

黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化

郁耀闯^{1,2}, 张光辉^{2,3}

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室,

陕西 宝鸡 721013; 2. 中国科学院 水土保持与生态环境研究中心 黄土高原土壤侵蚀与

旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: [目的] 揭示黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化及其影响因素, 为黄土高原地区农耕地土壤侵蚀控制、水土保持和有限水资源的有效利用提供理论依据和数据支撑。[方法] 运用双环法, 以黄土丘陵区典型农作物种植地为研究对象, 通过入渗试验对不同作物地土壤稳定入渗率季节变化进行研究。[结果] 典型农耕地种植地土壤稳定入渗率具有明显季节变化($p < 0.05$)。不同作物地土壤稳定入渗率的季节变化趋势存在差异。种植 3 种作物地与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异($p < 0.05$)。种植马铃薯地平均土壤稳定入渗率最大, 其次是大豆地和谷子地。农事活动、容重、孔隙度和作物根系生长是影响农耕地土壤稳定入渗率季节变化的主要因素。[结论] 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率具有明显的季节变化, 该变化主要是由农事活动、容重、土壤孔隙度和作物根系生长等因素所导致。

关键词: 土壤稳定入渗率; 季节变化; 典型农耕地; 根系; 黄土丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0008-04

中图分类号: S152.7

文献参数: 郁耀闯, 张光辉. 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 8-11. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.002

Temporal Variation of Soil Steady-state Infiltration Rate Under Typical Cultivated Land in Hilly Region of Loess Plateau

YU Yaochuang^{1,2}, ZHANG Guanghui^{2,3}

(1. Key Lab of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province,

College of Geography and Environment, Baoji Arts&Sci University, Baoji, Shaanxi 721013,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The temporal variations of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated lands were studied and the potential factors causing those changes were explored in order to provide theoretical bases and data support for soil erosion control, soil and water conservation, and the utilization of limited water resource in the Loess Plateau. [Methods] Using two-ring infiltration experiments, the temporal variations of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated lands were studied. [Results] The temporal variations of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated lands fluctuated significantly over time and displayed different temporal patterns($p < 0.05$). Significant differences in soil steady-state infiltration rate were found between croplands and a bare land($p < 0.05$). Among the croplands, the maximum mean soil steady-state infiltration rate occurred at area planted with potato, and followed by a soybean land, and a millet land. The temporal variations in soil steady-state infiltration rate were closely related to agriculture activities, dry bulk density, total porosity, and root growth. [Conclusion] The temporal variations of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated land displayed significantly different temporal patterns during

收稿日期: 2015-03-19

修回日期: 2015-04-16

资助项目: 中国科学院“百人计划”择优项目“土壤侵蚀水动力学机制研究”(k318001110); 国家自然科学基金项目(41171423); 陕西省教育厅重点实验室项目(09JS071; 10JS072); 宝鸡文理学院重点科研项目(ZK15052; ZK1054); 陕西省自然地理学重点学科支持项目

第一作者: 郁耀闯(1980—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应研究。E-mail: yuyaochuang@126.com。

通信作者: 张光辉(1969—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn。

one growing season ($p < 0.05$), which was mainly affected by agriculture activities, dry bulk density, total porosity, and root growth.

Keywords: soil steady-state infiltration rate; temporal variation; typical cultivated land; root system; the hilly region of the Loess Plateau

黄土丘陵区地形破碎,土质疏松,降雨集中,植被覆盖率较低,是中国水土流失最为严重的地区之一,也是国家退耕还林还草生态建设的重点区域。剧烈的土壤侵蚀已导致该区出现了大规模的土地退化和土地生产力下降^[1],并威胁着黄土高原的生态安全和人地系统的可持续发展^[2-3]。随着黄土高原地区人口压力的增大,该区农耕地水土保持和有限水资源的有效利用问题引起了学术界的广泛关注。土壤入渗是降水通过地表进入土壤体的过程,它控制着地表径流的多少及其空间分布^[4],进而影响着土壤侵蚀过程。因此,研究黄土高原地区农耕地土壤入渗问题,对于该区的水土保持和有限水资源的有效利用具有重要意义。

