

太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究

张志华¹, 桑玉强¹, 孔玉华¹, 冯雪瑾¹, 贾长荣², 石岳峰^{3*}

(1.河南农业大学 林学院, 郑州 450002; 2.国有济源市南山林场, 河南 济源 459000;
3.黄河水资源保护科学研究院, 郑州 450002)

摘要:【目的】探究太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能的影响,模拟不同坡位土壤水分入渗过程并选择该研究区的最适模型。【方法】选择栓皮栎林、侧柏林及撂荒地的典型坡面,通过野外调查和室内分析相结合的方法,研究了该地区不同植被类型条件下土壤渗透性能的坡位差异,分析了Horton模型、Philip模型和Kostiakov模型对不同坡位水分入渗过程的拟合效果。【结果】3种林型不同坡位间的初渗率、稳渗率及平均入渗率总体均表现为坡上>坡中>坡下。在栓皮栎林坡上的稳渗率比坡中及坡下分别增加了29.41%和83.33%,在侧柏林分别增加了90.43%和67.29%,在撂荒地分别增加了20.00%和36.63%。Horton模型、Philip模型和Kostiakov模型对不同坡位水分入渗过程拟合的判定系数分别为0.90、0.74和0.96。【结论】不同植被类型下的土壤渗透性能具有显著的坡位差异。在整个入渗阶段,坡上的累积入渗量是最大的,体现了较好的入渗性能。Kostiakov模型和Horton入渗模型更适合研究太行山低山丘陵区坡面的土壤水分入渗过程。

关键词:低山丘陵;坡位;入渗性能;入渗模型

中图分类号:S157

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.20170043

张志华,桑玉强,孔玉华,等.太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究[J].灌溉排水学报,2018,37(9):43-47,78.

0 引言

土壤水分入渗过程和渗透能力决定了降雨过程中的水分再分配,从而影响了土壤水分状况、地表径流和流域产流^[1]。森林土壤渗透性能是评价森林土壤水分调节能力和林分涵养水源的重要指标之一,是影响土壤侵蚀的重要因素^[2]。因此,研究林地土壤水分入渗规律对揭示森林流域产流机制和森林调洪作用具有重要意义。我国森林多处于山区,地形条件复杂多变。地形因素可以通过影响土壤理化性质、土层厚度、砾石量、植被特征等途径影响土壤入渗性能^[3-5],即使很小的地形变化也会造成短距离内土壤条件的剧烈变化^[6]。坡位作为重要的地形因子,对林地土壤渗透性能有重要影响。但是目前对于林地土壤入渗性能的研究主要集中在不同植被类型、不同经营管理方式及不同恢复年限土壤渗透性能比较等方面^[7-9],而坡位对土壤入渗性能的影响研究还较缺乏。

太行山低山丘陵区是我国华北平原的重要生态屏障,人工造林是该地区林业生态建设的重要内容^[10]。栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)是该区主要的造林树种。为此,以太行山区栓皮栎、侧柏、荒坡地为研究对象,开展坡位(坡上、坡中、坡下)对土壤水分入渗过程及特征的影响研究,为该区水土流失防治和生态建设提供一定科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于河南省济源市内,隶属于中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)的黄河小浪底森林生态

收稿日期:2017-12-15

基金项目:河南省教育厅重点项目(18A220002,16A220003);河南农业大学科研启动项目(30601007)

作者简介:张志华(1984-),女,山东菏泽人。讲师,博士。E-mail: zhihua1221@163.com

通信作者:石岳峰(1983-),男,山东泰安人。高级工程师,博士。E-mail: 2004_syf@163.com

系统定位研究站(35°01' N, 112°28' E), 海拔在 320~650 m 之间, 坡度范围为 15°~45°。研究区属于暖温带大陆性季风气候, 降水充沛, 但分布不均匀, 多集中在 6—9 月, 年均降雨量为 613 mm, 其他季节多为无效降雨, 降水年际变化大, 分配不均匀。年平均气温 13.1 °C, 7 月平均气温 26.2 °C, 1 月平均气温 -0.5 °C。研究区土壤主要为在花岗片麻岩的土壤母质上发育而来的山地褐土, 有效土壤厚度较薄且保肥保水能力差。试验区林分以人工林为主, 栓皮栎(*Quercus variabilis*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)为该地区代表性树种。

