

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 03. 011

金沙江不同林分的土壤入渗特征研究*

王琛¹, 吴云飞², 李甜江³, 郎南军¹, 刘芝芹¹, 何亚波³

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 昆明理工旭正工程咨询有限公司, 云南 昆明 650051;
3. 云南省林业科学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 通过对金沙江头塘小流域3种典型林分类型的土壤进行入渗试验研究, 从而进行金沙江头塘小流域人工生态林保水保土的生态效益比较和综合评价, 以期金沙江流域的水土保持提供强有力的理论依据。结果表明, 各林分对水分的涵养、调节能力的大小为云南松林>银荆林>旱冬瓜林>荒草地; 对影响土壤入渗的因子作相关分析和主成分分析, 结果都可以得到土壤的有机质含量、总孔隙度、容重和土壤颗粒对土壤的入渗性能决定作用最大; 林分土壤的初始入渗速率与稳定入渗速率和平均入渗速率呈显著和显著正相关关系, 可见土壤入渗过程特征, 初始入渗阶段是地表水分下渗的主要阶段。

关键词: 土壤入渗特征; 云南松林; 银荆林; 旱冬瓜林; 荒草地; 金沙江

中图分类号: S 152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2019) 03-0069-09

Soil Infiltration at the Different Forest Stand of Jinsha River

WANG Chen¹, WU Yun-fei², LI Tian-jiang³, LANG Nan-jun¹, LIU Zhi-qin¹, HE Ya-bo³

(1. Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, P. R. China;

2. Xuzheng Engineering Consulting Limited in Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650051, P. R. China;

3. Yunnan Academy of Forestry, Kunming Yunnan 650201, P. R. China)

Abstract: Based on the experimental study on soil infiltration of 3 typical forest types in the Toutang watershed of Jinsha river, the ecological benefit comparison and comprehensive evaluation of artificial ecological forest for water and soil conservation in the Toutang watershed of Jinsha river were conducted, so as to provide a strong theoretical basis for soil and water conservation in the Jinsha river basin. The results showed that the water conservation and regulation ability of each stand was *Pinus yunnanensis* forest > *Acacia dealbata* forest > *Alnus nepalensis* forest > unused grassland. Through correlation analysis and principal component analysis of factors affecting soil infiltration, it can be concluded that soil organic matter content, total porosity, bulk density and soil particles have the greatest influence on soil infiltration performance. The initial infiltration rate of forest land soil had a significant and extremely significant positive correlation with the stable infiltration rate and the average infiltration rate. This study showed that the initial infiltration stage is the main stage of surface water infiltration.

Key words: soil infiltration; *Pinus yunnanensis* forest; *Acacia dealbata* forest; *Alnus nepalensis* forest; unused grassland; Jinsha River

中国长江上游金沙江流域的水土流失问题已成为西南高原区生态环境退化的突出问题。金沙江流

域是长江的主要水源补充地, 如今还成了主要泥沙策源地, 该流域早已被认定为中国西南地区生态环

* 收稿日期: 2019-01-15

基金项目: 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)”。

第一作者简介: 王琛(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 1176945805@qq.com

通讯作者简介: 吴云飞(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事环境评估及水土保持研究。E-mail: wuyunfei530000@126.com

境最脆弱、水土流失最严重的区域之一,据有关资料报道^[1],观测长江三峡水库入库站多年平均来沙,宜昌断面以上的来沙量中有45.8%来自该区域。金沙江流域的云南省部分跨度 $98^{\circ}40' - 105^{\circ}15'E$, $24^{\circ}30' - 29^{\circ}15'N$,覆盖云南省西北部、北部和东北部边缘的7个地州市,48个县,流域面积 $11.09 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省土地面积的28.94%。水土流失面积达 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占流域面积的38.77%,水土流失量居全省六大流域之首,多年平均输沙量 $2.4 \times 10^8 \text{ t}$,多年平均土壤侵蚀量 $15.9 \times 10^8 \text{ t}$,多年平均侵蚀模数 $2745 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。其中,较为严重的地区如:东川多年平均侵蚀模数高达 $5050 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,会泽、昭通、元谋的侵蚀模数都超过 $3000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[1]。严重的水土流失带来一系列生态问题,使流域内坡地土壤层越发瘠薄,植被生长失去必需养分甚至着床条件,引发滑坡、泥石流等自然灾害,大量泥沙及营养成分流入江河湖库,危及水利工程和水环境安全,水资源流失使干旱加重等等这些问题是金沙江流域生态可持续发展的瓶颈,对长江中下游居民人身安全和社会经济发展构成威胁。

