式地面供水的过程，对水分循环和土壤流失过程具有十分明显的作用[1]，研究土壤水分入渗特性是探讨流域产流机制的基础和前提，确定不同森林类型土壤水分入渗参数及评价土壤水分入渗能力对于探讨流域水文过程的调节机制具有十分重要的意义[2]。我国已经在黄土高原、三峡库区江南红壤区和紫色土区开展了大量土壤水分入渗的研究工作，取得了丰富的理论依据和实践经验。赵鹏宇等[3]在黄土丘陵区对不同土地利用方式的土壤入渗规律进行了研究，结果表明植被覆盖地平均入渗率是刈割地的 1.2 倍，是翻耕地的 2.0 倍；杨海龙等[4]通过对三峡库区森林流域土壤渗透性能的研究表明土壤入渗速率回归方程表现为乘幂形式，相关性较好；傅斌等[5]利用人工模拟降雨研究了坡度、降雨、耕作方式对紫色土坡耕地入渗过程的影响表明雨强对入渗过程有

收稿日期：2013-05-07　　修回日期：2013-05-23

资助项目：国家西部大开发科技专项“云南省不同类型区生态恢复重建模式与天然林保护监测、预警研究”(2000-k01-05-05)；云南省教育厅科学研究基金项目(2011Y276)；云南省自然科学基金重点项目(2005C0013Z)

作者简介：刘芝芹(1977—)，女(汉族)，湖北省荆门市人，博士研究生，副教授，主要从事水土保持与生态恢复方面的研究。E-mail：lzq-xl@163.com。

通信作者：郎南军(1958—)，男(汉族)，四川省巴中县人，博士，研究员，博士生导师，主要从事水土保持、森林生态等方面研究。E-mail：nanjunlang@126.com。

重要影响。但目前在我国云贵高原金沙江流域土壤入渗性能的研究较少。而云贵高原金沙江流域土层薄,土壤透水能力强,蓄水能力差,雨季降水入渗补给是土壤水资源的唯一来源,但由于干湿季降水的不均匀分布,造成季节性干旱。因此分析土壤的特性及其水分入渗特征对于研究该地区流域产流机制,水分运移过程以及水土资源协调管理具有重要意义。本研究以云贵高原金沙江流域5种不同森林类型的土壤渗透性能进行了研究,以阐明云贵高原金沙江小流域土壤入渗的变化特征和规律,为该地区植树造林和生态环境的恢复提供理论依据。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

试验地选择在云南省曲靖市会泽县的金钟镇,地理位置为26°27′N,103°24′E。研究区域设在全国生态林业工程功能观测网络一级监测站头塘小流域内。属金沙江一级支流牛栏江流域,为中山山地地貌,海拔1 950～2 600 m。该区属亚热带季风山地气候,干湿季明显。年均气温12.7 ℃,最冷月为1月,平均气温4.6 ℃;最热月为7月,平均气温19.1 ℃。年均降水量822.1 mm,雨季降水约占90%,年蒸发量1 861.9 mm,为降水量的2.3倍。母岩以紫色砂页岩为主,另有少量的玄武岩,主要土壤类型有紫色土、红壤和棕壤。在金沙江头塘小流域的天然次生林中,共有维管束植物137种,隶属于63科,121属。在流域内选择华山松(*Pinus armandii*)、水冬瓜(*Aluns cremastogyne*)、滇杨(*Populus yunnanensis*)、圣诞树(*Acacia dealbata*)纯林4种典型森林及林外荒坡地土壤作为调查研究对象。

1.2 试验设计

2013年1—3月选择该区域内有代表性的4种森林类型及荒坡地(对照)作为观测点。不同森林的林分类型不同,其树木生长状况,林内的水热光合条件,林下枯落物等都有所不同,这些因素都对土壤的孔隙度有着直接影响,同时林木根系以及腐烂的腐殖质对土壤质地也会产生一定影响,而地表覆盖能有效减弱水流对土壤的扰动。分别调查4种不同森林类型和荒坡地样地的基本情况,同时测定不同森林类型的土壤物理性质及土壤入渗速率,分析不同森林类型土壤水分入渗特征。试验前对观测点预先进行人工洒水以消除土壤前期含水量对入渗的影响,然后持续测定不同森林类型的土壤含水量,当土壤含水量接近设计含水量时,开始试验。观测点均选在坡度大约为10°～20°的坡地,4种不同森林类型和荒坡地样地的基本情况详见表1。

