

# 滇西北高原湿地不同植被类型下的 土壤入渗特性及其影响因素

陈楚楚, 黄新会, 刘芝芹, 王克勤, 涂璟, 宋维峰, 马建刚

(西南林业大学, 环境科学与工程学院, 云南昆明 650224)

**摘要:** [目的] 研究滇西北高原碧塔海流域湿地保护区不同植被类型条件下的土壤入渗特性及影响因素, 为该流域湿地综合治理及保护提供科学参考。[方法] 采用双环法进行测定, 利用相关分析和主成分分析法分析数据。[结果] (1) 不同覆被土壤入渗性能存在较大差异, 针叶林样地入渗性能最好, 其次为阔叶林地, 旱地最弱; (2) 利用 3 种模型对入渗速率与时间进行模拟, 考斯加科夫公式拟合效果为最佳; 拟合结果表明, 各地类初始入渗率和入渗速率大小均表现为: 针叶林 > 阔叶林 > 灌丛 > 草甸 > 旱地; (3) 有机质、容重、孔隙度、>5 mm 水稳性大团聚体、砂黏比与土壤入渗性能关系显著, 其中有机质、容重、>5 mm 水稳性大团聚体是影响碧塔海湿地保护区入渗性能的最重要的 3 个因子。[结论] 有林地具有较强的水土保持功能, 应重视宜林旱地的育林造林工作。

**关键词:** 碧塔海; 土壤入渗; 影响因素; 覆被类型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)02-0082-06

**中图分类号:** S152.72

**文献参数:** 陈楚楚, 黄新会, 刘芝芹, 等. 滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 82-87. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.016

## Infiltration Characteristics and Influencing Factors of Surface Soil in Plateau Wetland of Northwest Yunnan Province

CHEN Chuchu, HUANG Xinhui, LIU Zhiqin, TU Jing, SONG Weifeng, MA Jiangan

(College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** [Objective] Infiltration characteristics and its influence factors of soils under different vegetation types at Bitahai Lake basin in plateau wetland of Northwest Yunnan Province were researched to provide some scientific references for the comprehensive management and wetland protection in the basin. [Methods] The double rings method was used to measure the infiltration process of soils under 5 vegetation types. Correlation analysis and principal component analysis methods were used to process the data. [Results] (1) Infiltration capabilities of the five vegetational soils were found different obviously. Soil in coniferous forest had the best infiltration performance, the next was the soil in broad-leaves forest and the soil in the dry land was the lowest. (2) 3 different formulas were used to fit the infiltration rate against time, among of them, goodness of Kostiakov formula was the best. Initial infiltration rate and overall infiltration rate coincided on the ranks of the 5 soils. That was: coniferous forest > shrub > broadleaf forest > meadow > upland. (3) Indices of organic matter, bulk density, porosity, >5 mm aggregates, sand clay ratio, were significantly correlated with soil infiltration. Organic matter, bulk density, >5 mm water stable aggregates were 3 of the most important influencing factors on infiltration capacity of Bita Lake Basin. [Conclusion] Woodland performed better in the conservation of soil and water than other vegetational types. Thereby, afforestation silviculture suitable for dry land should be stressed.

**Keywords:** Bitahai Lake; soil infiltration; influencing factors; vegetation type

收稿日期: 2015-04-17

修回日期: 2015-04-30

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“云南省典型植被的水分适宜性及其生态需水与区域旱灾的关系”(31460191); 云南省教育厅科学研究基金重点项目(2014Z107); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目; 西南林业大学重点学科(水土保持与荒漠化防治)建设项目; 西南林业大学博士科研启动基金(111429)

**第一作者:** 陈楚楚(1989—), 女(汉族), 浙江省诸暨市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: chenchuchu1989@163.com。

**通信作者:** 刘芝芹(1977—), 女(汉族), 湖北省荆门市人, 博士, 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。

土壤是连接生物圈、大气圈、岩石圈最重要的过渡带,是人类、动植物、微生物等赖以生存的生境之一,是人类活动进行的直接场所,研究土壤的水分入渗特性是人类了解以及积极开展土壤侵蚀防治的有效前提。土壤入渗是四水<sup>[1]</sup>(降水、地面水、土壤水和地下水)相互流通、转化、运行的重要环节。土壤的入渗特性受多方面因素的影响,研究<sup>[2]</sup>表明土壤随体积质量的增加,团粒结构逐渐瓦解、孔隙度和入渗率随之降低。也有学者<sup>[3]</sup>认为入渗性能主要由土壤机械组成的比例、团聚体含量和初始含水率等多种不定因素决定。一般来说植物截流、雨量蒸发和填注量不及下渗量,高效的入渗有利于降低土壤产流、减缓径流冲刷土表、增加蓄水量,还可避免超渗产流的产生。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,同时也为改善土壤生态建设、开发土壤内部潜力、发挥土壤水文效应提供数据支持。