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^[2],是降雨、地表水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要环节^[3],对水土流失过程具有十分明显的影响作用^[4]。降雨会以植物截留、下渗、填洼、蒸发等形式被分散,其中以下渗为主。然而,当旱季突发强降雨,降雨强度超过土壤入渗速率时会发生超渗产流,或是雨季降雨集中,水分下渗使流域土壤蓄水量达到饱和后会发生蓄满产流,降雨形成径流,对土壤产生水力侵蚀,是坡面土壤侵蚀形成泥沙的动力因素之一^[5-6]。因此,研究土壤水分入渗的特征是探讨地表降雨产流产沙机制的基础和前提。同时,有学者认为土壤入渗对减流减沙、流域水文调节机制具有十分重要的意义,并利用入渗参数作为土壤抗侵蚀能力的评价依据^[7]。土壤机械组成、团聚体含量、土壤容重等物理性质对土壤入渗有决定性作用^[8-9]。不同植被覆盖类型不但对土壤入渗有明显影响^[9-10],而且对产流量、产沙量也有显著作用^[11]。对不同植被类型坡面的产流量及其动态观测研究,结果显示不同植被类型的坡面产流量差异很大^[12-13]。

本研究在地处金沙江下游、长江中上游、云南高原东北部会泽县的金沙江头塘小流域水源涵养林生态系统定位研究站内,选择典型生态恢复人工林

为研究对象,对金沙江头塘小流域3种典型林地类型:21年生云南松(*Pinus yunnanensis*)林、19年生旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)林、19年生银荆(*Acacia dealbata*)林和荒草地(对照)的土壤入渗特征进行研究,为该区域生态恢复林、水土保持林、水源涵养林对减少地表径流和土壤侵蚀的生态效益影响提供理论基础,为长江上游金沙江流域的退耕还林工程、长防林工程建设、植被恢复类型提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

金沙江头塘小流域,地处长江上游、金沙江下游,云南省东北部会泽县城东郊12km处, $103^{\circ}24'E$, $26^{\circ}27'N$,流域面积 3.98 km^2 ,属于金沙江河谷边缘切割带与滇中高原的过渡区、滇东中山高原区、准静止锋南北移动区。研究区的气候属典型的亚热带高原季风山地气候^[1],气温年内变化的特点是春季升温迅速,夏季温暖无酷暑,秋季降温剧烈,冬季温和无严寒。气温年内变化曲线为单峰型,气温变化曲线起伏不大,峰谷之间差值较小。年均晴日225d,光照均匀,年日照时数2100h,年日照百分率约42%,太阳辐射总量约 $5500 \text{ MJ}/\text{m}^2$;年均气温 12.8°C , $>10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 3540.1°C 。金沙江头塘小流域的土壤母质主要是紫色砂页岩,伴有少量玄武岩和灰黄色泥岩,所以形成的土壤主要是紫色土、红壤和棕壤,全县范围这3个土类的土地面积占总土地面积的90.8%。区域内有维管植物约63科121属137种,且人工林成为主要森林植被,主要物种有:云南松、华山松(*Pinus armandii*)、旱冬瓜、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、银荆等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

调查研究选择在具有代表性的3种林地的坡面进行:云南松纯林、旱冬瓜纯林、银荆纯林和作为对照的荒草地。

设置降雨观测设备和布设径流小区,长期固定观测金沙江头塘小流域的降雨、径流、泥沙情况。选择坡度、坡位、坡向、土壤质地等条件差异尽可能小的4个地点,分别布设天然坡面径流场。布设规格为:投影 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的径流场,即投影面积为 50 m^2 。用混凝土板作为围埂将径流场边缘围砌封闭,保证围埂深埋于土壤70-80cm且高出地面约

20–30cm，既要防止场外水分下渗入场内，又要防止场外雨水击溅入场内。下端设集流槽、引水槽和径流池，径流池规格为1m×1m×1m，即容积为

1m³，池底留排水孔。

布置的坡面径流场基本情况见表1。

表1 径流场的基本情况

Tab. 1 Basic description for each slope runoff plot

林地类型	坡向	坡位	坡度 /°	海拔 /m	土壤类型	盖度 /%	林龄 /a	平均树高/m	平均胸径/cm
云南松林	S	中	30	2 280	棕壤	88(郁闭度)	21	8	7.8
旱冬瓜林	SW	上	20	2 235	紫色砂壤	80(郁闭度)	19	9	9.7
银荆林	S	上	20	2 220	紫色砂壤	75(郁闭度)	19	6	6.4
荒草地(对照)	W	中	25	2 244	红壤	75	-	-	-

注：云南松 (*Pinus yunnanensis*)、旱冬瓜 (*Alnus nepalensis*)、银荆 (*Acacia dealbata*)。

1.2.2 土壤物理性质测定

在已布设好的4种径流场外侧，用剖面法和环刀法分别取土层深度为0–20cm、20–40cm、40–60cm的3个层次的土样。取土时小心处理掉地表的覆被层，用环刀取原状土，环刀容积为100cm³。每个土样重复3次，测定和计算同期土壤容重、持水量、孔隙度等各项物理指标；另用土壤袋分别取各土层土壤样品1kg左右，用以测定土壤团粒结构和有机质含量等理化性质。

