

风火山流域土壤入渗特征与环境因子的关系分析

李春杰¹, 王根绪^{1,2}, 任东兴¹, 胡宏昌¹, 刘光生¹, 范晓梅¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 通过对青藏高原风火山流域 2005—2007 连续 3 a 的土壤水分入渗试验, 运用回归分析方法和旋转主成分分析法, 对影响土壤入渗过程的地温、土壤深度、土壤理化性质、植被盖度、土壤初始含水率等环境因子进行了分析。结果表明, 随着植被盖度的增加, 土壤入渗能力随之增强。土壤饱和导水率与土壤有机质、全氮、粒度正相关, 与之均呈幂函数关系; 饱和导水率与土壤初始含水率之间具有负幂函数关系。随着土壤温度从 0℃ 的逐渐升高, 土壤饱和入渗率先有微弱下降, 然后呈现急剧上升趋势, 两者呈二次函数关系。影响高寒草甸土壤水分入渗的环境因子可以归类为土壤质地及其理化属性、土壤疏松程度和亲水有机胶体团粒 3 个主成分。

关键词: 青藏高原; 土壤入渗; Guelph 入渗仪; 环境因子; 饱和导水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0016-04

中图分类号: S157.2, P332.1

Infiltration Characteristics and Its Environmental Factors in the Fenghuoshan Basin

LI Chun-jie¹, WANG Gen-xu^{1,2}, REN Dong-xing¹, HU Hong-chang¹, LIU Guang-sheng¹, FAN Xiao-mei¹
(1. School of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu

730000, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Infiltration of soil is an important process in hydrologic recycle and plateau ecology on the Qinghai-Tibet Plateau. By the experiment from 2005—2007, some factors like saturated hydraulic conductivity, ground temperature, and vegetation coverage are analyzed. Results show that the values of saturated hydraulic conductivity in high vegetation coverage are higher than in low vegetation coverage. Relation of saturated hydraulic conductivity with soil organic matter, total nitrogen, and particle size can be described by power function. With increased soil temperature, saturation infiltration decreases firstly and then increases sharply, which can be well described by a quadratic function. The environmental factors affecting infiltration into the alpine meadow soil can be grouped into the three principal components of soil texture and its physical and chemical properties, the loose degree of soil, and hydrophilic organic colloid.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; infiltration; Guelph permeameter; environmental factors; saturated hydraulic conductivity

青藏高原是中、低纬度地带多年冻土分布最广的区域, 多年冻土面积约为 $1.50 \times 10^6 \text{ km}^2$, 同时也是地球上对全球气候变化响应最为敏感的区域之一^[1-3]。气候等相关因子的变化不仅改变了青藏高原陆面过程的状况, 同时也深刻地改变着区域水循环过程^[4]。土壤入渗是水分通过大气—土壤交界面进入土壤形成土壤水的过程, 它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节, 是模拟流域水文过程的重要参数^[5], 土壤入渗性能状况直接关系到植被

水土保持和涵养水源的功能。研究这一问题对于减少地表径流、增加土壤入渗、土壤侵蚀的预测与防治, 以及各种水土保持措施的最优化配置和效益评价等方面具有重要的理论意义和现实意义^[6]。目前, 国内外对多年冻土区土壤水分入渗过程的研究还比较薄弱, 土壤水分入渗过程对水循环过程的影响机制尚不甚清晰。因此, 对青藏高原多年冻土区土壤水分入渗特征及其影响因子的研究, 对于充分认识青藏高原水循环过程和水量平衡, 以及青藏高原的生态恢复和生

收稿日期: 2009-01-06

修回日期: 2009-05-14

资助项目: 国家自然科学基金(40730634; 90511003); 国家重点基础研究发展计划(2007CB411504)

作者简介: 李春杰(1986—), 男(汉族), 河南省巩义人, 硕士研究生, 主要从事寒区水土保持及生态水文过程研究。E-mail: lichjie08@lzu.cn。

