

河北坝上与坝下不同土地利用类型土壤 入渗特征及其影响因素

王晓艺^{1,2}, 苏正安¹, 马菁², 杨鸿琨^{1,3}, 何周窈^{1,4}, 周涛^{1,5}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 四川农业大学水利水电学院, 雅安 625014; 3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;

4. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为查明河北省坝上与坝下不同土地利用类型土壤入渗能力, 选择张北县(坝上风蚀区)和阳原县(坝下水蚀区)作为典型研究区, 采用微型圆盘入渗仪测量土壤入渗特性, 并分析其主要影响因素。研究表明: (1) 阳原县不同土地利用类型土壤渗透性能表现为: 高盖度草地>低盖度草地>耕地>林地, 张北县表现为: 草地>耕地>灌木林地>防护林地; (2) 不同入渗模型拟合度之间存在显著差异, 其中 Philip 模型拟合效果最佳; (3) 土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗时间与容重呈极显著负相关关系, 而与总孔隙度均呈极显著正相关关系。结果表明, 该区草地土壤入渗能力最强, 后期开展生态工程建设时应更加重视草地涵养水源的作用。

关键词: 土壤入渗能力; 土地利用类型; 微型圆盘入渗仪; 入渗模型; 影响因素

土壤水分入渗是陆地生态系统水循环的一个重要过程, 是分析植被水分收支, 潜在表层水土流失, 径流和地下水补给等的重要参数^[1-3]。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^[4], 也是土壤水循环的重要环节^[5]。土壤入渗性能可由初始入渗速率和稳定入渗速率等因素决定。目前土壤学者关于土壤入渗性能的研究主要集中在植被对土壤入渗性能的影响^[6], 不同种类或成土母质土壤水分入渗性能的分析与比较^[7], 土壤物理性质与土壤入渗性能关系等方面^[8]。与此同时, 以往的研究表明, 土壤入渗能力也受土地利用类型影响, 如土地利用类型的变化会导致土壤理化性质发生相应变化, 包括土壤有机质、总孔隙度、非毛管孔隙度、初始含水量和容重的变化, 均会导致土壤入渗性能发生相应变化^[3,9-12]。因此, 开展不同气候区、地貌类型区不同土地利用方式土壤的入渗能力差异及其对比研究具有重要的科学意义, 且目前较少开展同一土地利用类型土壤入渗性能在不同土壤侵蚀类型区的对比研究。

张家口市位于河北省西北部, 处于蒙古高原与华北平原的过渡带, 地势西北高、东南低。张家口市作为 2022 年冬奥会的举办城市, 地处我国的农牧交错生态脆弱带, 其特殊的地理位置和地势条件决定了张家口是京津冀城市群水源涵养、防风固沙和水土保持三大功能的交汇地带, 是维护京津冀生态安全的重要屏障, 在京津冀协同发展中具有不可替代的生态地位^[13-15]。张家口市张北县和阳原县是我国土壤侵蚀比较严重的区域之一, 也是河北省坝上风蚀区和坝下水蚀区的典型代表区。本文通过对这两个区域不同土地利

收稿日期: 2019-07-02; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101-001); 四川省应用基础研究科技计划项目 (2018JY0034); 四川省重大科技专项 (2018SZDZX0034)

作者简介: 王晓艺 (1995-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 研究方向为土壤侵蚀与水源涵养。E-mail: 714181692@qq.com

通讯作者: 苏正安 (1980-), 男, 四川江油人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为土壤侵蚀和水土保持。

E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

用类型土壤入渗性能进行对比和分析, 查明该区典型土地利用类型土壤的水源涵养能力, 有利于服务2022年冬奥会相关进程以及该区域后期的生态工程建设^[6]。

目前, 测定土壤入渗性能方法较多, 主要分为室内方法和野外方法两大类。室内方法主要有定水头法和降水头法^[17]; 野外测定方法主要有单环法、双环法、圆盘渗透仪法、Philip-Dunne入渗仪法^[18-21]等。目前, 应用较为广泛的野外测定方法在实际操作中对土壤的破坏较大且操作复杂。微型圆盘入渗仪^[18]设计结构紧凑简单, 所需水量少, 操作简单、对土壤的破坏性小, 更加适合野外测定使用和推广^[22-24]。