采用环刀法测定土壤容重、土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度^[14]，根据经验公式(式6)计算土壤总孔隙度^[14]；取新鲜土壤，采用烘干法测定土壤自然含水率^[15–16]；土壤经风干、研磨后，取通过0.25mm筛孔的土壤样品，采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质含量^[15]；取通过1mm筛孔的土壤样品，采用鲍氏比重计法分析土壤颗粒组成百分比^[14]；取原状土壤，采用萨维诺夫法(干筛法)测定土壤水稳性团粒结构组成百分比(土壤不同粒径水稳性团聚体的含量)^[17]。

根据已测定的土壤孔型，按照持水量计算公式^[18]分别计算4种林地土壤的饱和持水量、毛管持水量和非毛管持水量。

1.2.3 土壤入渗特征测定

用环刀法^[17]测定选定的金沙江头塘小流域3种林地的坡面0–20cm土层土壤入渗速率。土壤入渗试验环刀容积为100cm³，高h=5.000cm，直径d=5.046cm，底面积S=19.998cm²。分别在4种林地取原状土后带回实验室内浸水24h，浸水深度4.9cm。到预定时间后取出环刀去掉盖子，在其上部对接一个空环刀，用宽透明胶带密封好结合部，把接好的环刀固定于漏斗架上，漏斗下部放一烧杯

以备承接入渗下来的水。向上部空环刀内加水，保持土层厚度4.9cm的条件下进行入渗试验。自滴下第一滴水开始计时，每隔 $t_n=3, 5, 10, 15 \dots$ min更换烧杯并计量渗下的水量 Q_n ，试验持续到稳定入渗时为止，记录1h累积入渗量，根据入渗速率计算公式(1)分别计算各林分土壤的初始入渗速率(前3min平均入渗速率)、稳定入渗速率和平均入渗速率。

入渗速率计算公式 $V = Q_n \times 10 / (t_n \times S)$ ①。式中， V 为入渗速率(mm/min)； Q_n 为间隔时间内注入空环刀的水量(mL)； t_n 为所间隔的时间(min)； S 为环刀面积， $S=19.998\text{cm}^2$ 。

1.3 数据处理

采用Excel计算土壤孔隙度、持水量、入渗速率等值，对试验数据进行平均值处理和作图，用SPSS 19.5软件作影响土壤入渗的因子相关分析、主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同林地类型土壤物理性质

金沙江头塘小流域4种林地土壤的容重和孔隙度值见表2。

2.1.1 土壤有机质分析

由表2可见，云南松林地的0–20cm土层有机质含量比20–40cm、40–60cm土层的含量都低，而其他3种林地则表现为0–20cm土层有机质含量比20–40cm、40–60cm土层的含量都高。可能是因为植物对土壤的改良作用，还有枯落物形成腐殖质的原因，使得浅层土壤的有机质含量与下层的有明显

差异。银荆林浅层土壤的这一表现最明显, 0-20cm 土层有机质含量为 25.24g/kg, 20-40cm、40-60cm 土层的含量仅为 9.82g/kg, 5.31g/kg, 随土层深度增加有机质含量降低。0-60cm 土层云南松

林土壤有机质含量最高, 荒草地的最小, 4 种林地的土壤有机含量排序为云南松林>银荆林>旱冬瓜林>荒草地。

表 2 各地类土壤容重和孔隙度

Tab. 2 Soil bulk density and soil porosity of different forest land

林地类型	土层深度 /cm	有机质含量 /g · kg ⁻¹	容重 /g · cm ⁻³	总孔隙度 /%	毛管孔隙度 /%	非毛管孔隙度 /%	自然含水率 /%
云南松林	0-20	17.63	1.25	52.81	39.44	12.31	9.46
	20-40	23.46	1.08	58.38	45.39	11.24	15.81
	40-60	25.72	1.08	58.33	44.05	11.23	14.64
	均值	22.27	1.14	56.51	42.96	11.59	13.30
旱冬瓜林	0-20	19.75	1.08	58.19	51.99	5.13	21.07
	20-40	6.82	1.45	46.01	38.71	6.85	15.27
	40-60	9.66	1.29	51.29	44.32	5.93	22.73
	均值	12.08	1.27	51.83	45.01	5.97	19.69
银荆林	0-20	25.24	1.12	56.98	43.28	15.44	9.53
	20-40	9.82	1.26	52.52	36.86	13.02	17.70
	40-60	5.31	1.40	47.70	37.11	8.17	18.68
	均值	13.46	1.26	52.40	39.08	12.21	15.30
荒草地	0-20	15.17	1.29	51.50	39.28	5.06	5.24
	20-40	5.72	1.16	55.66	40.22	7.67	12.67
	40-60	5.82	1.47	45.54	36.82	4.01	13.20
	均值	8.90	1.31	50.90	38.77	5.58	10.37