通信作者: 王根绪(1965—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 研究员, 主要从事水资源与环境、生态水文与景观生态学研究。E-mail: wanggx@imde.ac.cn。

态保护,具有重要的理论和现实意义。本研究通过分析青藏高原风火山流域 2005—2007 土壤水分入渗试验数据,探讨了各种环境因子对土壤水分入渗的影响,旨在为高寒地区流域水文过程的预测和评价提供科学依据。

1 研究区概况

土壤入渗试验场位于北麓河一级支流左冒西孔曲风火山小流域内,地理坐标为 $34^{\circ}43.792'N$, $92^{\circ}53.498'E$,海拔 4 772 m。处于高寒半湿润与半干旱

的过渡地带,区内多年冻土和地下冰比较发育,多年冻土层平均厚度为 70~120 m,活动层平均厚度为 1.2~2.5 m。年平均气温为 $-5.1^{\circ}C$,极端最高气温为 $24.7^{\circ}C$,极端最低气温为 $-38.5^{\circ}C$ 。年均降水量为 269.7 mm,年均水面蒸发量为 1 477.9 mm,相对湿度为 57%,主导风向为西风,最大风速 31 m/s。观测场土壤类型以高寒草甸土为主,植被群落以矮蒿草(*K. humilis*)、高山蒿草(*Kobresia pygmaea*)和线叶蒿草(*K. capillifolia*)等寒生植物为主。试验区土壤处于原始的粗骨土状态,发育缓慢,属于高山草甸土类型(表 1)。

表 1 试验区不同植被盖度下的高寒草甸土壤剖面理化特征

植被覆盖度/ %	土壤深度/ cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	全 N/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 P/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 K/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	< 0.1 mm 粒度 含量/ %	> 0.5 mm 粒度 含量/ %
40	0—10	1.10	0.25	0.06	1.76	1.32	93.10	4.95
	10—20	1.50	0.17	0.06	1.83	0.66	85.40	11.30
	20—40	1.40	0.04	0.06	1.85	1.43	61.20	17.95
70	0—10	0.90	0.34	0.05	1.75	1.91	93.20	1.45
	10—20	1.10	0.20	0.06	1.77	1.04	92.90	2.85
	20—40	1.20	0.19	0.06	1.80	1.10	72.40	7.20
90	0—10	0.80	0.26	0.07	1.74	1.10	93.30	1.15
	10—20	1.30	0.25	0.05	1.74	1.63	93.60	1.60
	20—40	1.30	0.17	0.06	1.71	1.38	61.80	11.65

2 试验材料与方法

2.1 饱和导水率的测定

土壤水分入渗采用 2800K1 型 Guelph 入渗仪, Guelph 入渗仪是由加拿大 Elrick 教授及其合作者共同研制的一种用于测量田间土壤入渗率的仪器,由支架、入渗部分和供水测量系统组成^[8]。在试验区高寒草甸植被上选取 10%、40%、70%、90% 共 4 种盖度,每种盖度下取 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 共 4 个土层,进行土壤水分饱和入渗试验,以 2 min 为时间间隔读取并记录各个数据,每种盖度重复 4 次,求出饱和导水率的平均值。土壤入渗过程观测采用双环入渗仪。

2.2 环境因子的测定

环境因子的测定包括土壤容重、土壤粒度、土壤含水量、地温和植被盖度等。土壤容重采用环刀法测定;土壤粒度采用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪测定;有机物质含量用重铬酸钾容量法测定^[9]。土壤水分的测定采用荷兰 Eijkelamp 公司生产的 FDR 水分观测仪,其观测精度为 $\pm 2\%$ 。利用精度为 $0.2^{\circ}C$ 水银地温计对活动层 5、15、25 和 35 cm 土壤温度进行观测。植被盖度利用数码照相解析方法进行测量^[10]。