自从 1997 年云南省宣布“香格里拉就在云南迪庆藏族自治州”以来,该区就迎来旅游热潮,但是碧塔海位于高原地带,气候高寒,生态环境相当脆弱,这对当地的生态环境是一个极大的挑战。目前我国在长江中上游地区、干热河谷地区、黄土高原区等地区土壤水分入渗的研究工作已相当成熟,也不乏碧塔海湿地的旅游、景观研究,但是鲜有对碧塔海保护区土壤水文方面的报道。王金亮<sup>[4]</sup>在对碧塔海湿地保护区进行旅游活动的调查中发现,旅游活动持续的时间越长、强度越大对土壤各方面性质影响就越大,董跃宇<sup>[5]</sup>利用 Markov 模型对碧塔海景观格局进行了预测,但是这些研究只是立足于旅游与景观层面而没有涉及土壤理化性质的定量研究;贝荣塔<sup>[6]</sup>虽对该保护区土壤养分进行了比较分析,但是也并未对土壤水文效应等进行深入探讨。本研究采用环刀法对不同植被下的土壤进行分层取样,以垂直角度分析该流域土壤的理化性质及其对入渗的影响,对土壤入渗特性进行描述,用多种公式对其过程进行模拟分析,并对影响土壤入渗的因素进行相关分析及主成分分析,探明影响碧塔海流域土壤入渗规律及影响其变化的因素,

为进一步保护湿地生态及当地土壤生态建设提供理论支撑,为预防水土流失工作奠定基础,对碧塔海湿地综合治理及保护提供重要参考。

## 1 研究区概况

碧塔海流域位于云南省香格里拉县城以东 25 km 处,27°46′—27°55′N,99°54′—100°03′E,是云南省海拔最高的湖泊,地处横断山脉上部的高原面上。该区于 1984 年被当地省政府批准为省级自然保护区,总面积为 14 181 hm<sup>2</sup>。碧塔海湿地保护区属青藏高原向云南高原的过渡地带,相对高差约为 900 m。该区域气候属高原寒温带季风性湿润气候,年均温 5~8 ℃,≥10 ℃的年均积温 1 529.8 ℃;年降水主要集中于 6—9 月,年均降水量为 618.4 mm,最大降水分布于海拔 3 400~3 600 m。广泛分布的植被类型为针叶林、灌丛、阔叶林、草甸,林内植被完好,枯枝落叶层深厚,随着海拔上升,表土颜色由淡棕逐渐变为黑棕。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

依据不同土地利用类型、不同地形的变度,本研究于 2014 年 10—11 月在研究区内依次选取具有代表性的不同植被类型:针叶林、灌丛、阔叶林、草甸作为研究对象,另外又选取旱地作为对比研究。采用样方调查法对试验区样地植物进行调查。分别选取:针叶林(10 m×10 m)、灌丛(4 m×4 m)、阔叶林(20 m×20 m)、草甸(1 m×1 m)的样地,且均各取 3 个样地作为重复。对各样方海拔、坡度坡向及植物种类、树龄、郁闭度等开展调查并进行登记。各样地的植被类型及样区基本情况详见表 1。

采用环刀法分层次(0—30 cm,30—60 cm,60—90 cm)采集土壤剖面的土样并立即带回实验室进行理化性质的测定与数据分析。其中,采用环刀法测定土壤容重、毛管孔隙度;土壤有机质采用重铬酸钾法测定;颗粒组成采用比重法测得;水稳性大团聚体采用湿筛法测定分析<sup>[7]</sup>,各指标设置 3 个重复。