利用微型圆盘入渗仪对张家口市张北县和阳原县4种不同土地利用类型入渗性能进行野外测定, 旨在比较和分析张家口典型水蚀区和风蚀区不同土地利用类型的土壤渗透特性, 从而为该区生态工程建设提供重要的理论依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

张家口市张北县和阳原县地处河北省的西北部, 分别位于内蒙古高原南缘的坝上地区以及华北平原与蒙古高原过渡带(天山—阴山纬向构造带南缘)。张北县地势东南高西北低, 地处 $114^{\circ}10' \sim 125^{\circ}27'E$ 、 $40^{\circ}57' \sim 41^{\circ}34'N$, 属温带大陆性季风气候, 常年受内蒙古高压控制, 年均降雨量397.6 mm, 年均气温 $26^{\circ}C$, 年均7级以上大风日数5天, 最多91天, 属于典型的风蚀区^[25]。阳原县境内南北环山, 呈两山夹一川的狭长盆地, 地处 $39^{\circ}53' \sim 40^{\circ}22'N$ 、 $113^{\circ}54' \sim 114^{\circ}48'E$, 属于东亚大陆性季风气候中温带干旱地区, 全县平均年降水量364.6 mm, 而6-9月降水量约为全年总量的75%, 夏季易降暴雨, 历时短强度大, 属于典型的水蚀区。张北县自然植被大部分为干草原和滩地草甸草原, 属于我国典型的农牧交错带, 很多区域风沙化、盐渍化严重, 河流水系主要是内陆河、滦河、潮白河, 同时也是是滦河、潮白河的发源地, 是京津地区的重要水源涵养区, 土壤类型主要为栗钙土; 阳原县植被类型主要为针阔混交林, 境内桑干河自西向东横贯全境, 主要河流为桑干河和壶口河, 属于海河流域永定河水系, 土壤类型主要为栗褐土。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集和处理

为查明河北省典型水蚀区和风蚀区不同土地利用类型土壤入渗能力, 于2018年5月分别在河北省张家口市坝上风蚀区和坝下水蚀区开展土壤入渗实验。张北县属于河北省典型的坝上风蚀区, 选择了4种具有代表性的土地利用类型: 草地、防护林、耕地、灌木林, 土壤类型均为栗钙土; 阳原县属于河北省典型的坝下水蚀区, 同样选择了4种具有代表性的土地利用类型: 高盖度草地、低盖度草地、林地、耕地, 土壤类型均为栗褐土。综合考虑成土母质、地形状况等因素, 在保证这些条件基本一致的前提下, 基于典型性和代表性原则, 以及随机布点的原则, 去除附着在样点表面的枯枝落叶等杂物, 用微型圆盘入渗仪对样地进行土壤导水率测量。水平放置好仪器, 注入水样, 设定虹吸速度为2 cm, 同时用秒表计时, 每隔30 s记录一次水位变化读数, 直到300 s后停止计数。在每个研究区选点, 至少3次重复, 取平均值作为最后分析计算值。分别在张北县和阳原县两个研究区典型土地利用类型区选择4个具有代表性的实验点, 每个区域共选取了16个样点进行土壤入渗实验。在每个入渗仪周围用土钻采集1份表层0~20 cm土样, 置于做好标记的自封袋中, 编号并带回实验室进行处理, 去除土样中的植物残体、

小石块等,用于土壤容重测量以及土壤理化性质分析。

1.2.2 土壤样品分析

土壤含水量用烘干法进行测定,土壤容重用环刀法测定,土壤总孔隙度在容重的基础上用经验公式得出。

1.2.3 数据分析

土壤入渗性能采用多次实验的平均值,文中数据采用Kostiakov公式、Philip公式以及G-P综合模型,利用Matlab R 2018 a统计软件分别对入渗过程进行拟合,分析拟合结果并利用SPSS 23.0软件中的相关分析等方法进行数据处理。各模型表达式为:

$$f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率; t 为入渗时间; a 、 b 为模拟求得的参数。