3 结果分析与讨论

3.1 土壤入渗过程分析

从图 1 中可以发现,高寒草甸土壤入渗大致可以划分为 3 个阶段。初渗阶段(0~5 min)、过渡阶段(5~30 min)和稳渗阶段(30~60 min)。对于不同植被盖度的高寒草甸土壤入渗总体趋势基本一致,在入渗初始时刻土壤入渗速率最大。土壤入渗速率随着入渗时间的增大呈现减小的趋势,当入渗经历一定时间后,土壤达到饱和状态,此时入渗速率趋于稳定。植被盖度较大的土壤入渗速率较大,这是由于植被盖度较大的区域,土壤中根系较为密布,孔隙率较大含蓄水分能力较强,有利于土壤水分入渗。90% 盖度的高寒草甸土壤达到稳定入渗的时间为 30 min,70% 盖度达到稳定入渗的时间为 20 min,而 40% 盖度为 15 min。植被盖度较大土壤,水分的入渗速率较大,达到饱和入渗状态时间较长。

3.2 影响土壤入渗能力的因子分析

3.2.1 不同下垫面下的土壤剖面入渗特性 从图 2 可以看出,在土壤垂直剖面上,随着土壤深度的增加,土壤饱和导水率均有下降的趋势,原因是土壤孔隙度随着土壤深度的增加逐渐下降,但在 30 cm 左右,变

化趋势中出现了一个拐点,这与高寒草甸植被根系对土壤饱和和导水率的影响有关,土壤须根主要集中在 30 cm 左右土壤中^[11-12],易于形成优先流,固饱和和导水率较大。在土壤深度一致的情况下,随着植被盖度的增大,土壤饱和和导水率具有明显增大的趋势(图 3)。这是因为覆盖度不同,单位面积上枯落物凋落量、分解速度和养分归还量不同,其改造土壤的能力也不同,从而引起土壤的容重、水稳定性团粒、有机质等差异,最终导致土壤入渗速率和入渗量不同^[13]。

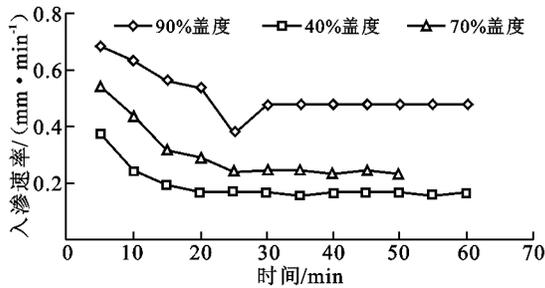


图 1 不同植被盖度下的土壤入渗速率与时间的关系

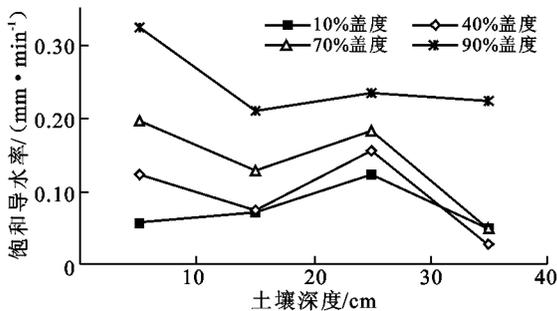


图 2 不同土壤深度的土壤饱和和导水率变化

3.2.2 土壤理化属性对入渗的影响 土壤容重是土壤性能的重要指标,对土壤的通透性、入渗性能、溶质迁移特征、土壤持水能力以及抗侵蚀能力都有非常大的影响^[14]。从表 1 可以看出,在同一深度土壤容重随植被盖度的增加而减小,在 0—20 cm 的深度尤为明显,吴发启等^[15]认为,土壤容重越小,土壤的入渗速率越大。青藏高原的研究也得出了相似结论,随着土壤容重的下降饱和和导水率随之增大,对二者关系对数函数进行拟合,其原因在于在诸如高寒草甸粉砂和黏质土壤中通常存在着大孔隙流^[12],土壤容重较小时,孔隙率较大连通性较好,对流体运动的阻力较小,土壤饱和和导水率较大。