表1 不同森林类型概况

森林类型	海拔/m	坡向	坡度/(°)	林下植被	盖度/%
华山松林	2 230	S	20	爆杖花(*Rhododendron spinuliferum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等	80
水冬瓜林	2 210	S	20	白苞蒿(*Artemisia lactiflora*)、黄毛草莓(*Fragaria nilgerrensis*)等	65
滇杨林	2 200	W	15	胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、平枝栒子(*Cotoneaster horizontalis*)等	85
圣诞树林	2 250	S	10	鬼针草(*Bidens pilosa*)、戟叶蓼(*Polygonum thunbergii*)等	70
荒坡地	2 200	S	20	野青茅(*Deyeuxia pyramidalis*)、假钩蒿草(*Kobresia uncinoides*)等	30

1.3 测定项目及计算方法

采用烘干法测定土壤含水量,采用环刀法测定土壤容重、孔隙度等物理性质[6];采用双环法测定土壤水分入渗情况,并采用定量加水记时法测定入渗速率并绘制入渗能力曲线。数据与图表均采用统计分析软件SPSS 13.0以及Excel处理和分析。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性状对土壤稳渗率的影响

土壤孔隙是土壤养分、水分和空气以及微生物、植物根系等的通道或贮存库,它直接反映了整个土体的结构状况,是衡量土壤肥力的重要指标之一。由5种不同森林土壤物理性状的测定结果可知(表2),不同森林类型土壤0—60 cm毛管孔隙度均值为42.56%～51.25%,其中以华山松林最大,为荒坡地的1.2倍,其由大到小的顺序为:华山松林>滇杨林>圣诞树林>水冬瓜林>荒坡地;不同森林类型的土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层厚度的增加而逐渐减小。各类森林土壤的总孔隙度均比荒坡地高,5种土壤平均总孔隙度的大小顺序为:华山松林>滇杨林>圣诞树林>水冬瓜林>荒坡地,表明森林的土壤物理性状和结构要优于荒坡地。

土壤容重反映土壤在单位体积内排列的松紧程度,容重减小时土壤总孔隙度及大孔隙量相应的增大,土壤入渗速率增大;容重增大时,土壤入渗速率随之减小。由表2可以看出,5种不同地类的土壤容重随着土层厚度的增大亦逐渐增大。5种不同森林土壤平均容重的大小依次为:荒坡地>水冬瓜林>圣诞

树林>滇杨林>华山松林。将不同土壤容重与土壤稳渗率进行拟合分析,拟合结果表明,土壤容重与稳渗率呈显著的指数函数关系($R^2=0.924\ 3$)。这与王纪杰等[7]在对桉树人工林土壤渗透性能及其影响因子进行研究的结论相一致,不同土层土壤渗透性随土层加深而降低。

表 2　5 种森林类型不同土层的土壤物理性状

森林类型	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm^{-3})	毛管空隙度/%	非毛管空隙度/%	总空隙度/%
华山松林	0—20	0.90	57.25	5.23	62.48
	20—40	1.04	49.54	3.92	53.46
	40—60	1.18	46.96	2.93	49.89
	均值	1.04	51.25	4.03	55.28
水冬瓜林	0—20	1.02	52.51	5.30	57.81
	20—40	1.35	46.80	3.51	50.31
	40—60	1.61	40.32	1.06	41.38
	均值	1.33	46.54	3.29	49.83
滇杨林	0—20	0.89	60.17	5.96	66.13
	20—40	1.19	52.31	3.89	56.20
	40—60	1.39	40.25	1.85	42.10
	均值	1.16	50.91	3.90	54.81
圣诞树林	0—20	1.02	59.63	5.39	65.02
	20—40	1.27	49.24	3.94	53.18
	40—60	1.35	38.56	1.96	40.52
	均值	1.21	49.14	3.76	52.90
荒坡地(对照)	0—20	1.12	50.14	3.98	54.12
	20—40	1.37	42.28	2.25	44.53
	40—60	1.65	35.27	1.32	36.59
	均值	1.38	42.56	2.52	45.08