2.1.2 土壤容重分析

由表 2 可见, 不同林地之间, 其土壤容重表现出一定的差异性。林地各自的 3 个土层容重对比, 旱冬瓜林地的土壤容重随深度变化范围最大, 从 1.08g/cm³增加到 1.45g/cm³, 云南松林地的土壤容重随深度变化范围最小, 仅从 1.08g/cm³增加到 1.25g/cm³。且云南松林的 20-40cm 和 40-60cm 的土层容重都为 1.08g/cm³, 是所调查研究的土壤中容重最小的土层, 而荒草地 40-60cm 的土层容重为 1.47g/cm³, 是所调查研究的土壤中容重最大的土层。银荆林的土壤容重呈现随土层深度增加而增加的特性, 而云南松林、旱冬瓜林、荒草地的土壤容重随土层深度变化没有呈现规律性变化。4 种林地类型 0-60cm 土层土壤容重大小关系为荒草地>旱冬瓜林>银荆林>云南松林。

2.1.3 土壤孔隙度分析

由表 2 可见, 3 个土层孔隙度对比, 均没有随土层深度变化呈现规律性变化。在 0-60cm 土层, 土壤毛管孔隙度大小关系是旱冬瓜林 45.01%>云南松林 42.96%>银荆林 39.08%>荒草地 38.77%; 土壤非毛管孔隙度大小关系是银荆林 12.21%>云

南松林 11.59%>旱冬瓜林 5.97%>荒草地 5.58%, 银荆林地的土壤非毛管孔隙度为荒草地的 2.1 倍; 4 种林地的土壤总孔隙度大小关系是云南松林 56.51%>银荆林 52.40%>旱冬瓜林 51.83%>荒草地 50.90%; 根据总孔隙度和非毛管孔隙度的比例, 云南松林地的土壤孔性是 4 种林地中最为理想的。

2.1.4 土壤颗粒组成分析

将土粒粒径为 1-0.05mm 的土壤颗粒划分为砂粒, 0.05-0.001mm 的为粉粒, 小于 0.001mm 的为粘粒。土壤砂粒含量高, 可以增加土壤孔隙度, 则土壤的通气性和透水性强, 但是保水保肥能力弱; 土壤粘粒含量高, 通气和透水性较差, 但是团聚能力较强, 有良好的保水保肥能力。分析表 3 得知, 4 种林地 0-60cm 土层的土壤砂粒含量是云南松林 45.00%>银荆林 38.33%>旱冬瓜林 24.17%>荒草地 16.67%; 土壤粘粒含量是云南松林 12.00%<银荆林 22.00%<旱冬瓜林 23.67%<荒草地 25.33%。4 种林地土壤颗粒组成呈现如上大小关系, 正好印证了前面所分析得到的 4 种林地土壤总孔隙度的大小关系, 即云南松林地的土壤孔性最好, 银荆林地

的和早冬瓜林地的土壤孔性次之，荒草地的土壤孔性最差。

4种林地0-60cm土层的土壤粒径大于0.25mm的水稳性团聚体含量是银荆林86.73% > 早冬瓜林74.63% > 荒草地69.68% > 云南松林

42.65%；云南松林地土壤的水稳性团聚体含量远远低于其他3种林地的，还不足银荆林地的1/2，出现如此大的差异，可能是土壤母质不同的原因，还可能与林下植被和环境因素有关。

表3 各林地类的土壤团粒结构

Tab. 3 Soil aggregate structure of different forest land

林地类型	土层深度/cm	颗粒组成/%			水稳性团聚体/%		
		1-0.05mm	<0.01mm	<0.001mm	>5mm	>2mm	>0.25mm
云南松林	0-20	45.00	45.00	9.50	11.50	22.29	37.41
	20-40	45.00	45.00	14.50	11.05	24.17	44.72
	40-60	40.00	40.00	12.00	17.38	25.95	45.81
	均值	45.00	45.00	12.00	13.31	24.14	42.65
早冬瓜林	0-20	22.50	60.00	19.50	23.19	37.95	79.49
	20-40	30.00	50.00	22.00	14.16	22.28	62.33
	40-60	20.00	60.00	29.50	14.28	28.82	82.08
	均值	24.17	56.67	23.67	17.21	29.68	74.63
银荆林	0-20	50.00	35.00	12.00	87.70	90.86	94.71
	20-40	40.00	50.00	24.50	21.47	31.68	83.51
	40-60	25.00	60.00	29.50	19.06	26.74	81.96
	均值	38.33	48.33	22.00	42.74	49.76	86.73
荒草地	0-20	20.00	55.00	19.50	38.67	47.78	82.17
	20-40	10.00	60.00	29.50	4.64	9.15	70.20
	40-60	20.00	60.00	27.00	6.45	8.47	56.68
	均值	16.67	58.33	25.33	16.59	21.80	69.68