表 1 不同植被类型基本情况

植被类型	海拔/m	坡向	坡度/(°)	树种组成	树龄/a	盖度/%	土类
针叶林	3 820	北	28	长苞冷杉、油麦吊云杉	28	95	暗棕壤
灌丛	3 880	西北	25	川滇高山栎、	18	90	棕壤
阔叶林	3 630	西北	30	白桦	25	90	棕壤
草甸	3 910	西	13	小羊茅、青蒿、紫草等	1	50	棕壤
旱地	3 550	西北	15	种植青稞,已收割	0	0	棕壤

注:长苞冷杉(*Abies georgei*),油麦吊云杉(*Picea brachytyla*),川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*),白桦(*Betula platyphylla*),小羊茅(*Festuca Festuca*),青蒿(*Artemisia annua*),紫草(*Lithospermum erythrorhizon*)。

## 2.2 入渗速率、毛管孔隙度的测定及计算

双环入渗具有操作简便、方便移动的特点,是常用的土壤入渗测量仪,本试验采用双环法测土壤入渗速率。采用两环高度均为 35 cm,内环直径为 30 cm,外环直径为 50 cm 的双环,以垂直角度打入土中深度均为 25 cm。在环内侧做好标记以便记录,辅以秒表,人工控制加水量并保证在试验过程中均维持最低水深为 5 cm。开始入渗后,每隔一定时间往环内加水,并且记录数据。各测定地点均为无坡度的平缓地带,且土体表面未作任何处理。试验于稳定入渗后结束。采用环刀法测土壤毛管孔隙度。用环刀取原状土,将环刀有孔并垫有滤纸的一端放入盛水托盘内,水深保持在 2~3 mm。环刀中土样吸水膨胀后,用刮刀刮去胀到环刀外的土样,立即称重后用铝盒从环刀中取土 4~5 g,测土样吸水后的含水率,以换算环刀中烘干土重。最后用公式计算毛管孔隙度、非毛管孔隙度。

采用 Excel 处理数据;采用 SPSS 19.0 对测得数据进行分析对比与拟合。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤入渗过程及特征

试验测得各土壤层的有机质、容重、孔隙度、颗粒

组成和水稳性大团聚体含量结果详见表 2。从表 2 可知,不同植被类型土壤自然含水率均值为 8.22%~14.25%,其中以旱地最小,表明土地利用类型的改变对土壤持水能力有明显影响,植被类型、郁闭度等是影响土壤蓄水能力重要因子。植被在生长过程中凋落的枯枝落叶经微生物分解成有机质后,有利于增加土壤团聚体结构,在碧塔海流域不同覆被类型下不同层次的土壤有机质含量的大小为:针叶林>灌丛>阔叶林>草甸>旱地。土壤容重与毛管孔隙度表现出相反的规律,随着容重的增加,毛管孔隙度明显降低,其中针叶林土壤毛管孔隙度为 5 种林分中最具优势,这与植被根系在土体内的缠绕交织、粗细程度增加了对土壤的扰动有关,植被的生长使土壤的成壤过程顺利进行<sup>[8]</sup>。从表 2 可知,旱地容重与草甸容重接近,甚至出现小于草甸容重的情况,这可能是由于前一年旱地处于耕种期,在进行农业活动时对土壤翻耕等造成土壤层略微疏松而产生的现象。从表 2 可以看出,随着土层厚度的增加,土壤自然含水率、有机质、毛管孔隙度等呈现出明显递减的趋势,厚度增加 90 cm 时有机质含量减少了 27%~49%,约为厚度增加 60 cm 时的 2 倍。