1.2 样地选择及土样的采集

在研究区选择坡向、坡度、坡长、海拔等立地条件相似的侧柏林、栓皮栎林和撂荒地的代表性坡面。在坡面的坡上、坡中及坡下位置分别设置 3 块 10 m×10 m 的样地。在每个样地中选择具有代表性的样点, 清理地表凋落物后, 随机挖掘 3 个土壤剖面, 用环刀(直径 50.46 mm、高 50 mm)分 2 层(0~10、10~20 cm)取原状土样, 每个剖面取 2 组土样, 一组用于测定土壤入渗性能, 一组用于测定土壤体积质量等物理性质; 同时, 采用 S 形布点分 2 层采集土壤混合样品用于土壤全碳及全氮的测定。取样时间为上一次降雨 7 d 后, 且取样期间也未有降雨发生。

土壤渗透特性(初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗量)的测定采用双环刀入渗法^[11]。首先, 将样品浸水 12 h(土壤达到饱和或接近饱和的状态), 注意水面不要超过土壤样品, 以便于土壤中气体的排出; 然后将环刀取出, 待重力水滴完后在环刀上口另接一个空环刀, 接口处用胶布封好, 以免从接口处漏水, 然后将其放入架好的漏斗上, 漏斗下承接烧杯; 向上面空环刀内缓缓注水, 避免破坏其土壤结构, 待水面比环刀口低 1 mm 时即停止加水; 保持 5 mm 的水头。试验过程中, 在最初的 11 min 内分别隔 1、2、3、5 min 记录渗透出水量, 11 min 后每隔 10 min 记录渗透出水量, 直到单位时间内渗出水量相等为止。考虑到温度对渗透系数的影响很大, 为使不同温度下测得的渗透系数便于比较, 在测定渗透的同时, 用温度计测定水层温度 θ , 将测得的渗透系数 K_θ 换算为 10 °C 的渗透系数 K_{10} 。计算公式为:

$$K_\theta = \frac{10Q_n l}{t_n S(h+l)}, \quad (1)$$

式中: K_θ 温度为 θ 时的渗透系数(mm/min); Q_n 为每次渗出水量(mL); t_n 为每次渗滤所间隔的时间(min); S 为环刀横断面积(cm^2); l 为供试土样高度(cm); h 为水层厚度(cm)。

$$K_{10} = \frac{K_\theta}{0.07 + 0.03\theta}, \quad (2)$$

式中: K_{10} 温度为 10 °C 时的渗透系数(mm/min); θ 为测定渗透时的水层温度(°C)。

土壤体积质量采用环刀法测定; 土壤全碳和全氮采用 vario MACRO cube 元素分析仪(Elementar, Hanau, Germany)测定^[12]。vario MACRO cube 元素分析仪实验原理为样品在氦气气氛内通氧燃烧, 生成氧化产物选择性分离、纯化后通过热导检测器检测, 从而得到样品中碳、氮元素的质量分数。不同植被类型代表性坡面的基本情况见表 1。

表 1 不同样地基本情况

树种	海拔/m	坡度/(°)	土层厚度/cm	体积质量/($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)	全碳量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	林龄/a	树高/m	胸径/cm	郁闭度	林分密度/(株· hm^2)
侧柏	398	15~20	40	1.37	27.29	2.47	30	7.2	10.3	0.8	1 767
栓皮栎	357	16~22	35	1.36	18.11	1.85	30	8.5	10.7	0.9	1 830
撂荒地	378	13~19	20	—	12.19	1.27	—	—	—	—	—