表4 各林地的土壤持水量

Tab. 4 Soil water holding capacity of different forest land

林地类型	土层深度/cm	饱和持水量 /t·hm ⁻²	毛管持水量 /t·hm ⁻²	非毛管持水量 /t·hm ⁻²
云南松林	0-20	1 056.2	788.8	246.2
	20-40	1 167.6	907.8	224.8
	40-60	1 166.6	881.0	224.6
	合计	3 390.4		
早冬瓜林	0-20	1 163.8	1 039.8	102.6
	20-40	920.2	774.2	137.0
	40-60	1 025.8	886.4	118.6
	合计	3 109.8		
银荆林	0-20	1 139.6	865.6	308.8
	20-40	1 050.4	737.2	260.4
	40-60	954.0	742.2	163.4
	合计	3 144.0		
荒草地	0-20	1 030.0	785.6	101.2
	20-40	1 113.2	804.4	153.4
	40-60	910.8	736.4	80.2
	合计	3 054.0		

持水量都存在较大差异，因此，各林地土壤的持水量肯定存在差异。从各林地的0-60cm土层土壤饱和持水量来看，云南松林地的土壤饱和持水量最大，为3 390.4t/hm²；荒草地的土壤饱和持水量最小，仅为3 054.0t/hm²。以土壤饱和持水量作为林分涵养、调节水分能力的指标，可以认为，云南松林地的土壤水源涵养性能是荒草地1.11倍。4种林地的土壤持水性能大小关系为云南松林3 390.4 t/km² > 银荆林3 144.0t/km² > 早冬瓜林3 109.8 t/km² > 荒草地3 054.0t/km²。

2.2 土壤入渗过程分析

对4种林地进行土壤入渗分析（表5），土壤初始入渗速率较快，而后逐渐降低，最后稳定在一个固定的水平上，即达到稳定入渗阶段。3个土壤入渗特征值在不同林分下变化较大，每个地类都呈初始入渗速率 > 平均入渗速率 > 稳定入渗速率的规律。4种林地土壤的初始入渗速率表现为云南松林4.17mm/min > 银荆林3.68mm/min > 早冬瓜林3.54mm/min > 荒草地1.97mm/min；平均入渗速率也为云南松林的最大，云南松林0.99mm/min > 早

2.1.5 土壤持水量分析

由表4可见，4种林地的毛管持水量和非毛管

冬瓜林 0.85mm/min > 银荆林 0.81mm/min > 荒草地 0.73mm/min; 稳定入渗速率表现为早冬瓜林 0.48mm/min > 云南松林 0.32mm/min > 银荆林 0.25mm/min > 荒草地 0.11mm/min; 而初始入渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率的最低值均出现在荒草地的土壤入渗过程中, 分别为 1.97mm/min、0.73mm/min 和 0.11mm/min。由此可知, 早冬瓜林地 0-20cm 土层土壤的孔隙度和毛管孔隙度均比云南松林地和银荆林地的大, 因此早冬瓜林地 0-20cm 土层土壤的结构状况可能对该林地类型的土壤水分初始入渗和稳定入渗速率产生明显的阶段性影响作用, 导致早冬瓜林地的初始入渗速率比云南松林的和银荆林的都小, 但是稳定入渗速率并不呈现这样的大小规律。

2.3 土壤入渗过程模拟

为进一步明确头塘小流域 4 种林地的土壤入渗特征, 通过相关土壤入渗数学模型分别对 4 种地类的土壤入渗过程进行拟合。有关土壤水分入渗的数

学模型有许多种, 通过对常用入渗公式进行分析, 根据前人对入渗模型的研究及可靠性分析成果^[3], 结合本次土壤入渗速率测定的研究方法和过程, 选取概念较为明确, 使用较为简便且可靠的 Kostiakov 公式和 Philip 公式对 4 种地类的土壤入渗特征进行拟合, 更准确地看出不同地类土壤入渗的性能差异, 结果见表 6。

表 5 各林地的土壤入渗过程

Tab. 5 Soil infiltration process of different forest land

林地类型	初始入渗速率 /mm · min ⁻¹	平均入渗速率 /mm · min ⁻¹	稳定入渗速率 /mm · min ⁻¹	累积入渗量 /mm
云南松林	4.17	0.99	0.32	114.48
早冬瓜林	3.54	0.85	0.48	102.61
银荆林	3.68	0.81	0.25	67.48
荒草地	1.97	0.73	0.11	32.88

表 6 不同地类土壤入渗 2 种模型回归分析结果

Tab. 6 Simulated parameters based on two equations

林地类型	Kostiakov 入渗模型 $f(t) = at^{-b}$			Philip 入渗模型 $f(t) = 0.5St^{-1/2} + f_c$		
	a	b	R ²	f _c	S	R ²
云南松林	5.816 8	0.511 3	0.832 1	0.320 0	7.803 4	0.755 7
早冬瓜林	2.942 4	0.445 1	0.910 3	0.480 0	4.869 9	0.875 3
银荆林	4.764 0	0.562 5	0.899 3	0.250 0	6.814 8	0.791 5
荒草地	2.943 0	0.570 5	0.844 4	0.110 0	3.737 2	0.837 0