表 2 各样地不同层次土壤理化性质

植被类型	土层/cm	含水率/%	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	毛管孔隙度/%	颗粒组成/%			水稳性大团聚体/%		
						1~0.05 mm	<0.01 mm	<0.001 mm	>5 mm	>2 mm	>0.25 mm
针叶林	0—30	18.89	26.42	1.01	52.36	56.37	28.83	14.80	69.83	79.32	94.71
	30—60	12.30	19.45	1.26	50.38	43.98	28.98	27.04	56.82	58.68	83.51
	60—90	11.56	16.21	1.28	51.47	56.48	18.98	24.54	68.97	56.89	81.96
灌丛	0—30	14.77	13.89	1.35	43.44	43.86	29.4	26.74	43.70	80.86	88.51
	30—60	11.72	10.34	1.63	35.39	38.83	44.13	17.04	39.47	70.68	67.84
	60—90	10.18	6.06	1.51	33.05	41.25	44.21	14.54	39.06	76.74	58.21
阔叶林	0—30	16.35	14.32	1.24	48.62	48.98	32.4	18.62	45.04	64.77	87.22
	30—60	10.56	10.24	1.35	40.66	53.41	4.55	42.04	35.91	72.39	94.70
	60—90	6.03	7.24	1.65	30.71	43.45	4.51	52.04	27.18	57.42	91.76
草甸	0—30	15.6	10.27	1.39	42.28	46.48	16.34	37.18	24.25	58.98	78.85
	30—60	12.04	8.15	1.43	41.86	49.48	28.98	24.54	44.98	51.39	81.54
	60—90	8.59	6.56	1.56	32.11	48.98	18.98	32.04	43.69	56.32	83.54
旱地	0—30	9.91	6.35	1.48	43.53	30.27	46.8	22.93	16.49	22.29	37.41
	30—60	6.59	6.24	1.60	33.51	33.62	58.58	27.8	14.06	24.17	44.72
	60—90	8.16	4.65	1.49	34.72	24.94	54.24	30.82	8.72	25.95	45.81

根据试验数据点绘出针叶林、阔叶林、灌丛、草甸和旱地的土壤水分入渗率随时间变化的曲线图(图 1)。从图 1 中可看出,不同植被覆盖下的土壤表层水分入渗过程趋同,表现为初始入渗率较高随着时间的推移、累积入渗量的增加,入渗速率降低并趋于平稳。土壤入渗速率表现为从针叶林、阔叶林、灌丛、草甸、旱地逐渐递减趋势,草甸与旱地的趋势较为接近。针叶

林初始入渗率、稳定入渗率高达 9.95, 1.18 mm/min, 约为旱地入渗率的 4.52 和 6.21 倍,但是前者达到稳渗阶段所用的时间仅为旱地的 0.48。累积入渗量表现出与入渗速率相同的递减趋势。从图 2 可看出,入渗量达到 400 ml 这段时间内,入渗速率有急剧的减弱趋势,斜率较其他阶段为最大。说明随着水分的渗透土壤间空隙达到饱水状态,土壤基质势梯度量值减

小,基质吸力对水分的作用力也迅速减少,因此在开始阶段表现得最为明显。陈安强<sup>[9]</sup>的研究对这一观点有很好的印证,指出含水率与基质吸力呈较好的幂函数关系,相关系数达 0.997。在具有植被覆盖保护下的土壤容重略低,有机质含量较高,随着腐殖质的增加有利于改善土壤结构增加水稳性大团聚体的含量,另一方面孔隙的存在也成为水分渗透到土体底层提供天然的运输通道,故较早地而言植被覆盖有利于增加水分的渗透,减少地表径流与超渗产流的发生,对保护土体、含蓄水源有较好的作用。

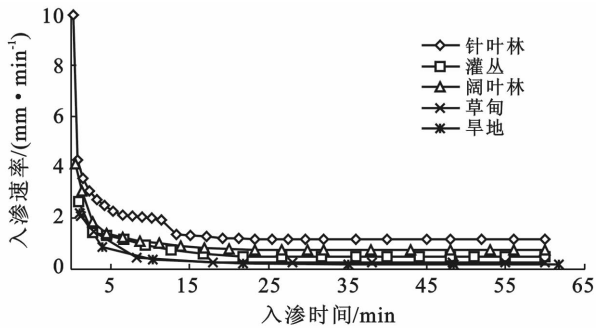


图 1 研究区不同覆被类型土壤入渗过程曲线

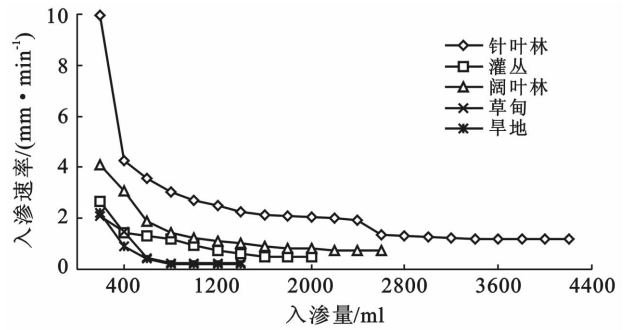


图 2 研究区不同覆被类型入渗量差异曲线

### 3.2 土壤入渗过程模拟

采用考斯加科夫<sup>[10]</sup> (Kostiakov) 经验模型、菲利普<sup>[11]</sup> (Philip) 公式、霍顿<sup>[12]</sup> (Horton) 经验模型对土壤入渗速率和时间的关系参数进行了模拟。表 3 为不同覆被类型下土壤入渗特征。