1.3 数据处理

采用 Horton、Philip、Kostiakov 模型对土壤入渗过程进行拟合。

1) Horton 模型: $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$ 。式中: $f(t)$ 为土壤入渗速率; f_0 和 f_c 分别表示初渗速率和稳渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); k 为衰减指数, 值越小表示土壤衰减越慢。

2) Philip 模型: $f(t) = 0.5St^{\frac{1}{2}} + A$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); S 为模型参数, 表征土壤入渗能力的强弱; A 为稳渗速率(mm/min)。

3) Kostiakov 模型: $f(t) = at^{-b}$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 为拟合参数, 分别描述土壤入渗速率随时间变化的程度和土壤入渗开始后第 1 时段内的平均入渗速率。

用 Excel 处理数据并绘制图表, 用 SPSS17.0 软件对数据进行方差分析和单因素多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤入渗特征

不同林型土壤入渗特征如表2所示。在栓皮栎人工林,虽然不同坡位间的土壤水分初渗率及稳渗率差异均不显著,但是仍表现出坡上>坡中>坡下的趋势;坡上的稳渗率比坡中及坡下分别增加了29.41%和83.33%。平均入渗速率表现为坡上>坡中>坡下,坡上的平均入渗速率分别比坡中和坡下增加了40.41%和126%,坡上与坡下的差异显著。在侧柏人工林,坡上的初渗速率、稳渗率及平均入渗率比坡中分别增加了76.50%、90.43%及96.88%,比坡下分别增加了82.38%、67.29%及84.33%,坡上的初渗速率、稳渗率及平均入渗率均显著高于坡中及坡下,而坡中与坡下的差异不显著。在撂荒地,不同坡位间的初渗速率表现为坡上>坡中>坡下,但是差异未达显著水平;坡上的稳渗率及平均入渗速率均表现为坡上最大,坡下最小,坡中居中,且坡上与坡下的差异显著。其中,坡上的稳渗率比坡中及坡下分别增加了20.00%和36.63%。3种林型不同坡位间的初渗率、稳渗率及平均入渗率总体均表现为坡上>坡中>坡下。

表2 不同坡位土壤入渗特征

林型	坡位	mm/min		
		初渗率	稳渗率	平均入渗率
栓皮栎	坡上	34.20±4.85a	11.00±1.89a	19.18±2.68a
	坡中	27.00±6.24a	8.50±2.30a	13.66±2.55ab
	坡下	21.25±5.19a	6.00±0.17a	8.50±1.51b
侧柏	坡上	38.30±6.71a	17.90±1.90a	24.59±7.18a
	坡中	21.7±3.09b	9.40±1.19b	12.49±0.99b
	坡下	21±5.04b	10.70±0.37b	13.34±1.38b
撂荒地	坡上	45.00±8.29a	13.80±3.16a	21.41±2.54a
	坡中	36.0±6.85a	11.50±2.50ab	16.81±2.91ab
	坡下	28.1±3.38a	10.10±0.90b	14.59±1.89b