$$f(t) = 0.5St^{0.5} + A \quad (2)$$

式中: A 为稳定入渗速率; S 为经验系数。

$$f(t) = Mt^{-0.5} + N \quad (3)$$

式中: M 、 N 为经验系数。

2 结果分析

2.1 同一研究区不同土地利用类型土壤水分入渗特征

土壤入渗性能能够直接影响地表径流的产生、土壤侵蚀和化学物质运移等过程,是描述地表水文过程的重要参数^[26-29]。由表1可知,张北县草地的初始入渗速率(0.267 mm/s)最大,分别是耕地、灌木林和防护林的1.6倍、2.3倍和2.7倍;草地的稳定入渗速率(0.1 mm/s)分别是耕地、灌木林和防护林的1.2倍、2.0倍和3.0倍;耕地的稳定入渗时间(120 s)最大,分别是草地、灌木林和防护林的1.2倍、1.3倍和2倍;草地的饱和导水率(23 mm/h)最大,分别是耕地、灌木林和防护林的1.3倍、2.8倍和3.5倍。阳原县高盖度草地的初始入渗速率(0.167 mm/s)最大,分别是低盖度草地、耕地和林地的1.7倍、2.5倍和2.5倍,由于林地(杏林地)刚刚经过人为扰动,所以其初始入渗速率与耕地相似;高盖度草地的稳定入渗速率(0.07 mm/s)也是最大,分别是低盖度草地、耕地和林地的1.3倍、1.7倍和2倍;高盖度草地的稳定入渗时间(120 s)最大,分别是低盖度草地、耕地和林地的1.3倍、1.3倍和2倍;高盖度草地的饱和导水率(18.26 mm/h)最大,分别是低盖度草地、耕地和林地的1.5倍、2.2倍和3.2倍。

表1 不同土地利用类型土壤入渗性能

Table 1 Soil infiltration capacity under different land use types

土地利用类型		初始入渗速率/(ml/s)	稳定入渗速率/(ml/s)	稳定入渗时间/s	饱和导水率k/(mm/h)
张北县	耕地	5	2.5	120	18
	草地	8	3	100	23
	灌木林	3.5	1.5	90	8.2
	防护林	3	1	60	6.5
阳原县	高盖度草地	5	2	120	18.26
	低盖度草地	3	1.5	90	12.15
	耕地	2	1.2	90	8.41
	林地	2	1	60	5.71

土地利用类型对土壤入渗性能具有显著影响。从表2可以看出，张北县不同土地利用类型土壤理化性质差异较大，土壤容重大小顺序为：灌木林~防护林>耕地>草地，不同土地利用类型的土壤总孔隙度大小顺序与容重相反，但与土壤入渗性能大小顺序一致；阳原县土壤容重大小顺序为：耕地>林地>低盖度草地>高盖度草地，土壤的初始入渗速率和稳定入渗速率也与总孔隙度呈正相关关系，而与土壤容重呈负相关关系。该研究结果表明，土壤初始入渗速率和稳定入渗速率和总孔隙度紧密相关。这是由于草地发达的植物根系保证了土壤具有加大的总孔隙度，促进了土壤水分运动；耕地则由于初始含水率较低以及每年农民进行耕作松土导致其土壤入渗性能较好；而该区域林地多为近30~40年种植的人工林，地表未能形成较厚的枯落物和腐殖质层，加之当地放牧现象普遍，导致土壤孔隙度相对较低，土壤容重较大，尤其是张北防护林往往还被当地农民当做田间道路，土壤紧实度较高，从而导致防护林的初始入渗速率和稳定入渗速率最小。

表2 不同土地利用类型土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical characteristics under different land use types

土地利用类型	张北县				阳原县			
	耕地	草地	灌木林	防护林	高盖度草地	低盖度草地	耕地	林地
容重/(g/cm ³)	1.31	0.90	1.48	1.32	1.22	1.31	1.39	1.36
总孔隙度/%	46.40	63.22	50.24	46.17	50.24	46.53	43.32	44.31
有机质/(g/kg)	36.59	13.57	17.58	18.47	21.68	6.94	10.90	20.94
占比/%								
<0.002 m	1.01	1.96	1.17	0.83	1.95	2.42	2.10	2.13
0.002~0.02 mm	29.69	41.20	28.49	24.26	29.05	39.09	32.64	30.84
0.02~0.05 mm	21.31	33.24	22.16	23.00	37.35	37.29	36.07	37.11
0.05~0.1 mm	19.00	15.51	20.01	22.02	26.20	17.41	23.82	25.51
0.1~0.25 mm	24.96	7.23	24.18	25.86	5.33	3.12	5.24	4.41
0.25~0.5 mm	4.02	0.87	3.99	4.02	0.12	0.64	0.13	0
>0.5 mm	0	0	0	0.01	0.015	0.36	0.016	0