土壤颗粒越细微,黏粒质量百分比越高^[16],相比之下土壤的比表面积较大,表面能和吸附水分的能力都较高,吸水 and 保水能力相对较强,反之入渗能力较弱。 $< 0.1 \text{ mm}$ 粒度含量的百分比,显著影响着土壤入渗,其与饱和和导水率呈幂函数相关关系^[17]。随着

全氮含量增加,饱和和导水率随之增加,二者呈幂函数相关关系。有机质是土壤固相的重要组成部分,草甸植被枯落叶层分解形成的有机质,可以改变土壤结构,促进根系发育,增加土壤孔隙,从而促进土壤入渗。高寒草甸土壤有机质含量与饱和和导水率之间呈幂函数相关关系。以上表明,在青藏高原地区发育较为成熟的土壤入渗能力较强。

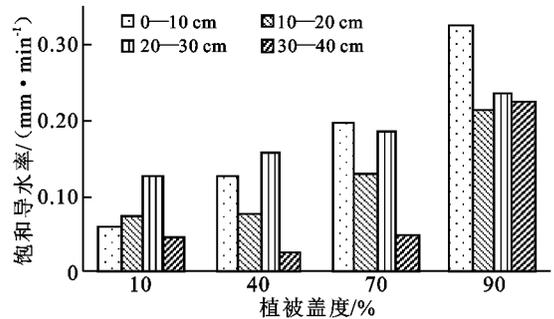


图 3 不同植被盖度的土壤饱和和导水率变化

3.2.3 土壤温度对入渗的影响 温度的变化引起土壤中国、液相水分比例的变化,进而引起土壤空隙的改变,从而对土壤入渗产生影响。地温升高时,土壤水发生相变,固相比例减小,水分入渗的过水断面增大,土壤的水力传导度随之增大,同时水在同样的土壤深度和植被盖度下随着地温的升高,水的黏滞性下降,土壤的饱和和导水率也相应增大。对试验区土壤自然增温过程中土壤入渗的研究表明,土壤入渗能力对地温变化十分敏感,在地温在 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,饱和和导水率与地温呈负相关关系,饱和和导水率随地温呈缓慢下降趋势,当温度达到 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后饱和和导水率随地温呈快速增加趋势,两者呈显著正相关关系。

3.2.4 土壤初始含水率对入渗的影响 土壤水分是土壤的重要组成部分,土壤含水率主要从入渗水分润湿区的平均水势梯度方面影响土壤入渗。饱和和导水率随土壤初始含水率的增加而减小,二者呈负幂函数相关关系,表明随着土壤初始含水率的增大,土壤入渗能力呈降低趋势。席海洋等^[16]在额济纳绿洲的研究,也得出了相似的结论。国内其他一些研究结果也表明,土壤平均入渗速率与土壤含水率呈线性相关关系,随着土壤初始含水率的增加,同一时间内非稳渗阶段的入渗速率迅速降低,到达稳定入渗速率的时间缩短。Bodman 和 Colman^[18]认为在入渗初期,随着含水率的增加,土壤入渗速率减小;随着时间的延续,含水率对入渗的影响变小,最终可以忽略。

3.3 土壤入渗与其环境因子的关系

国内外的研究表明,土壤入渗性能受土壤孔隙状况、容重、机械组成、有机质等的影响,为了全面分析

青藏高原风火山小流域高寒草甸不同深度土壤入渗与环境因子的关系, 选取植被盖度、土壤深度、土壤温度、初始含水率、土壤容重、 $< 0.1 \text{ mm}$ 粒度%、有机质和全氮等因子, 运用统计分析软件 SPSS 13.0, 进行主成分分析。分析结果表明, 以上 8 个因子的 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 值为 0.576, 基本适于进行主成分分析。旋转主成分分析结果表明(表 2):