$$\text{考氏公式: } f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中:  $f(t)$ ——入渗速率 (mm/min);  $t$ ——入渗时间 (min);  $a, b$ ——参数。下同。

$$\text{菲利普公式: } f(t) = A + 0.5St^{-1/2} \quad (2)$$

式中:  $S$ ——吸湿率 (%);  $A$ ——稳定入渗率 (mm/min)。下同。

表 3 Kostiakov, Philip, Horton 模型的模拟结果

地类	考斯加科夫公式			菲利普公式			霍顿公式	
	$a$	$b$	$R^2$	$S$	$A$	$R^2$	$k$	$R^2$
针叶林	4.661	0.427	0.969	9.101	0.257	0.975	1.385	0.915
灌丛	2.625	0.497	0.975	5.055	0.042	0.981	0.259	0.941
阔叶林	3.131	0.456	0.983	6.369	0.072	0.987	0.469	0.988
草甸	2.278	0.639	0.938	5.162	-0.234	0.868	0.273	0.908
旱地	2.090	0.646	0.963	5.025	-0.255	0.879	0.368	0.916

注:  $a$  为第一个单位时间内平均的入渗速率;  $b$  为入渗速率随时间降低的快慢性;  $S$  为土壤入渗能力大小;  $A$  为稳定入渗速率;  $k$  为入渗速率随时间变化快慢;  $R^2$  为相关性程度。

$$\text{霍顿公式: } f(t) = A + (A - B)e^{-kt} \quad (3)$$

式中:  $B$ ——初始下渗率 (mm/min);  $k$ ——常数。

由表 3 可知,考斯加科夫公式拟合的  $a$  在 2.090~4.661 之间,且从针叶林到旱地呈递减趋势,由于  $a$  主要受土壤结构、容重等的影响,相当于第一个单位时间内平均的入渗速率,反映了各土壤初始入渗率的大小依次为:针叶林>阔叶林>灌丛>草甸>旱地。公式拟合的  $b$  值表示为入渗速率随时间降低的快慢性,由表可知入渗速率降低最快的是旱地,草甸次之,之后为灌丛、阔叶林,针叶林的入渗速率降低最慢。 $b$  值的变化表现出与  $a$  值相反的规律。从菲利普公式的拟合状况看,  $S$  值是反映土壤入渗能力大小的指标,表征的是土壤吸水能力,  $S$  值越小,反映其入渗能力就越弱。表 3 中可知,拟合的  $S$  值大小依次为:针叶林>阔叶林>草甸>灌丛>旱地,表明土壤吸水率

从针叶林到旱地递减,说明入渗性能也从针叶林的顺序递减,这与实测的数据灌丛>草甸趋势不相符合。拟合  $A$  值反映的是稳定入渗速率,  $A$  值越大表征的速率就越大。稳定入渗速率从针叶林、阔叶林、灌丛、草甸、旱地递减。霍顿公式拟合的  $R^2$  也均较高,说明用 Horton 公式的拟合效果较好,但是表征入渗速率随时间变化快慢的  $k$  值显示针叶林样地土壤入渗速率随时间降低最快,这与实测值不相符。从公式的拟合效果来看,考斯加科夫公式拟合的结果与实际测得数据之间的相关系数最高。

### 3.3 入渗影响因子分析

3.3.1 影响因子相关分析 运用 SPSS 19.0 软件对影响土壤水分入渗特征的因子与土壤入渗特征进行相关性分析,结果详见表 4。

从表 4 可知,土壤自然含水率对土壤入渗性能

(初始入渗率、稳定入渗率、累积入渗量)的影响极不显著,这与前人<sup>[13]</sup>的研究结果相悖。这可能与本研究区的土壤初始含水率较其他地区高有关,高含水率导致基质吸力下降明显,失去基质势梯度量的作用后对水分的入渗性能影响较小。刘新平<sup>[14]</sup>也指出入渗初期含水率增加将致使土壤入渗速率减小;随着入渗时长的不断延续,其对入渗的影响变小,最终可考虑忽略不计。通常认为土壤有机质通过促进团聚体的发育、形成而影响土壤的渗透性能,从表 2 可知研究区土壤表层有机质含量较高,进行相关分析时可知其对初始入渗率呈现出显著影响,而对稳定入渗率和累积入渗量则表现为极显著关系,这与大多数研究结论一致<sup>[15]</sup>。从表 2 可知,针叶林土壤表层有机质含量最高为 26.42,为第 2 位的阔叶林地的 1.63 倍,所以针叶林土壤入渗速率最快。