经显著性检验, Kostiakov 模型和 Philip 模型的 P 值均小于 0.05, 模拟效果显著。通过拟合参数分析, 利用 Kostiakov 公式拟合时, a 值的范围介于 2.942 4-5.816 8 之间, 最大值出现在云南松林分中, 其数值大小与土壤容重有关^[19], 最小值出现在早冬瓜中; b 值介于 0.445 1-0.570 5 之间, b 值反映入渗速率递减状况, b 值越大, 入渗速率随时间递减越快, 因此比较 4 种林地类型的入渗特性, 荒草地的土壤入渗速率递减最快, 其次是银荆林和云南松林的, 早冬瓜林的递减最慢。

基于 Philip 入渗公式的拟合, S 值大小能够有效地反映土壤入渗能力的大小, S 值越大, 表明入渗能力越强, 反之则入渗能力小, 可见, 4 种林地土壤入渗能力的大小关系为: 云南松林 (S = 7.803 4) > 银荆林 (S = 6.814 8) > 早冬瓜林 (S = 4.869 9) > 荒草地 (S = 3.737 2)。

比较 2 种入渗模型的相关系数 (R²) 可以看出, 在金沙江头塘小流域内, 利用 Kostiakov 公式和 Philip 公式对土壤入渗特征进行数学模型拟合, 结果 Kostiakov 模型拟合的相关系数大小在 0.832 1-0.910 3, Philip 模型拟合的相关系数大小在 0.755 7-0.875 3, 说明 Kostiakov 公式进行该区域土壤水分入渗模型拟合的精度高于 Philip 公式。

2.4 土壤入渗特征影响因子分析

2.4.1 影响因子相关性分析

影响土壤入渗的因子很多, 内部因素包括土壤的容重、孔隙度、颗粒组成、土壤质地、土壤含水率等, 外部因素有植物根系、枯落物腐殖质、气候因素等。根据林分土壤的初始入渗速率、30min 平均入渗速率、稳定入渗速率和土壤的理化特性因子作相关分析, 结果见表 7。

表 7 土壤入渗特性与影响因子的相关性分析

Tab. 7 Correlative analysis between influencing factors and soil water infiltration capacity

	初始入渗速率	稳定入渗速率	平均入渗速率	有机质	容重	总孔隙度	毛管孔隙	非毛管孔隙	颗粒组成/%			水稳性团聚体/%			含水率
									1-0.05 mm	<0.01 mm	<0.001 mm	>5 mm	>2 mm	>0.25 mm	
初始入渗速率	1														
稳定入渗速率	0.873 *	1													
平均入渗速率	0.859 *	0.546	1												
有机质	0.712	0.312	0.961 *	1											
容重	-0.894 *	-0.816 *	-0.966 *	-0.999 **	1										
总孔隙度	0.856 *	0.449	0.947 *	0.996 **	-0.997 **	1									
毛管孔隙	0.856 *	0.925 *	0.633	0.394	-0.418	0.362	1								
非毛管孔隙	0.722	0.007	0.554	0.707	-0.669	0.676	-0.164	1							
1~0.05mm	0.876 *	0.236	0.803 *	0.892	-0.866	0.862	0.151	0.941 *	1						
<0.01mm	-0.804 *	-0.106	-0.757	-0.880	0.854	-0.859	-0.038	-0.958 *	-0.991 **	1					
<0.001mm	-0.732 *	-0.211	-0.933 *	-0.992 **	0.994 **	-0.999 **	-0.330	-0.677	-0.856	0.858	1				
>5mm	0.462	0.163	0.312	-0.199	0.251	-0.255	-0.521	0.533	0.266	-0.274	0.258	1			
>2mm	0.559	0.677	-0.445	-0.081	0.133	-0.152	-0.301	0.577	0.370	-0.348	0.164	0.970 **	1		
>0.25mm	-0.494	-0.864 *	-0.839 *	-0.755	0.787	-0.805	-0.374	-0.157	-0.397	0.418	0.814	0.845 *	0.705	1	
含水率	0.534	0.820	0.234	0.009	-0.001	-0.070	0.723	-0.049	0.084	0.046	0.110	0.151	0.363	0.332	1

注：** 表示极显著相关；* 表示显著相关。

土壤的有机质含量和容重呈极显著负相关性，说明土壤有机质含量越高，土壤容重越小。土壤容重与土壤质地、压实状况、土壤颗粒密度、土壤有机质含量及各种土壤管理措施均有关，土壤越紧实，容重越大，土壤越疏松多孔，容重越小；有机质含量高、结构性也好的土壤容重就小^[20]，自然规律都是容重小的土壤有利于植物根系生长，特别是须根系在土壤中的横向生长；土壤容重小则水、肥、气流动所受阻小，土壤肥力高，有利于根系吸收水肥。有机质本身不直接影响土壤入渗，但是通过对团聚体的形成而间接起影响作用；也会通过改善植物根系生长状况，改善土壤微生物环境而影响土体结构，从而对土壤入渗性能起作用。

土壤孔隙度大，即为土壤疏松多孔，因此，土壤孔隙度与容重呈极显著的负相关性，土壤的容重和孔隙度反映土体结构状况，是衡量土壤肥力的重要指标之一。土壤的孔隙度大，物理性质好，水、肥、气、热流动所受阻小，根系生长多受阻小，有利于土壤养分在土壤中储存和流通，有利于根系吸收水肥，所以土壤孔隙度与有机质含量呈极显著正相关性。