入渗过程是土壤水文循环过程的一个重要组成部分^[5-6],土壤稳定入渗率是表征土壤入渗的重要参数之一,它的精确测量对坡面土壤物理、水文循环、土壤侵蚀等领域研究具有重要意义。它通常受到表层土壤属性的影响。土壤类型、结构、孔隙度^[7-9]、容重^[7,10]、初始含水量以及土壤饱和导水率^[11]、植被类型^[12-13]、植被根系^[14-18]和土壤结皮^[19-20]等都是影响土壤稳定入渗率变化的主要因素。受气候、农事活动、作物生长等因素的影响,农耕地土壤属性具有明显的季节波动,可能导致土壤稳定入渗率的季节变化。然而,目前对于土壤稳定入渗率季节变化及其影响因素的研究还少见报道。因此,本研究以黄土丘陵区种植不同作物(谷子、大豆和马铃薯)典型农耕地为研究对象,以裸地作为对照,利用双环法,系统测定黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率的季节变化,同时测定土壤总孔隙度和土壤容重等物理指标和作物根系等指标,分析这些因素对土壤稳定入渗率季节变化的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院水土保持与生态环境研究中心安塞水土保持综合试验站(109°19'23"E, 36°51'30"N),该区属于典型的半干旱温带大陆性气候,多年平均温度为 8.8 °C,多年平均降雨量 505.3 mm,降雨量年际变化大且年内分配不均匀,70%以上的降雨集中在 6—9 月,多为短历时暴雨,常导致严重的土壤侵蚀。该区以峁状、梁状丘陵为主,沟壑纵

横,地形破碎,15°以上的土地面积占 50%~70%,沟壑密度高达 2.0~7.6 km/km²,土壤侵蚀主要以沟蚀和面蚀为主^[21]。土壤类型为黄绵土,抗侵蚀能力较差,水土流失严重。土壤质地为粉砂壤土,粉粒含量为 54.13%。耕作层土壤容重为 0.99~1.26 g/cm³,pH 值 8.4~8.6,有机质含量为 0.73%~1.04%。

1.2 样地选择

选取该区典型农耕地(谷子、大豆和马铃薯)作为试验样地,试验前一年的作物前茬均为谷子地。2012 年 4 月上旬,用大板犁耕作,耕作深度为 15~20 cm,耕作后将样地分成 4 个规格相同的小区(20 m×14 m)。5 月初,分别在 3 个小区内种植谷子、大豆和马铃薯,行距大约为 50 cm,株距分别为 8,12 和 30 cm。对照小区为裸地,在 6 月上旬喷洒异丙草胺锄草剂,除此之外无任何田间管理。6 月上旬和 7 月上旬,谷子和大豆地分别锄草 1 次,锄草深度大约为 5 cm,谷子、大豆和马铃薯均在 9 月底收获。在试验期内,研究区的累积降水量为 472.5 mm,主要集中在 7—9 月,这 3 个月的降水量占到试验期降水量的 69.3%,与多年平均状况相比,相对偏少。4 月中旬后,研究区的日平均气温稳定在 10 °C 以上,与多年平均状况相比,相对偏低。

1.3 分析方法与数据处理

入渗试验采用经典双环法^[22]。双环的内外直径分别为 20 和 35 cm,高度均为 18.5 cm。试验时,在每个样地选取长势大致相同的 3~4 个作物植株,剪去地上部分,尽量避免破坏土壤表面,然后以植株根部为圆心进行双环入渗试验。每次试验时,当土壤入渗速率基本达到稳定时停止试验,每次试验一般持续 100 min 左右,为了减小实验误差,每个样地每次重复测定 3~4 次。最后将达到稳定后的 3 组数据取平均值,作为本次试验的稳定入渗率,然后将各次重复试验的稳定入渗速率平均,获得该作物这个时期的稳定入渗速率,依次完成各个作物及对照小区的试验。试验开始于 2012 年 4 月上旬,试验周期大约为 28 d,在 3 种作物地和裸地共进行了 7 次试验。试验过程中测定水温,并按照公式(1)^[23]计算土壤入渗速率:

$$f_{10} = \frac{10v}{st(0.7+0.03T)} \quad (1)$$

式中: f_{10} ——10 °C 标准水温时所对应的土壤入渗速

率 (mm/min); v ——用量杯加入内环中的水量 (ml); s ——内环面积 (cm²); t ——定量水 v 入渗所需的时间 (min); T ——试验时的水温 (°C)。