土壤毛管孔隙度和容重对土壤渗透性能均表现出显著影响,但效果呈现相反的不一致性。土壤容重越大,土体内部颗粒与颗粒之间就越紧实,水分通过的性能就越差。土壤渗透性能与毛管孔隙度呈正相

关关系,但相关性不如容重与渗透性能的相关系数高,这可能是因为孔隙度影响渗透性是取决于毛管孔隙与非毛管孔隙的双重影响。研究中非毛管孔隙度对入渗的影响未达显著水平,与大多数人的研究结论不一致<sup>[16-17]</sup>。这可能是因为碧塔海湿地保护区土壤的初始含水率较高,由于长时间浸泡导致土壤颗粒吸收大量水分而膨胀,使得土壤中非毛管孔隙度极度减小,远远小于毛管孔隙度(表 2),导致非毛管孔隙度对下渗影响微弱。

由表 4 可以看出,土壤砂黏比与入渗特征均达到显著相关关系。这是因为土壤砂黏比大的土壤含砂量高,质地粗糙结构疏松,透水性能就越强。从表 4 知,旱地与草甸地土壤砂黏比较低,影响了水分下渗到底层的过程。粉粒含量对土壤呈现负相关关系,但没达显著水平。 $>5$  mm 的水稳性团聚体与入渗的相关性较高,与 $>2$  mm, $>0.25$  mm 水稳性团聚体相比其对促进入渗率与增加入渗量的贡献最大,针叶林、阔叶林、灌丛、草甸、旱地之间的水稳性团聚体差异明显,从而导致了各地类入渗特征的区别性。

表 4 土壤入渗性能与影响因子相关性分析

入渗特征	自然含水率	有机质	容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	砂黏比	粉粒	水稳性大团聚体		
								$>5$ mm	$>2$ mm	$>0.25$ mm
初始入渗率	0.722	0.950*	-0.956*	0.932*	0.792	0.959**	-0.074	0.891*	0.496	0.518
稳定入渗率	0.821	0.963**	-0.985**	0.924*	0.835	0.985**	-0.129	0.974**	0.672	0.705
累积入渗量	0.778	0.970**	-0.984**	0.961**	0.812	0.989**	-0.083	0.956*	0.604	0.627

注: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.3.2 影响因子主成分分析 运用 SPSS 19.0 软件对影响因素进行主成分分析,分析时 KMO 检验值为 0.610, sig=0.000, 且从表 5 看出前 3 个特征值 $>1$ 的成分累积贡献率达到 86.684%, 满足主成分分析条件,故可以从前 3 个成分来表征对入渗性能的影响。从表 5—6 可以看出,第 1 主成分的方差贡献率最大达到了 56.79%, 负荷量绝对值 $>0.5$ 的影响因素为有机质、容重、水稳性团聚体、孔隙度、自然含水率和砂黏比决定;代表第 2 主成分的方差贡献率为 18.46%, 由表 6 可知影响因素为粉粒、 $>2$  mm 水稳性团聚体、 $>0.25$  mm 水稳性大团聚体含量、毛管孔隙度及非毛管孔隙度;第 3 主成分仅为 11.44%, 影响因素为毛管孔隙度与粉粒含量。结合各成分方差贡献率与影响因子负荷量绝对值大小,经过分析影响入渗的 3 个主要因子是有机质、容重、 $>5$  mm 水稳性大团聚体,而自然含水率、 $>2$  mm 水稳性大团聚体、粉粒含量等对入渗的影响较小。这与相关分析的结果也较为吻合。由主成分分析可知该类土壤有机质含量高、容重小、 $>5$  mm 水稳性团聚体较多,且具有较

高孔隙度,结合表 2 可知,此类样地为具有较高入渗性能的针叶林。

表 5 主成分方差贡献率

成份	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	5.679	56.786	56.786
2	1.846	18.462	75.248
3	1.144	11.436	86.684