综上所述，张北县土壤稳定入渗时间、稳定入渗速率以及饱和导水率的大小关系均为：草地>耕地>灌木林>防护林；阳原县土壤稳定入渗时间、初始入渗速率、稳定入渗速率以及饱和导水率的大小关系为：高盖度草地>低盖度草地>耕地>林地。该研究结果与陈文媛等^[30]在黄土高原中部甘肃省泾川县官山林场的实验结果一致，这与两个研究区的林地均为近30~40年退耕形成的人工林有关；与此同时，该研究结果与莫斌等^[31]的研究结论存在一定差异，这主要是由于莫斌等^[31]研究对象为天然林地，而本研究中林地为人工林，地表未能形成较厚的枯落物和腐殖质层。

2.2 不同研究区同种土地利用类型土壤水分入渗特征

由表1和表2可知，张北县和阳原县的入渗性能之间具有显著差异。张北县土壤的初始入渗速率，稳定入渗速率以及饱和导水率均比阳原土壤高，其中张北县土壤饱和导水率分别比阳原高的114%（草地）、51%（耕地）和43%（林地）。尽管张北县和阳原县同一土地利用类型的土壤容重、总孔隙度和机械组成等差异不显著（表2），但栗钙土和栗褐土的土壤类型及其粗颗粒部分和非毛管孔隙度存在显著差异，这是影响这两个区域土壤入渗性能的主要因素。从表1可以看出，在张北地区，由于风蚀作用强烈，栗钙土砂粒较大且含量较多，>0.1 mm的细砂粒、中砂粒和粗砂粒含量占土壤颗粒组成的8%以

上,最高达到29%以上,土壤机械组成出现粗化趋势;相比而言,在阳原地区,土壤砂粒主要以0.02~0.1 mm的细砂粒为主,>0.1 mm的细砂粒往往低于6%,中砂粒和粗砂粒的含量不到1%。李红等^[32]、王蕙等^[33]研究表明,随着土壤粗粒化,土体极易分散,土壤结构变差,土壤的非毛管孔隙度均会出现相应的变化,土壤的入渗性能随之发生显著变化。前人研究表明,毛管孔隙具有毛细作用,持水性能较强;而非毛管孔隙的孔隙直径大,其中的水分主要受重力作用,通气和渗水能力较强^[21,24,29],更有利于水分的入渗。这也解释了张北县(风蚀区)同一种土地利用类型的土壤渗透性能显著大于阳原县(水蚀区)的原因。该研究结果与张振华等^[34]、蒋定生等^[35]、马婧怡等^[36]的研究结果一致。

2.3 土壤水分入渗模型拟合分析

采用Kostiakov公式、Philip公式以及G-P综合模型分别对入渗过程进行拟合,并分析拟合结果。各模型拟合结果如下:

从表3可知,不同土地利用类型的土壤入渗过程的回归模型的拟合优度存在差异。张北县不同土地利用类型的土壤入渗过程的回归模型的拟合优度大小依次为Philip模型>Kostiakov模型>G-P综合模型。张北县Philip模型的决定系数 R^2 为0.752~0.992,平均数为0.871,显著性 P 为0.002~0.009,平均数为0.006;G-P综合模型的决定系数 R^2 为0.728~0.938,平均数为0.83,显著性 P 为0.003~0.017,平均数为0.011;Kostiakov模型的决定系数 R^2 为0.721~0.969,平均数为0.867,显著性 P 为0.003~0.023,平均数为0.012。阳原县不同土地利用类型的土壤入渗过程的回归模型的拟合优度大小依次为Philip模型>G-P综合模型>Kostiakov模型。阳原县Philip模型的决定系数 R^2 为0.888~0.995,平均数为0.955,显著性 P 为0.001~0.006,平均数为0.003;G-P综合模型的决定系数 R^2 为0.882~0.951,平均数为0.912,显著性 P 为0.002~0.006,平均数为0.005;Kostiakov模型的决定系数 R^2 为0.846~0.970,平均数为0.896,显著性 P 为0.001~0.012,平均数为0.007。