(1) 影响土壤水分入渗的因子被归为 3 个主成分: 第 1 主成分为土壤质地及其理化属性因子, 主要由土壤粒度、土壤温度、土壤深度和全 N 组成, 其中土壤入渗与 $< 0.1 \text{ mm}$ 粒度含量、土壤温度正相关, 与土壤深度、全 N 表现出一定的负相关; 第 2 主成分为土壤疏松程度因子, 由植被盖度、土壤容重组成, 其中土壤入渗与植被盖度正相关, 与土壤容重则表现出负相关; 第 3 主成分为亲水有机胶体团粒因子, 由初始含水率和有机质组成, 与土壤入渗正相关。(2) 从主成分累计贡献率可以看出(表 3), 第 1 主成分土壤质地及其理化属性因子的特征根为 2.92, 贡献率为 36%, 数值最大, 表明其对土壤入渗的影响程度最大; 第 2 主成分土壤疏松程度因子和第 3 主成分亲水有机胶体团粒因子, 特征根和贡献率则相对较小。这 3 个主成分的累计贡献率为 74%, 说明以上 3 个因子基本可以代表整体的变化情况。选取相关系数大于 0.6 的因子作为土壤入渗的主要影响因子, 从表 2 中可以发现, 植被盖度、粒度、容重对土壤入渗影响最大, 土壤温度影响最小。

表 2 主成分负荷矩阵

因子	第一主成分	第二主成分	第三主成分
植被盖度	-0.013	0.948	-0.024
土壤深度	-0.919	-0.019	0.188
土壤温度	0.571	-0.012	-0.046
初始含水率	-0.300	-0.332	0.628
土壤容重	-0.370	-0.820	-0.131
$< 0.1 \text{ mm}$ 粒度%	0.901	0.050	-0.058
有机质	0.063	0.282	0.795
全 N	0.843	0.254	0.318

表 3 主成分贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.923	36.543	36.543
2	1.829	22.859	60.402
3	1.186	14.827	74.229

4 结论

(1) 随着植被盖度的增加, 土壤的理化性状得以

改善, 土壤容重明显降低, 黏粒含量、全 N、有机质含量呈增加趋势, 土壤入渗速率和饱和导水率也明显增大。植被盖度较大、根系发达、结构疏松的土壤更容易形成优先流, 其饱和导水率较大。

(2) 随着地温的增加, 饱和导水率从 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始有缓慢下降的趋势, 当地温大于 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 土壤饱和导水率与地温正相关。初始含水率高的土壤, 饱和导水率相对较小, 反之较大。

(3) 旋转主成分分析结果表明, 影响土壤入渗的因子可以被归类为土壤质地及其理化属性因子、土壤疏松程度因子和亲水有机胶体团粒因子 3 个主成分, 其中植被盖度、粒度、容重对土壤入渗影响最大, 土壤温度影响最小。

[参 考 文 献]

- [1] KANG Shichang, ZHANG Yongjun, QIN Dahe, et al. Recent temperature increase recorded in an ice core in the source region of Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 457-462.
- [2] CAO Jianting, QIN Dahe, KANG Ersi, et al. River discharge changes in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(5): 594-600.
- [3] XU Weixin, LIU Xiaodong. Response of vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau to global warming [J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(2): 151-159.
- [4] 姚德良, 范平, 沈振西, 等. 高寒草甸地区陆面过程耦合模式与辐射研究 [J]. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2005, 14(2): 101-107.
- [5] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190.
- [6] 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.
- [7] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 等. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究 [J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-13.
- [8] 于东升, 史学正. 用 Guelph 法研究南方低丘缓坡地不同坡位土壤渗透性 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 6-9.
- [9] 季天委. 重铬酸钾容量法中不同加热方式测定土壤有机质的比较研究 [J]. 浙江农业学报, 2005, 17(5): 311-313.
- [10] White M A, Asner G P, Nemani R R, et al. Measuring fractional cover and leaf area index in arid ecosystem: Digital camera, radiation transmittance, and laser altimetry methods [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74: 45-57.