表 6 影响因素主成分负荷矩阵

影响因素	$F_1$	$F_2$	$F_3$
自然含水率	0.848	-0.208	0.202
有机质	0.915	-0.195	0.005
容重	-0.874	0.269	-0.070
毛管孔隙度	0.809	-0.512	-0.215
毛管孔隙度	0.092	0.637	0.643
砂黏比	0.787	-0.070	0.443
粉粒	-0.441	-0.656	0.563
$>5$ mm 团聚体	0.891	0.034	-0.046
$>2$ mm 团聚体	0.730	0.516	0.205
$>0.25$ mm 团聚体	0.745	0.567	-0.285

## 4 讨论与结论

(1) 碧塔海流域不同覆被类型的土壤入渗性能存在明显差异,旱地和草甸样地土壤的入渗远远低于针叶林、阔叶林、灌丛样地,其中针叶林表现出最好的入渗特性。旱地的有机质含量、孔隙度都较低,水分入渗性不强,加之没有植被护庇,容易造成土壤机械结皮与提前产流的发生。

(2) 有机质、容重、 $>5\text{ mm}$ 水稳性大团聚体是影响碧塔海流域土壤入渗的重要因子,有机质含量对促进团聚体的形成、改善土壤结构起着至关重要的作用,容重减小,土壤下渗随之增强,在暴雨来临时可减少发生侵蚀与洪涝灾害的可能。

(3) 利用3种模型对入渗速率与时间进行模拟,通过数据对比可知考氏模型对碧塔海流域土壤入渗过程的拟合效果最佳。

(4) 目前针对碧塔海流域的旅游资源已开展了诸多研究,也有很多学者呼吁应多着眼于对生态环境的保护,但是对于碧塔海地区的土壤水文方面的研究甚少,关于土壤理化性质对入渗特性之间的定量研究更少,今后应把碧塔海湿地的土地利用及管理作为重点研究对象。结合前面的讨论可知,有林地较早地对水源涵养、防止发生水土流失、提高土壤的水土保持功能具有更大的贡献,因此对碧塔海现有林地进行利用性保护,发挥其生态效益价值对湿地保护显得尤为重要。另外在保护原有林地的基础上应重视对宜林旱地进行育林造林工程,充分利用林分挡雨、蓄水、减流、固沙的特性,促使土壤达到并维持健康发育的新平衡。

### [参 考 文 献]

- [1] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [2] 田积莹.黄土地区土壤的物理性质及与黄土成因的关系[J].中国科学院西北水保所集刊,1987,1(8):1-12.
- [3] 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.
- [4] 王金亮,王平,鲁芬,等.碧塔海景区旅游活动对湿地生态环境影响研究[J].地理科学进展,2004,23(5):101-108.
- [5] 董跃宇,喻庆国,刘朝蓬,等.基于Markov模型的碧塔海流域景观动态分析[J].广东农业科学,2013,40(18):194-197.
- [6] 贝荣塔,陈慧泉,田昆.碧塔海自然保护区土壤养分研究[J].西南林学院学报,2003,23(2):61-64.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定方法[M].北京:科学出版社,1978:140-148.
- [8] 勃海锋,刘国彬,王国梁.黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J].水土保持通报,2007,27(3):1-5,31.
- [9] 陈安强,张丹,熊东红,等.元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J].农业工程学报,2012,28(5):108-113.
- [10] Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Soil Science, 1932,97(1):17-21.
- [11] Philip J R. The theory of infiltration about captivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(4):257-264.
- [12] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(2): 399-417.
- [13] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.
- [14] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.干旱半干旱区沙漠化土地水分动态研究进展[J].水土保持研究,2005,12(1):63-68.
- [15] Liu Zhiqin, Lang Nanjun, Wang Keqin. Infiltration Characteristics Under Different Land Uses in Yuanmou Dry-Hot Valley Area[M]//Proceedings of the 2nd International Conference on Green Communications and Networks 2012(GCN 2012): Volume 1. Springer Berlin Heidelberg, 2013:567-572.
- [16] 朱冰冰,张平仓,丁文峰,等.长江中上游地区土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2008,28(4):43-47.
- [17] 刘芝芹,王克勤.金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,28(2):57-62.