土壤的颗粒根据粒径大小划分为粒径为 1-0.05mm 的砂粒，0.05-0.001mm 粉粒，和小于 0.001mm 的粘粒。很显然，土壤粒径越小，越容易堵塞土壤孔隙，粘粒颗粒占土壤颗粒的比例越大，越容易降低土壤孔隙度，增加土壤容重。因此粘粒的含量和土壤孔隙度呈极显著负相关，和土壤

容重则呈极显著正相关。根据以上分析，容重增大，孔隙度降低，对土壤有机质储存和流通不利，所以粘粒含量和有机质含量也呈极显著负相关性。

土壤容重与土壤初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率都呈显著负相关性，说明容重越大，土壤入渗速率越小，而土壤总孔隙度和土壤入渗呈正相关关系，其中与土壤初始入渗速率和平均入渗速率的相关性都达显著水平，以上两种关系反映出的土壤特性是土壤容重越大，则孔隙度越小，土壤入渗速率越小。非毛管孔隙度是土粒团粒间形成的大孔隙结构，可供大分子通过，也是水分的流通通道，因此，非毛管孔隙度与水分下渗有直接正相关关系，特别影响土壤的平均入渗性能。

土壤粒径组成<0.01mm 的含量百分比和<0.001mm 都与入渗呈负相关性，水稳性团聚体>0.25mm 与土壤稳定入渗速率呈显著正相关性，可以看出土壤的粒径组成和团聚体结构都影响土壤入渗速率。

而在土壤的初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率三者之间，都相互呈正相关性，初始入渗速率对稳定入渗速率和平均入渗速率的影响都比较大，初始入渗是水分下渗的主要阶段。

2.4.2 影响因子主导性分析

土壤物理性质作为影响土壤入渗的因子，对其主成分分析，探究其影响作用的主导性和相关性，旋转后的因子载荷矩阵见表 8。

表8 旋转后的因子载荷矩阵

Tab. 8 Rotated component matrix of principal component analysis

	主成分因子载荷	
	1	2
1-0.05mm 颗粒	0.979	0.190
<0.01mm 颗粒	-0.977	-0.204
有机质	0.960	-0.274
总孔隙度	0.945	-0.325
容重	-0.945	0.325
<0.001mm 颗粒	-0.943	0.327
非毛管孔隙度	0.876	0.474
>5mm 水稳性团聚体	0.075	0.996
>2mm 水稳性团聚体	0.174	0.948
>0.25mm 水稳性团聚体	-0.576	0.780
毛管孔隙度	0.207	-0.577
方差贡献率/%	60.791	32.074
累计方差贡献率/%	60.791	92.865

为比较土壤物理性质的众多指标对土壤入渗影响的优劣,运用 SPSS 19.5 软件,对影响土壤入渗的因子进行主成分分析,取特征值>1,结果如表 8 所示。把众多影响因子概括为 2 个主要影响成分,根据主因子累计方差贡献率为 92.865%,用它们来解释对土壤入渗性能的影响是合理的。第一主成分由 1-0.05mm 颗粒含量(荷载值 0.979)、<0.01mm 颗粒含量(荷载值-0.977)、有机质含量(荷载值 0.960)、总孔隙度(荷载值 0.945)、容重(荷载值-0.945)、<0.001mm 颗粒含量(荷载值-0.943)和非毛管孔隙度(荷载值 0.876)决定,第二主成分由>5mm 水稳性团聚体含量(荷载值 0.996)>2mm 水稳性团聚体含量(荷载值 0.948)>0.25mm 水稳性团聚体含量(荷载值 0.780)和毛管孔隙度(荷载值-0.577)决定。其中<0.01mm 颗粒含量和容重都与第一主成分成负相关性,毛管孔隙度与第二主成分成负相关性,该结论与表 7 的相关分析所得到的因子相关性结论一致。

根据表 7 和表 8 分析影响土壤入渗的因素,可以得知,云南松林地的土壤物理性质有机质含量、容重、孔隙度等,是所研究的 4 种地类的土壤物理性质中最理想的。其实,除了下垫面本身的理化特性外,也可能因为云南松林林龄比较长,林分在长达 21 年的休养生息中生长繁殖达到成熟稳定状态,植物对土壤的改良作用也最大;还有树木的枯枝落叶,在林地表面长年累积,形成腐殖质,也会改善土壤孔隙结构和有机质含量,这些原因都有可能增