由此可知,利用G-P综合模型、Kostiakov公式和Philip模型均可以较好地模拟该区不同土地利用类型的土壤入渗过程。但是综合考虑模型的相关系数和显著性,Philip模型能更好的描述这两个研究区的土壤水分入渗特征,且水蚀区的拟合优度明显好于风蚀

表3 拟合公式的相关参数 ($n=30$)

Table 3 Relevant parameters of the fitting formula

土地利用类型		Kostiakov模型	Philip模型	G-P综合模型
张北县	耕地	$f(t)=12.14t^{-0.23}$ $P=0.023, R^2=0.721$	$f(t)=12.90t^{-0.5}+2.29$ $P=0.009, R^2=0.752$	$f(t)=28.53t^{-0.5}+0.79$ $P=0.017, R^2=0.728$
	草地	$f(t)=5.11t^{-0.16}$ $P=0.003, R^2=0.969$	$f(t)=13.28t^{-0.5}+0.77$ $P=0.006, R^2=0.855$	$f(t)=20.18t^{-0.5}+0.80$ $P=0.008, R^2=0.855$
	灌木林	$f(t)=2.73t^{-0.12}$ $P=0.008, R^2=0.903$	$f(t)=4.14t^{-0.5}+1.34$ $P=0.002, R^2=0.992$	$f(t)=7.74t^{-0.5}+1.44$ $P=0.003, R^2=0.938$
	防护林	$f(t)=2.42t^{-0.16}$ $P=0.012, R^2=0.875$	$f(t)=3.36t^{-0.5}+0.85$ $P=0.006, R^2=0.885$	$f(t)=6.23t^{-0.5}+0.65$ $P=0.014, R^2=0.799$
阳原县	高盖度草地	$f(t)=5.12t^{-0.15}$ $P=0.001, R^2=0.970$	$f(t)=7.31t^{-0.5}+2.08$ $P=0.002, R^2=0.974$	$f(t)=8.28t^{-0.5}+2.35$ $P=0.002, R^2=0.951$
	低盖度草地	$f(t)=4.08t^{-0.16}$ $P=0.003, R^2=0.915$	$f(t)=6.92t^{-0.5}+1.13$ $P=0.003, R^2=0.963$	$f(t)=6.84t^{-0.5}+1.44$ $P=0.006, R^2=0.888$
	耕地	$f(t)=2.13t^{-0.05}$ $P=0.012, R^2=0.846$	$f(t)=4.87t^{-0.5}+1.17$ $P=0.001, R^2=0.995$	$f(t)=4.23t^{-0.5}+1.18$ $P=0.004, R^2=0.925$
	林地	$f(t)=1.81t^{-0.07}$ $P=0.012, R^2=0.854$	$f(t)=4.09t^{-0.5}+0.89$ $P=0.006, R^2=0.888$	$f(t)=3.07t^{-0.5}+1.05$ $P=0.006, R^2=0.882$

区。这与李广文等^[37]在祁连山八宝河流域土壤入渗模拟结果一致。

2.4 土壤水分入渗影响因素分析

土壤水分入渗是一个复杂过程，其入渗特征与土壤质地、土壤孔隙状况、土壤颗粒组成等因素有关^[27,29,35]。因此，选取容重、总孔隙度、黏粒含量 (<0.002 mm)、粉粒含量 (0.002~0.02 mm)、砂粒含量 (0.02~2 mm) 以及 0.10~0.25 mm、0.25~0.5 mm 和 0.5~2.0 mm 这 8 个相关指标作为影响因子 (表 4)，分析其与初始入渗速率、稳定入渗速率以及稳定入渗时间 3 个入渗特征值的相关性。由表 4 可知，初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗时间与容重呈极显著负相关关系，而初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗时间与总孔隙度均呈极显著正相关关系。与此同时，0.10~0.25 mm、0.25~0.5 mm 和 0.5~2.0 mm 等粒径的砂粒含量与稳定入渗速率、稳定入渗时间呈显著的正相关关系，而土壤机械组成 (黏粒、粉粒、砂粒含量) 与初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗之间则无显著的相关性。这表明土壤容重越大，土壤越紧实，土壤总孔隙度越小，土壤渗透性越弱；土壤容重越小，土壤越松散，土壤总孔隙度越大，土壤渗透性越强。这与吴发启等^[18]的入渗结论“入渗能力与非毛管孔隙度呈显著正相关”和刘芝芹等^[4]在金沙江干热河谷土壤入渗速率影响因子分析一致。值得注意的是，尽管土壤机械组成与土壤入渗性能没有显著相关关系，但该研究区土壤的粗颗粒部分，尤其是 0.1~2.0 mm 粒径的砂粒含量与土壤入渗性能具有显著的关系，是造成张家口市坝上草原以风蚀为主的栗钙土区域土壤入渗性能显著高于坝下黄土区 (以水蚀为主) 土壤入渗性能的关键影响因子。