2.2　不同森林类型的入渗速率比较

入渗是降雨落到地面进入土壤形成土壤水的过程,是降雨转化为径流的一个重要的中间环节。土壤入渗是土壤非常重要的物理特征参数之一,入透性能的好坏直接关系到地表径流量的多少,土壤入透性能越好,地表径流量就会越少,土壤的流失量也会相应减少[8]。初渗率和稳渗率是反映土壤入渗能力最直接的指标。研究区各森林类型土壤的入渗性能详见表 3。从表 3 可以看出,华山松林前 120 min 平均入渗速率(2.42 mm/min)较滇杨林(2.16 mm/min)、圣诞树林(2.11 mm/min)、水冬瓜林(1.23 mm/min)、荒坡地(0.78 mm/min)分别高出 1.12,1.15,1.97 和 3.10 倍;不同森林类型的稳渗率也表现出同样的趋势。从研究结果可知,平均入渗率和稳渗率均表现为:华山松林地>滇杨林地>圣诞树林地>水冬瓜林地>荒坡地,这与张治伟[9]在岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能的研究中得出的结论一致,不同森林类型对土壤入渗性能影响较大。同时表明有林地土壤的物理性状和结构要优于无林地,由此证明了植被在改良土壤上的重要作用[10-11]。森林林地由于其地上植被盖度较大,土壤表层积累的枯枝落叶形成的腐殖质以及表层土壤所聚集的植物根系对土壤均有巨大的改良作用,通过对土壤的结构改善而有利于土壤水分的迅速下渗。土地利用方式影响着土壤水分入渗,已有研究也指出,未受干扰的自然土壤有机质较高,入渗速率高[12]。荒坡地由于人畜践踏,土壤孔隙率很小,水分入渗很少,故其土壤的物理性状得不到改良,导致渗透性能不及有林地,其初始入渗速率仅为 3.02 mm/min。不同森林类型由林分组成不同,其生物特性也不同,因而土壤入渗规律有一定的差异,总体来看针叶林的土壤入渗能力要明显高于阔叶林。

表 3　不同森林类型土壤水分入渗状况　mm/min

森林类型	初始入渗率	平均入渗率	稳渗率
华山松林	9.60	2.42	0.53
水冬瓜林	5.88	1.23	0.17
滇杨林	10.67	2.16	0.50
圣诞树林	9.25	2.11	0.39
荒坡地	3.02	0.78	0.10

2.3　不同森林类型土壤水分入渗特征

水分渗入土壤是水分在分子力、毛管力和重力的综合作用下在土壤中运动的物理过程,入渗按土壤水分受力情况及运行特征可分为 3 个阶段:渗润阶段、渗漏阶段和渗透阶段[13]。在初始的渗润阶段,由于土壤含水量很低,土壤水分未能充满土壤非毛管孔隙,土壤水分处于非饱和状态,渗透速率变化剧烈,这个阶段发生在渗透开始的 0—5 min 内;在渗漏阶段,由于土壤含水量增加,下渗速度逐渐减小,渗透速率的变化过程较为平稳,土壤水分主要受毛管力的作用继续作不平稳的流动,直到全部毛管孔隙充满水分,这个阶段持续 60—80 min 左右;在渗透阶段,土壤含水量达到田间持水量以上,水分主要在重力作用下作渗透运动,最后下渗速度趋于稳定。

图 1 为 4 种森林及荒坡地土壤水分入渗率随时间变化曲线。由图 1 可以看出,其土壤水分入渗过程比较类似,随时间延续,水分不断进入土壤,土壤水分容量减小,入渗速率逐渐降低。滇杨林地、圣诞树林地、华山松林地、水冬瓜林地初期入渗速率较大,均达到 5.88 mm/min 以上;3 个阶段表现的比较明显,渗漏阶段持续 60—80 min 左右,到 80—100 min 后土壤水分入渗进入稳定入渗阶段。