注 表中数值为(平均值±标准差);表中同一列不同字母代表差异显著,相同字母代表差异不显著。

2.2 土壤入渗过程

由图1可知,在3种不同林型土壤坡面上,水分入渗变化规律一致,初渗阶段入渗速率很高,随着入渗时间的增加,入渗速率急剧下降,之后又缓慢下降,最终保持稳定。栓皮栎土壤水分从初渗直至稳渗均表现为坡上>坡中>坡下;坡上、坡中、坡下的入渗速率在0~11 min内均急剧下降;坡上的入渗速率在71 min达到稳定,坡中的入渗速率在51 min达到稳定,坡下在41 min达到稳定。侧柏整个入渗过程中坡上的入渗速率均远高于坡中与坡下,坡下的入渗速率略高于坡中,但二者间的差异未达显著水平。侧柏坡上的入渗速率在0~11 min内急剧下降,在71 min时达到稳定,而坡中与坡下的入渗速率仅在0~6 min内急剧下降,在51 min就达到了稳定状态。撂荒地不同坡位间土壤水分入渗过程与栓皮栎类似,即从初渗直至稳渗表现为坡上>坡中>坡下的规律;不同坡位的入渗速率在0~11 min内急剧下降;坡上和坡下的入渗速率在61 min达到稳定,坡中的入渗速率在71 min达到稳定。总体而言,3种林型不同坡位间的土壤渗透速率表现为坡上>坡中>坡下,土壤水分入渗速率达到稳定的耗时也表现为坡上大于坡中与坡下,坡中与坡下相差不明显。

随着入渗过程的进行,栓皮栎林和撂荒地不同坡位水分累积入渗量变化趋势与入渗速率相似,表现为坡上>坡中>坡下,且在前11 min入渗量增长速率最快,之后逐渐缓慢(图1)。侧柏林坡上的水分累积入渗量远大于坡中与坡下,但在30 min后坡下的累积入渗量逐渐超过坡中,这与30 min后坡下的入渗速率略高于坡中有关。

2.3 土壤入渗过程拟合

土壤水分入渗是一个复杂的水文过程,土壤入渗过程模拟是研究这一物理过程的重要途径。应用Horton模型、Kostiakov模型和Philip模型对不同林型、不同坡位和不同土层深度的土壤入渗过程进行拟合,结果见表3。由表3可知,Kostiakov模型的 R^2 均值(0.963)最大,Horton模型 R^2 均值为0.902,Philip模型 R^2 均值为0.735,表明Kostiakov模型拟合值与实测值之间的拟合程度最高,Horton入渗模型拟合效果次之,Philip模型拟合效果最差。Kostiakov入渗模型中参数 a 代表一个时间段内平均入渗速率, b 的大小则反映了土壤入渗速率递减状况, b 越大,表明入渗速率随时间递减的越快。参数 a 在侧柏和撂荒地中表现出坡上>坡中>坡下的趋势,与实测得到的不同坡位土壤入渗特性基本吻合。栓皮栎、侧柏和撂荒地参数 b 最大值均出现在坡上,说明相应土壤入渗速率随时间减少最快。