强云南松林地的土壤入渗性能。

最大方差旋转因子分析过程可得到主成分因子得分,因子得分矩阵见表 9(对因子进行变量假设)。

表9 主成分因子得分系数矩阵

Tab. 9 Component score coefficient matrix of principal component analysis

	主成分因子载荷	
	1	2
有机质(X_1)	0.138	-0.050
容重(X_2)	-0.134	0.065
总孔隙度(X_3)	0.134	-0.065
毛管孔隙度(X_4)	0.014	-0.161
非毛管孔隙度(X_5)	0.149	0.164
1-0.05mm 颗粒(X_6)	0.156	0.085
<0.01mm 颗粒(X_7)	-0.156	-0.089
<0.001mm 颗粒(X_8)	-0.134	0.065
>5mm 水稳性团聚体(X_9)	0.042	0.291
>2mm 水稳性团聚体(X_{10})	0.056	0.280
>0.25mm 水稳性团聚体(X_{11})	-0.064	0.208

根据因子得分,可得到因子得分函数, $F_1 = 0.138X_1 - 0.134X_2 + 0.134X_3 + 0.014X_4 + 0.149X_5 + 0.156X_6 - 0.156X_7 - 0.134X_8 + 0.042X_9 + 0.056X_{10} - 0.064X_{11}$ 。

$F_2 = -0.050X_1 + 0.065X_2 - 0.065X_3 - 0.161X_4 + 0.164X_5 + 0.085X_6 - 0.089X_7 + 0.065X_8 + 0.291X_9 + 0.280X_{10} + 0.208X_{11}$ 。

根据因子得分函数,结合表 8 的主成分方差贡献率可得到土壤渗透性能影响因子的综合评价值(F)的计算公式: $F = 0.60791F_1 + 0.32074F_2$,进而可以利用主成分方程计算土壤渗透性能影响因子的综合判断值。

3 结论

通过剖面法和环刀法,室内测定头塘小流域 4 种林地类型坡面的分层土壤物理性质,用环刀法测定表层土壤的入渗速率,对影响入渗速率的土壤物理性质进行相关性和主导性分析,并通过入渗模型对土壤入渗特征进行拟合,探讨不同林地的土壤入渗特征,得到如下研究结论:

(1) 在 0-60cm 土层,4 种林地的土壤有机质含量比较为云南松林 22.27g/kg>银荆林 13.46g/cm³>旱冬瓜林 12.08g/cm³>荒草地 8.90g/cm³;

土壤容重表现为荒草地 $1.31\text{g}/\text{cm}^3 >$ 早冬瓜林 $1.27\text{g}/\text{cm}^3 >$ 银荆林 $1.26\text{g}/\text{cm}^3 >$ 云南松林 $1.14\text{g}/\text{cm}^3$ ，土壤容重越小，其结构性就好，土壤越疏松多孔，越有利于水、肥、气、热流动，对地表水分下渗、径流分散越有利；土壤总孔隙度的比较表现为云南松林 $56.51\% >$ 银荆林 $52.40\% >$ 早冬瓜林 $51.83\% >$ 荒草地 50.90% 的特征；各林地的土壤饱和持水量也存在较大差异，云南松林地的水源涵养性能是荒草地 1.11 倍，各林地对水分的涵养、调节能力为云南松林 $>$ 银荆林 $>$ 早冬瓜林 $>$ 荒草地。

(2) 对影响土壤入渗的因子作相关分析和主成分分析，结果都可以得到土壤的有机质含量、总孔隙度、容重和土壤颗粒对土壤的入渗性能决定作用最大。

(3) 林分土壤的初始入渗速率与稳定入渗速率和平均入渗速率呈显著和显著正相关关系，可见土壤入渗过程特征，初始入渗阶段是地表水分下渗的主要阶段。

参考文献：

- [1] 杨树华, 王宝荣, 王崇云, 等. 流域生态系统的生态保护及其数字化管理: 以云南金沙江流域为例[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 刘芝芹, 郎南军, 彭明俊, 等. 金沙江流域典型森林土壤水分下渗特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 1-5.
- [3] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-305.
- [4] 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.
- [5] 余新晓, 毕华兴. 水土保持学(第3版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013: 29-42.
- [6] 贾绍凤. 黄土高原降雨径流产沙相互关系的研究

[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 42-47.

[7] 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.

[8] 田积莹, 黄义端, 雍绍萍. 黄土地区土壤的物理性质及与黄土成因的关系[J]. 水土保持研究, 1987(1): 1-12.

[9] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报, 1984(4): 7-9.

[10] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33-36.

[11] Teklehaimanot Z, Jarvis P G, Ledger D C. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing[J]. Journal of Hydrology, 1991, 123: 261-278.

[12] 陈奇伯, 寸玉康, 刘芝芹. 滇西高原不同地类坡面产流产沙规律研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 71-73.

[13] 黄承标, 韦炳二, 黎洁娟. 广西不同植被类型地表径流的研究[J]. 林业科学, 1991, 27(5): 490-497.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. LY/T 1237-1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[16] 陈路红, 苏凯文, 郑伟, 等. 云南 2 种主要灌丛土壤有机碳分布特征及其影响因子研究[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(5): 106-113.

[17] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 175-177.

[18] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-150.

[19] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. 西南大学学报, 2013, 35(9): 119-126.

[20] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(编辑: 李云琴)