每次入渗试验结束后,用取样器(半径 10 cm、高度 10 cm)将入渗试验内环中 0—10 cm 的土样取出,把土样中的根系在筛网上反复用清水冲洗,然后将土样中所有的根系全部洗出,并将根系烘干(70 °C, 24 h)称重,用烘干根重除以采样器体积得根重密度 (kg/m³)。土壤容重和土壤总孔隙度用环刀法测定,每次测定均有 3 个重复。

数据分析采用 SPSS 18.0 统计分析软件,差异显著性检验采用 LSD ($p < 0.05$, 双尾)。

2 结果与分析

2.1 农耕地土壤稳定入渗率季节变化

在黄土丘陵区作物生长季,典型农耕地的土壤稳定入渗率具有明显的季节变化(表 1) ($p < 0.05$),不同作物地土壤稳定入渗率的季节变化趋势存在差异。种植谷子、大豆和马铃薯的地块土壤稳定入渗率分别呈现出先增加再降低再增加、先增加再降低和一直增加的变化趋势。种植 3 种作物地块(以下分别简称为谷子地、大豆地和马铃薯地)与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。它们的土壤稳定入渗率最大值从 1.62 mm/min 变化到 2.83 mm/min,最小值均为 0.89 mm/min(耕作前为同一样地),平均值为 1.36 mm/min。其中,马铃薯地的平均土壤稳定入渗率最大,其次是大豆地和谷子地。另外,3 种作物地土壤稳定入渗率标准差和变异系数的大小与作物类型有关(表 2),马铃薯地土壤稳定入渗率的标准差和变异系数最大,其次是大豆地和谷子地。具体来讲:在 4 月中旬,谷子地的土壤稳定入渗率相对较小,种植使谷子地的土壤稳定入渗率从 0.89 mm/min 明显增加到 1.41 mm/min ($p < 0.05$)。此后,随着谷子根系的生长,谷子地的土壤稳定入渗率逐渐增加,在 8 月上旬达到最大值 1.63 mm/min,8 月下旬略有下降,9 月下旬又升高到 1.51 mm/min。在大豆地和马铃薯地,土壤稳定入渗率从 5 月上旬到 8 月上旬也呈增加趋势,大豆地土壤稳定入渗率在 8 月中下旬达到最大值(1.89 mm/min),而后略有下降。马铃薯地的土壤稳定入渗率在 9 月中下旬达到最大值(2.83 mm/min),马铃薯在生长后期,根系生长趋于稳定,土壤稳定入渗率之所以继续增大,可能与马铃薯块茎生长所导致的地表裂隙有关。在作物生长季,裸地的土壤稳定入渗率随土壤容重的增加和孔隙度的变小呈下降趋势。

表 1 2012 年土壤稳定入渗率时间变化的显著性检验

时间	作物地稳定入渗率			
	谷子	大豆	马铃薯	裸地
0410	0.89	0.89	0.89	0.89
0504	1.41	1.41	1.41	1.41
0608	1.32	1.31	1.27	1.25
0702	1.39	1.33	1.33	0.96
0801	1.63	1.60	1.59	1.17
0822	1.35	1.89	1.74	0.61
0918	1.51	1.58	2.83	0.71
显著性 sig.	0.001**	0.016*	0.011*	0.110 ^{ns}

注: * 表示在 $p < 0.05$ 差异显著, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平差异显著, ns 不显著(单变量方差分析)。

表 2 农耕地和裸地土壤稳定入渗率(mm/min)统计属性

样地类型	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
谷子地	1.63	0.89	1.36	0.23	0.17
大豆地	1.89	0.89	1.43	0.31	0.22
马铃薯地	2.83	0.89	1.58	0.61	0.39
裸地	1.24	0.89	1.00	0.29	0.29