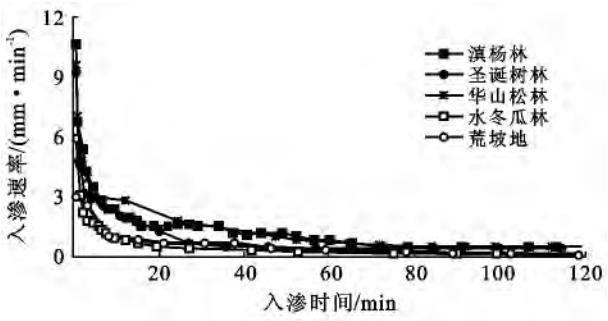


图 1 不同土地利用方式土壤入渗过程线

2.4 不同森林类型土壤水分入渗模拟

根据试验具体情况，运用 3 种模型近似模拟土壤入渗过程。

(1) Kostiakov 入渗模型[14]

$$f=at^{-b} \tag{1}$$

式中：f——t 时刻的土壤入渗速率(mm/min)；t——入渗时间(min)；a，b——参数。

(2) Philip 入渗模型[15]

$$f=0.5st^{-1/2}+f_c \tag{2}$$

式中：s——吸湿率(%)；f_c——稳定入渗速率(mm/min)。

(3) Horton 入渗模型[16]：

$$f=f_c+(f_0-f_c)\exp(-kt) \tag{3}$$

式中：f_0——初始入渗率(mm/ min)；t——时间，k——系数。

采用实测的土壤入渗过程数据与 3 种模型进行拟合，得出了不同模型的模拟精度和参数估计值(表 3)。Kostiakov 入渗模型中 a 为经验入渗常数，即第一个单位时段内的平均入渗速率，a 值的大小主要受土壤结构、孔隙度和非毛管孔隙度等的影响；b 值的大小表示入渗速率随时间减小的程度，b 值越大，则入渗速率随时间减小的程度越快。由表 4 可见，参数 a，b 的变化较有规律。参数 a 变化范围在 4.315～8.209之间，a 在滇杨林最大，荒坡地最小，可以反映入渗初期的差异，与滇杨林初始入渗率最大，荒坡地初始入渗率最小的规律相一致；b 在 0.563～0.708 之间变动，其中水冬瓜林和荒坡地比较接近，数值也最大，说明水冬瓜林和荒坡地土壤入渗速率随时间减少最快，可能与湿润状态下土壤结构变化有关，与已有研究趋势一致[9,17]。

表 4 不同森林类型土壤水分入渗方程表达式

森林类型	Kostiakov 模型			Philip 模型		Horton 模型	
	a	b	R^2	s	R^2	k	R^2
华山松林	7.689	0.565	0.975	9.342	0.868	0.039	0.806
水冬瓜林	4.549	0.708	0.992	7.667	0.748	0.042	0.639
滇杨林	8.209	0.563	0.959	10.887	0.664	0.037	0.577
圣诞树林	6.489	0.622	0.960	8.247	0.707	0.040	0.548
荒坡地	4.315	0.669	0.890	3.075	0.840	0.031	0.876

注：经显著性检验，Kostiakov 模型的 p 值均小于 0.01，表明用该模型模拟入渗速率随时间的变化极显著；Philip 模型和 Horton 模型的 p 值小于0.05，模拟效果显著。

从表 4 中可以看出，不同的方程对于不同树种林分土壤入渗过程的模拟精度有所差异，Philip 模型和 Horton 模型均对华山松林和荒坡地的模拟精度较高($R^2>0.8$)，对滇杨林、圣诞树林和水冬瓜林的模拟精度偏低；Kostiakov 模型对 5 种森林类型的模拟精度都较高，R^2 值都超过或接近 0.9。因此可以得出，研究区域的用双环入渗法得出的土壤入渗过程用 Kostiakov 模型拟合的效果最佳，其次为 Philip 模型，而用 Horton 模型模拟的效果最差。Kostiakov 模型能较好的模拟该流域各森林类型的土壤水分入渗过程。吕刚[18]的研究也表明，Kostiakov 模型可以较好模拟老秃顶子自然保护区不同植被类型不同层次土壤入渗速率与时间的变化过程，刘丽红等[19]在岩溶槽谷区不同土地利用方式土壤入渗规律的研究中也表明 Kostiakov 比 Horton 和 Philip 公式能更好地拟合不同土地利用类型的土壤入渗过程。

3 结 论

(1) 研究区不同森林类型的土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层厚度的增加而逐渐减小；森林土壤的总孔隙度都比荒坡地的高，5 种森林土壤平均总孔隙度的大小顺序为：华山松林＞滇杨林＞圣诞树林＞水冬瓜林＞荒坡地，表明森林的土壤物理性状和结构要较荒坡地的好。