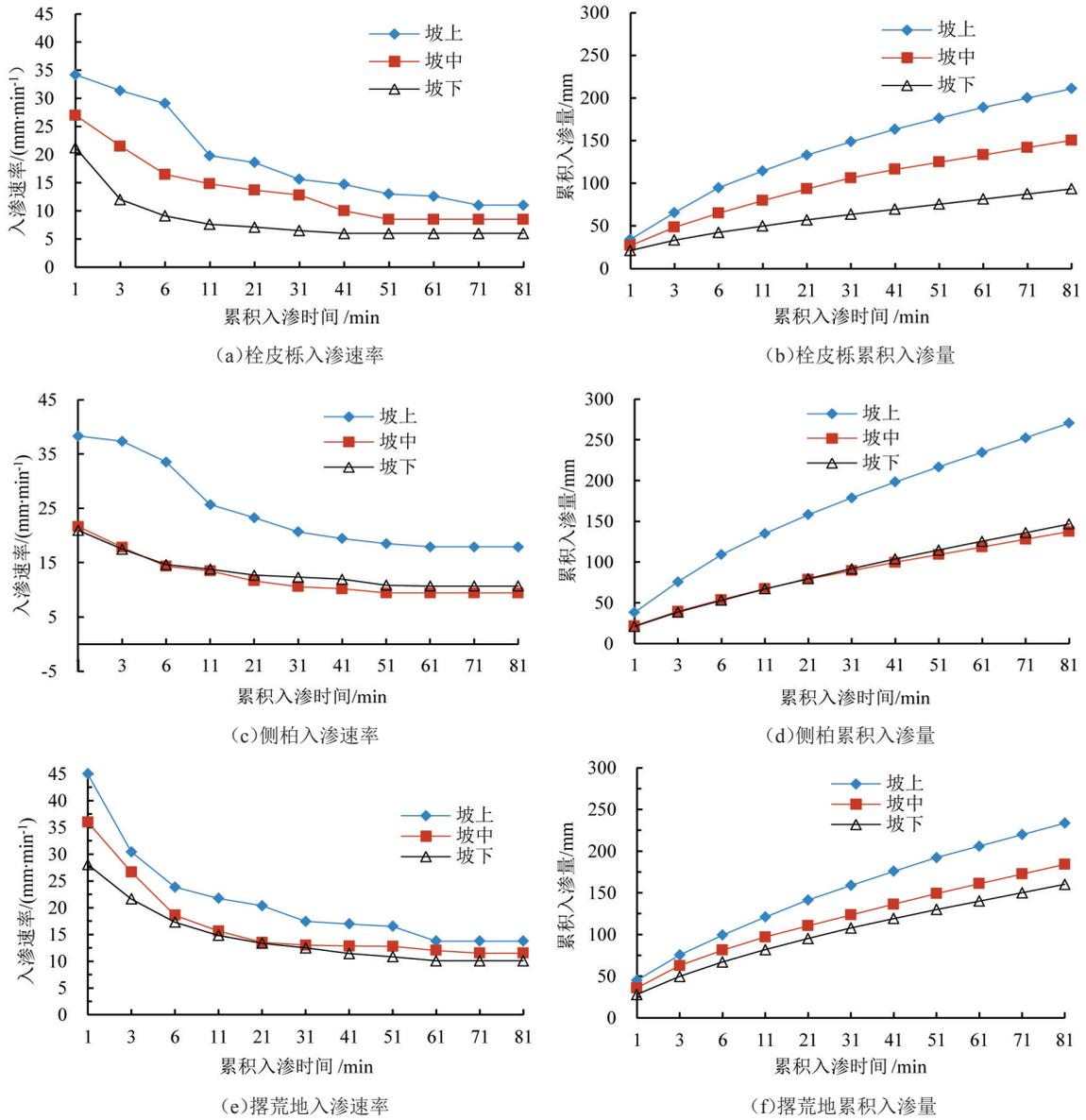


图1 3种林型土壤渗透过程曲线

表3 不同林型和坡位土壤入渗过程拟合结果

林型	坡位	Kostiakov 模型参数			Horton 模型参数				Philip 模型参数		
		a	b	R^2	f_0	f_c	k	R^2	S	A	R^2
栓皮栎	坡上	40.34	0.28	0.950	34.20	11.00	0.05	0.968	53.98	11.00	0.780
	坡中	28.35	0.28	0.963	27.00	8.35	0.07	0.896	39.68	8.35	0.621
	坡下	16.92	0.27	0.913	21.25	6.00	0.17	0.863	15.46	6.00	0.803
侧柏	坡上	47.97	0.21	0.956	38.30	17.90	0.06	0.936	43.10	17.90	0.558
	坡中	21.45	0.20	0.989	21.70	9.40	0.09	0.963	21.21	9.40	0.834
	坡下	20.36	0.15	0.983	21.00	10.70	0.09	0.866	17.29	10.70	0.442
撿荒地	坡上	42.26	0.26	0.974	45.00	13.80	0.09	0.875	37.97	13.80	0.955
	坡中	32.57	0.25	0.947	36.00	11.50	0.10	0.806	28.27	11.50	0.949
	坡下	27.44	0.24	0.991	28.10	10.10	0.09	0.945	21.12	10.10	0.669