表 4 土壤理化性质与渗透性能相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil infiltration capacity and soil physical and chemical properties

	容重	总孔隙度	占比/%					
			<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm	0.1~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.1~2.0 mm
初始入渗速率	-0.850**	0.856**	-0.355	-0.304	0.308	0.789*	0.751*	0.69
稳定入渗速率	-0.817**	0.822**	-0.367	-0.319	0.322	0.748*	0.771*	0.775*
稳定入渗时间	-0.813**	0.831**	-0.376	-0.282	0.287	0.758*	0.812**	0.895**

注：*、**分别表示相关系数在 0.05、0.01 水平上显著。

3 结论

(1) 张北县 (典型风蚀区) 不同土地利用类型的土壤渗透性能 (初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗时间以及饱和导水率) 表现为：草地 > 耕地 > 灌木林 > 防护林；阳原县 (典型水蚀区) 不同土地利用类型的土壤渗透性能 (初始入渗速率、稳定入渗速率、稳定入渗时间以及饱和导水率) 表现为：高盖度草地 > 低盖度草地 > 耕地 > 林地。

(2) 张北县 (风蚀区) 与阳原县 (水蚀区) 两个研究区之间由于土壤类型和质地差异显著，尤其是 0.1~2.0 mm 的细砂粒、中砂粒和粗砂粒含量差异显著，造成两个区域的土壤非毛管孔隙度和土壤渗透性能随之出现显著差异，且主要表现为张家口地区风蚀区的土壤渗透性能显著大于水蚀区的土壤渗透性能。

(3) 两个研究区不同土地利用类型下土壤入渗模型拟合的优度存在显著差异。其拟合效果依次为 Philip 模型 > G-P 综合模型 > Kostiakov 模型，这表明 Philip 模型更接近这两个研究区土壤入渗的实际情况，可作为该区土壤入渗能力预测模型。

(4) 容重和总孔隙度是影响这两个研究区土壤入渗性能的主要因素。容重与初始入

渗透率和稳定入渗速率呈极显著负相关, 总孔隙度与初始入渗速率和稳定入渗速率呈极显著正相关, 土壤孔隙度和0.1~2.0 mm的砂粒含量对入渗性能具有显著影响。

参考文献(References):