(2) 5 种森林的土壤容重随着土层厚度的增大亦逐渐增大。其平均容重的大小依次为：荒坡地＞水冬瓜林＞圣诞树林＞滇杨林＞华山松林。不同土层土壤渗透性随土层加深而降低；水分入渗受土壤容重的影响，随容重增加，稳渗率降低，两者呈现显著的指数函数关系。

(3) 不同森林类型其土壤水分入渗特征不同。不同森林类型土壤前 120 min 平均入渗速率介于 0.78～2.42 mm/min 之间,稳渗率介于 0.10～0.53 mm/min 之间;华山松林平均入渗速率(2.42 mm/min)较滇杨林(2.16 mm/min)、圣诞树林(2.11 mm/min)、水冬瓜林(1.23 mm/min)、荒坡地(0.78 mm/min)分别高出 1.12,1.15,1.97 和 3.10 倍;不同森林类型的稳渗率也表现出同样的趋势,无论是平均入渗率还是稳渗率均表现为:华山松林地>滇杨林地>圣诞树林地>水冬瓜林地>荒坡地。金沙江流域是西南流域是典型的生态退化区,治理退化的生态环境对其经济和社会发展有着重要的意义。在进行金沙江流域生态环境的治理时,营建人工林是一项有效的措施。

(4) 土壤渗透初始的渗润阶段发生在渗透开始的前 0—5 min 时段以内;渗漏阶段持续发生在渗透开始后的 60—80 min 左右;在渗透阶段,土壤含水量达到田间持水量以上,下渗速度趋于稳定,该阶段主要发生在入渗 80 min 以后。

(5) 研究区域用双环入渗法得出的土壤入渗过程用 Kostiakov 模型拟合的效果最佳,其次为 Philip 和 Horton 模型。

[参 考 文 献]

[1] 张洪江,王礼先.长江三峡花岗岩坡面土壤流失特性及其系统动力学仿真[M].北京:中国林业出版社,1997:34-36.

[2] John D V. New linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity[J]. Journal of Hydrology, 2010,384(2):1-13.

[3] 赵鹏宇,徐学选,刘普灵.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2009,29(1):40-44.

[4] 杨海龙,朱金兆,毕利东.三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J].水土保持学报,2003,17(3):63-66.

[5] 傅斌,王玉宽,朱波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J].农业工程学报,2008,24(7):39-43.

[6] 姜海燕,赵雨森,陈祥伟,等.大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2007,21(3):149-153.

[7] 王纪杰,俞元春,陈容.不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2011,25(2):78-84.

[8] 陈洪松,邵明安.黄土坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.

[9] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-77.

[10] Liu Zhiqin, Lang Nanjun, Wang Keqin. Infiltration Characteristics Under Different Land Uses in Yuanmou Dry-Hot Valley Area[C]// GCN : Lecture Notes in Electrical Engineering. 2013:567-572.

[11] Su Ninghu. Theory of infiltration: Infiltration into swelling soils in a material coordinate[J]. Journal of Hydrology, 2010,395(1):103-108.

[12] Jimenez C C, Tejedor M, Morillas G, et al. Infiltration rate in and soils: Effect of changes in vegetation cover (Tenerife Spain)[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,61(3):153-158.

[13] 王健,吴发启,孟秦倩,等.不同利用类型土壤水分下渗特征试验研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):159-163.

[14] Kostiakov A N. On the dynamics of the coeffient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from adynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Soil Sci., 1932,97(1): 17-21.

[15] Philip J R. The theory of infiltration about captivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Sci., 1957,84(4), 257-264.

[16] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of in filtration capacity[J]. Soil Sci., Soc. Am. Proc., 1940,5(3):399-417.

[17] 陈建刚,李启军,侯旭峰,等.妫水河流域不同植被覆盖条件下土壤入渗及模型的比较分析[J].中国水土保持科学,2004,2(3):22-26.

[18] 吕刚,张由松,祝业平. 老秃顶子自然保护区不同森林类型土壤贮水与入渗特征研究[J] 水土保持通报 2011,31(1):109-113.

[19] 刘丽红,蒋勇军,王翱宇,等.岩溶槽谷区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2010,30(4):51-57.