3 讨论

土壤入渗性能直接影响着土壤对水分的再分配能力,是植被水文功能研究的重要指标,不同地形条件下土壤渗透特性差异较大。土壤入渗能力主要取决于土壤机械组成、水稳性团聚体量、土壤密度、有机质量及土壤初始含水率、温度、钠离子量及剖面特征等因素。本研究发现,不同植被类型的土壤渗透能力具有显

著的坡位差异。在土壤水分入渗过程中,坡上的初渗率、稳渗率、平均入渗速率及累积入渗量均大于坡中与坡下,且坡上入渗速率达到稳定的时间也明显长于坡中与坡下;虽然坡中与坡下的水分入渗速率差异不显著,但总体仍表现为坡中的初渗率、稳渗率、平均入渗速率及累积入渗量大于坡下。究其原因,可能是由于从坡下到坡上,土壤发育越来越缓慢,土层越浅薄,砾石量越高。在试验中发现土壤中直径>25 mm 碎石占土壤比重较大,据王慧芳等^[13]及Chen等^[14]研究结果推测,在该地区坡面方向上,主导稳定入渗的主要因子可能为土石比。在本研究中土壤有机碳及全氮量(未发表数据)亦表现为坡上>坡中>坡下,已有研究表明^[15]土壤有机碳及全氮与土壤稳渗率之间存在显著的正相关关系,所以有机碳及全氮可能也是造成不同坡位间土壤渗透能力差异的原因。

研究结果表明Kostiakov模型拟合效果最好,Horton入渗模型次之,Philip模型拟合效果最差。陈家林等^[16]在相同研究区针对不同植被类型土壤渗透特性的研究发现,Philip模型拟合效果最好,Kostiakov模型次之,Horton入渗模型最差;闫东峰等^[17]针对丹江口库区不同植被类型根系对土壤渗透性的影响研究则发现,Kostiakov、Philip和Horton入渗模型均能很好描述土壤入渗速率与时间的关系。研究区域及对象的不同可能是造成模型适应性差异的主要原因,但还需进一步深入研究。

4 结论

1)不同植被类型下的土壤渗透性能具有显著的坡位差异。随着入渗时间的延长,3种林型不同坡位间的土壤渗透速率及累计入渗量总体表现为坡上>坡中>坡下,坡上土壤水分入渗速率达到稳定的耗时也长于坡中与坡下。

2)不同模型对研究区土壤渗透性能的拟合效果不同。在本研究中Kostiakov模型拟合效果最好,Horton入渗模型次之,Philip模型拟合效果最差,不适合本研究区坡面土壤渗透性能的拟合。

参考文献:

- [1] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J].中国水土保持科学,2012,10(6):12-18.
- [2] 曾大林.对当代林业水土保持作用的几点认识[J].中国水土保持,2000(6):25-27.
- [3] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].灌溉排水学报,2011,30(5):124-130.
- [4] 黄祺,何丙辉,秦伟,等.自然降雨条件下扰动地表土壤入渗性能变化特征[J].灌溉排水学报,2015,34(1):91-95.
- [5] 朱磊,尤今,陈泓.裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):95-100.
- [6] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,等.坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(4):114-116.
- [7] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J].中国水土保持科学,2012,10(6):12-18.
- [8] 王意银,金爱武,方升佐,等.浙西南不同经营强度下毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持研究,2015,22(2):41-46.
- [9] 刘道平,陈三雄,张金池,等.浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J].应用生态学报,2007,18(3):493-498.
- [10] 王平,张劲松,孟平,等.华北低丘山地栓皮栎人工林土壤呼吸变化特征及其与撂荒地的差异[J].中国农业气象,2011,32(3):346-349.
- [11] 闫东峰,杨喜田.豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2011,09(6):43-50.
- [12] 陈雅涵,谢宗强.样品保存条件对土壤与植物全碳全氮含量的影响[J].植物生态学报,2017,41(6):632-638.
- [13] 王慧芳,邵明安,王国丽.黄土高原土石山区碎石分布特征及其导水性分析[J].灌溉排水学报,2010,29(3):116-120.
- [14] CHEN H, LIU J, WANG K, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. Catena, 2011, 84(1):21-28.
- [15] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [16] 陈家林,郭二辉,杨果果,等.太行山低山丘陵区不同水土保持林地土壤渗透性能及其影响因素研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):34-40.
- [17] 闫东峰,王德彩,杨喜田.丹江口库区不同植被类型地表根系对土壤渗透性的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(3):35-44.