- [1] ILSTEDT U, MALMER A, VERBEETEN E, et al. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: Systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1): 45-51.
- [2] ZHAO Y G, WU P T, ZHAO S W, et al. Variation of soil infiltrability across a 79-year chronosequence of naturally restored grassland on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 504(9): 94-103.
- [3] LEUNG A K, GARG A, COO J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity. *Science Letter*, 2015, 29(8): 5542-3354.
- [4] 刘芝芹, 黄新会, 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. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 57-62. [LIU Z Q, HUANG X H, WANG K Q. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of different forest soils in Jinshajiang dry-hot valley region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 57-62.]
- [5] 彭舜磊, 梁亚红, 陈昌东, 等. 伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 29-33. [PENG S L, LIANG Y H, CHEN C D, et al. Prediction of soil infiltration capacity and runoff under different restored vegetation types on the eastern side of Funiu Mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 29-33.]
- [6] 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. 北京: 中国林业出版社, 1997: 34-36. [ZHANG H J, WANG L X. The Property of Soil Loss on the Granite Slopes of Three-Gorge Region of Yangtze River and Its Imitation of System Dynamics. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997: 34-36.]
- [7] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响. *太原理工大学学报*, 2004, 35(5): 537-540. [XIE W Y, FAN G S. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(5): 537-540.]
- [8] 张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 123-126. [ZHANG Y T, YANG J H, XIA J B, et al. Study on soil promotion character under different condition stone hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4): 123-126.]
- [9] TROMBLE J M, RENARD K G, THATCHER A P. Infiltration for three rangeland soil-vegetation complexes. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives Home*, 1974, 27(4): 318-321.
- [10] WOOD M K, BLACKBURN W H. Influence of grazing systems on infiltration rates in the rolling plains. *Range Management*, 1981, 34(26): 331-335.
- [11] JIMENEZ C C, TEJEDOR M, MORILLAS G, et al. Infiltration rate in andisols: Effect of changes in vegetation cover (Tenerife, Spain). *Soil Water Conservation*, 2006, 61(3): 153-158.
- [12] FISCHER C, ROSCHER C, JENSEN B, et al. How do earthworms, soil texture and plant composition affect infiltration along an experimental plant diversity gradient in grassland?. *Plos One*, 2014, 9(6): e98987, Doi: 10.1371/journal.pone.0098987.
- [13] 张彪, 徐洁, 王硕, 等. 首都生态圈土地覆被及其生态服务功能特征. *资源科学*, 2015, 37(8): 1513-1519. [ZHANG B, XU J, WANG S, et al. Regional differences in land cover and ecosystem services in the capital eco-sphere. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1513-1519.]
- [14] 孙丕苓, 许月卿, 刘庆果, 等. 张家口市土地利用多功能性动态变化及影响因素. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(8): 65-74. [SUN P L, XU Y Q, LIU Q G, et al. Study on dynamic change of multi-functionality of land use and its driving factors in Zhangjiakou city. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(8): 65-74.]
- [15] SUN P, XU Y, YU Z, et al. Scenario simulation and landscape pattern dynamic changes of land use in the Poverty Belt around Beijing and Tianjin: A case study of Zhangjiakou city, Hebei province. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(3): 272-296.
- [16] Roberto Aguiar Dos Santos, Edmundo Rogério Esquivel. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(5): 986-991.
- [17] WANG L H, WANG Y F, MA B, et al. Effect of soil management on soil erosion on sloping farmland during crop growth stages under a large-scale rainfall simulation experiment. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(6): 921-931.
- [18] 吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究. *水土保持通报*, 2003, 23(3): 39-41. [WU F Q, ZHAO X N, CUI W F. Comparative study on determining methods of soil infiltration of slope farmland. *Bulletin of Soil*

- and Water Conservation, 2003, 23(3): 39-41.]
- [19] REYNOLDS W D. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 478-484.
- [20] MESSING I, JARVIS N J. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *European Journal of Soil Science*, 2010, 44(1): 11-24.
- [21] MUÑOZCARPENA, RAFAEL, REGALADO, et al. Field evaluation of the new philip-dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, 2002, 167(1): 9-24.
- [22] VILLARREAL R, SORACCO C G, LOZANO L A, et al. Temporal variation of soil sorptivity under conventional and no-till systems determined by a simple laboratory method. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168: 92-98.
- [23] 翟子宁, 王克勤, 苏备. Guelph 入渗仪在松华坝水源区土壤入渗性能上的应用. *四川农业大学学报*, 2016, 34(2): 215-220. [ZHAI Z N, WANG K Q, SU B. Application of Guelph permeameter in determining the soil permeability of the Songhuaba Water Source Area in Kunming city. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2016, 34(2): 215-220.]
- [24] 陈娟, 陈林, 宋乃平, 等. 荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 18-23. [CHEN J, CHEN L, SONG N P, et al. Soil infiltration characteristics of different soils types in desert steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 18-23.]
- [25] 张霞, 杜昊辉, 王旭东, 等. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2223-2237. [ZHANG X, DU H H, WANG X D, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool management index and its composition in Weibei Highland. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2223-2237.]
- [26] 史行洋, 王社教, 田琼. 近 300 年来河北省张北县土地利用变化研究. *河北师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(5): 448-454. [SHI X Y, WANG S J, TIAN Q. Land use change research in Zhangbei county of Hebei province in recent 300 years. *Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition*, 2017, 41(5): 448-454.]
- [27] 朱凯, 刘文杰, 刘佳庆, 等. 西双版纳地区不同胶农复合林对土壤理化性质的影响. *亚热带植物科学*, 2016, 45(4): 337-342. [ZHU K, LIU W J, LIU J Q, et al. Effects of different types of rubber-based agroforestry ecosystems on soil physicochemical properties in Xishuangbanna. *Subtropical Plant Science*, 2016, 45(4): 337-342.]
- [28] 吕刚, 王韞策, 李叶鑫, 等. 辽西北风沙地不同林草措施土壤水文效应研究. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 342-348. [LYU G, WANG Y C, LI Y X, et al. Hydrological effects of different forest and grass measures on the soil in wind sandy land of northwestern Liaoning province. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 342-348.]
- [29] 张彪, 李庆旭, 王爽, 等. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1041-1053. [ZHANG B, LI Q X, WANG S, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1041-1053.]
- [30] 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. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 62-69. [CHEN W Y, ZHANG S N, HUA R, et al. Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 62-69.]
- [31] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 13-17. [MO B, CHEN X Y, YANG Y C, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 13-17.]
- [32] 李红, 范素芳, 张光灿, 等. 黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 27-30. [LI H, FAN S F, ZHANG G C, et al. Characteristics of soil water-holding and soil porosity of different tree species after conversion of cropland to forest in loss hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 27-30.]
- [33] 王蕙, 赵文智, 武利玉. 河西走廊荒漠区土壤物理性质沿降水梯度的变化. *水土保持通报*, 2010, 30(6): 46-51. [WANG H, ZHAO W Z, WU L Y. Change of soil physical properties with precipitation gradient in desert region of Hexi Corridor. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(6): 46-51.]
- [34] 张振华, 杨润亚, 蔡焕杰, 等. 土壤质地、密度及供水方式对点源入渗特性的影响. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 2(2): 81-84. [ZHANG Z H, YANG R Y, CAI H J, et al. The influence of soil texture bulk density and water applied methods on point source infiltration. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 2(2): 81-84.]
- [35] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究. *土壤学报*, 1986, 15(4): 299-305. [JIANG D S, HUANG G J. Study on the filtration rates of soils on the Loess Plateau of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 15(4): 299-305.]
- [36] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471-3481. [MA J Y, JIA N F, CHENG M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3471-3381.]