(下转第 33 页)

(2) 垂直剖面上, 随土层深度的增加, 土壤孔隙度和有机质的变化较为稳定, 均表现为逐渐减少的趋势。土壤容重则逐渐增加, 与孔隙度的变化呈负相关。土壤含水量在垂直剖面上的变化较复杂, 这与降雨入渗和土壤水分向上蒸发作用有关。退耕后土地利用方式的改变, 引起土壤容重和机械组成的变化, 而且土壤水分的垂直变异结构及其分布格局也发生变化。这在一定程度上增加了土壤储水量, 土壤总体上朝着有利于水分保蓄和植被恢复的方向转变。

(3) 宁陕县实施退耕后, 寨沟流域的土壤容重、孔隙度、含水量、有机质均得到了较为明显的改善。且随着退耕时间的延长, 土壤孔隙状况、水分状况改善的幅度越来越大, 这说明了南水北调水源区退耕还林对土壤理化性质有明显改善作用。退耕后, 随着时间的延续, 植被迅速恢复, 养分不断积累, 逐渐向天然林草地演替, 因此, 建议适当加大该区对坡耕地的退耕力度。同时, 相应的生态补偿措施要进一步加强, 保持所取得的退耕还林效果。退耕 2a 自然演替形成的荒坡, 土壤理化性质变化不明显, 含水保水效果改善不大, 因此, 山区坡地土壤理化性质改良, 不但要退耕, 还必须要有较长的退耕恢复时间, 才可能有明显变化。

[参 考 文 献]

- [1] 赵小社, 毕玉芬, 孙涛, 等. 金沙江流域退耕还草对土壤物理性质的影响[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(5): 726-730.
- [2] 韩永伟, 韩建国, 张蕴薇, 等. 利用年限对农牧交错带退耕还草地土壤物理性质的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 626-629.
- [3] 王继夏, 孙虎, 李俊霖, 等. 秦岭中山区山地景观格局变化及驱动力分析[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 546-552.
- [4] 宁陕县地方志编纂委员会. 宁陕县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1992: 57-61.
- [5] 霍亚贞, 李天杰. 土壤地理试验实习[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 5-33.
- [6] 吴钦孝. 森林保持水土机理及功能调控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 132-157.
- [7] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 典型草原区退耕及封育草地土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 41-44.
- [8] 韩永伟, 韩建国, 张蕴薇. 农牧交错带退耕还草对土壤物理性状的影响[J]. 草地学报, 2002, 10(2): 100-105.
- [9] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 533-539.
- [10] 高国雄, 周心澄, 史常青, 等. 北川河流域低位脑山区退耕还林的土壤效应[J]. 干旱区农业研究, 2008, 26(5): 205-211.
- [11] 周永娟, 侯彦林, 李红英, 等. 吉林省玉米主产区土壤有机质和速效养分分布特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1038-1041.
- [12] 高超. 东祁连山不同退化程度高寒草甸草原土壤有机质特性及其对草地生产力的影响[D]. 甘肃: 甘肃农业大学草业学院, 2007.
- [13] 刘娜娜, 赵世伟, 王恒俊. 黄土丘陵沟壑区人工柠条林土壤水分物理性质变化研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 15-17.
- [11] 柴雯, 王根绪, 李元寿, 等. 长江源区不同植被覆盖下土壤水分对降水的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 329-337.
- [12] 牛健植, 余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 110-116.
- [13] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115-117.
- [14] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [15] 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.
- [16] 席海洋, 冯起, 程玉菲, 等. 额济纳绿洲土壤入渗特征与土壤状况的关系研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 976-982.
- [17] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(05): 537-540.
- [18] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil[J]. Soil Sci. Soc. AM. J., 1944, 8(2): 166-182.

(上接第19页)