(下转第78页)

Dynamic of Groundwater Table in Baoshan Farm

JIA Yanhui¹, WU Yugang², ZHU Wenjiang², MA Chunya¹, LI Jinshan^{1*}, YIA Huanqing³

(1.Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2.Baoshan Farm, Jiamusi 154000, China; 3. Huojia Management Office of Henan People's Victory Canal Administration, Huojia 453800, China)

Abstract: **【Objective】** The change in groundwater table affects many ecohydrological processes and this paper analyzed the dynamics of the depth of groundwater table at Baoshan farm in Heilongjiang Province. **【Method】** The seasonal variability of groundwater table was analyzed based on the measured data from 1997 to 2007 at Baoshan farm. The annual variation of the groundwater table was analyzed by the two-way regression combined with the standardized precipitation index (*SPI*), and the possible trend in the change of groundwater table was analyzed using rescaled range analysis (*R/S*). **【Result】** Groundwater table dropped 0 to 2 m during the growing season of rice due to extraction for groundwater irrigation, and it then rebounded to normal level in the following fallow period before planting the rice again. A precipitation of 80 cm during the rice growth season could lead to the groundwater table rising by 1.0 m. Temporally, annual average groundwater table showed a steady rise or dropping. There was a strong linear relationship between the groundwater table and *SPI* with $R^2=0.680$. **【Conclusion】** Precipitation and irrigation are the major factors influencing the dynamics of the groundwater table at Baoshan farm. Keeping extraction and recharge of the groundwater resources at a reasonable ratio at Baoshan farm is the key to prevent waterlogging and the secondary soil salinity.

Key words: Baoshan farm; groundwater; dynamic analysis

责任编辑:陆红飞

(上接第 47 页)

The Variation of Water Infiltration Rate over Various Slopes in Taihang Mountain

ZHANG Zhihua¹, SANG Yuqiang¹, KONG Yuhua¹, FENG Xuejin¹, JIA Changrong², SHI Yuefeng^{3*}

(1. Forestry College of Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 2.State-owned Nanshan Forest Farm in Jiyuan, Jiyuan 459000, China; 3. Water Resources Protection and Research Institute, YRBWRPB, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: **【Objective】** This study was to explore the variation of water infiltration over different slopes in Taihang Mountain. **【Method】** Representative slopes were selected in an abandoned land and two man-made forests with *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* plantation respectively. Based on field investigation and lab analysis, infiltration experiments were conducted at different location of the slopes. The Horton model, the Philip model and the Kostikov model were used to simulate the infiltration processes. **【Result】** The initial infiltration rate, steady infiltration rate and average infiltration rate in the upper part of all slopes were the highest, followed by the middle and bottom parts. The steady infiltration rate in the upper slope with *Quercus variabilis* plantation increased 29.41% and 83.33%, compared to that in the middle and bottom parts of the slope respectively. For the slope with *Platycladus orientalis* plantation these increases were 90.43% and 67.29% respectively, while for the slope in the abandoned land they were 20.00% and 36.63% respectively. The determination coefficient of the Horton model, Philip model and Kostikov model was 0.90, 0.74 and 0.96, respectively. **【Conclusion】** Water infiltration over a slope varied considerably, with the rate on the upper part much higher than that on the middle and bottom. The Kostikov model and the Horton infiltration model appeared to be more suitable for describing the water infiltration processes in the areas we studied.

Key words: hilly area; slope position; infiltration properties; infiltration model

责任编辑:白芳芳