- [37] 李广文, 冯起, 张福平, 等. 祁连山八宝河流域典型草地土壤入渗特征. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 60-65, 99.
[LI G W, FENG Q, ZHANG F P, et al. The soil infiltration characteristics of typical grassland in Babao River Basin of Qilian Mountain. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 60-65, 99.]

Soil infiltration under different patterns of land use and its influencing factor in the Bashang and Baxia regions of Hebei province

WANG Xiao-yi^{1,2}, SU Zheng-an¹, MA Jing², YANG Hong-kun^{1,3}, HE Zhou-yao^{1,4}, ZHOU Tao^{1,5}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041 China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. Forestry College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To investigate the infiltration capacity under different land use types in typical Bashang region (wind erosion area) and Baxia region (water erosion area) in Zhangjiakou city, Hebei province of China, a Mini Disk Infiltrometer was used to measure soil infiltration capacity of different typical and representative land use types (i.e., cultivated land, forest land and grassland) in Yangyuan and Zhangbei counties. Meanwhile, the influencing factors of soil infiltration capacity were analyzed. Different soil infiltration capacities were found among different land use types. In Yangyuan county, the soil infiltration capacity of the high coverage grassland was the highest among different land use types, and the soil infiltration capacity of the low coverage grassland was higher than that of the cultivated land and forest land. Meanwhile, the soil infiltration capacity of forest land was the lowest among different land use types in Yangyuan county. In Zhangbei county, the soil infiltration capacity of the grassland was the highest among different land use types, and the soil infiltration capacity of the cultivated land was higher than that of the shrub land and shelterbelt land. Meanwhile, the soil infiltration capacity of shelterbelt land was the lowest among different land use types in Zhangbei county. A significant difference in fitting degree could be found among infiltration models. Philip model had the best fitting degree. This result indicated that Philip model should be applied to simulate soil infiltration process of Zhangjiakou city. A significantly negative correlation could be found between bulk density and soil initial infiltration rate, as well as stable infiltration rate and stable infiltration time, while a significantly positive correlation could be found between the total porosity and soil initial infiltration rate, as well as the stable infiltration rate and the stable infiltration time. The results indicated that the grassland had the highest soil infiltration capacity among different land use types and more attention should be paid to the role of grassland in the ecological engineering project so as to enhance the ability of soil water conservation in this region in the future.

Keywords: soil infiltration capacity; land use types; Mini Disk Infiltrometer; infiltration model; influencing factor