2.2 农耕地土壤稳定入渗率季节变化影响因素

农事活动对黄土丘陵区农耕地的土壤稳定入渗率具有明显的影响。种植、除草等农事活动使土壤表层变得松散,容重变小,孔隙度变大,从而导致土壤稳定入渗率增大。具体来讲:种植使农耕地土壤容重减小 19.6%,孔隙度增大 5.7%,土壤稳定入渗率增大 160.0%,达到统计学显著性差异 ($p < 0.05$)。除草导致谷子地和大豆地土壤容重分别减小 11.2% 和 2.0%,孔隙度分别增加 2.0% 和 1.0%,土壤稳定入渗率均增加了 27.0% 左右。

土壤孔隙度是影响土壤稳定入渗率的一个重要因素,土壤孔隙度与土壤稳定入渗率间呈正相关^[7-8,13]。在黄土丘陵区作物生长季,谷子地、大豆地和马铃薯地的土壤孔隙度整体上呈增加趋势,3 种作物地土壤孔隙度的增幅分别为 2.2%~6.8%,1.0%~6.6% 和 1.0%~3.3%,平均增加了 4.2%,4.1% 和 2.2%,裸地的土壤孔隙度随容重的增大呈下降趋势,下降幅度为 1.4%~5.5%,平均下降 2.5%。拟合分析结果表明,3 种作物地和裸地的土壤孔隙度与土壤稳定入渗率呈正相关关系,这可能与作物根系生长增加了土壤中的生物性根孔数量有关,这些增加了的生物性大孔具有较好的连通性和较大孔隙直径,有些大孔中还会形成优势流,从而加快了水分在土壤中的运移速度。这一研究结果与王国梁^[7]、王鹏程^[8]、勃海峰^[13]等人的研究结果一致。

土壤容重的变化也是影响土壤稳定入渗率的一

个重要因素。一般情况下,土壤容重与土壤稳定入渗率呈负相关关系^[7,10,13]。在黄土丘陵区作物生长季,在4月初,由于种植活动的影响,3种作物地的土壤容重迅速下降,达到生长季的最小值。随后,受降雨和土体自身沉降等因素的影响,3种作物地的容重均呈增加趋势,谷子、大豆和马铃薯分别增加了14.2%、3.6%和1.8%。6月份以后,受除草农事活动的影响,3种作物地的土壤容重有所下降,此后,3种作物地的土壤容重再次呈增加趋势,增加的幅度也随作物类型的不同而不同。7月下旬以后,3种作物地的土壤容重的变化趋势较为混乱,但整体仍呈增加趋势,这可能与土壤的硬化过程和土壤结皮的发育有关。一般而言,土壤容重的增加,会导致土壤孔隙度变小,进而导致土壤稳渗率下降。总体而言,黄土丘陵区典型农耕地的土壤稳定入渗率与容重呈指数负相关关系,这一结果与王国梁^[7]、李卓^[10]和勃海峰^[13]等的研究结果一致。

作物根系生长对土壤稳定入渗率的季节变化具有重要影响。在作物生长季,谷子、大豆和马铃薯根系呈先增加后趋于稳定的生长趋势。从6月上旬到9月下旬,3种作物根系密度的增幅分别为45.1%~63.4%,8.7%~108.8%和4.0%~182.1%,平均增加52.2%,71.4%和98.5%。与之相应的3种作物地土壤稳定入渗率的增幅分别为3.0%~23.9%,1.5%~75.99%和4.8%~122.5%,平均增加12.1%,30.2%和47.3%。可以看出,3种作物地的土壤稳定入渗率随着作物根系密度的增加而增加,统计分析表明,3种作物地的土壤稳定入渗率与根系密度呈正相关关系,这可能是由于作物根系在生长过程中释放了大量的有机和无机分泌物,改变了土壤理化性质和形成了根孔通道,这些根孔通道具有较好的连通性和较大孔隙直径,有些大孔中还会形成优势流,从而加快了水分在土壤中的运移速度,进而改变了土壤入渗状况^[18],这一结果与周正朝等^[17]的研究结果相似。需要说明的是:在马铃薯地生长后期,马铃薯根系生长趋于稳定,该作物地的土壤稳定入渗率继续增大可能与马铃薯块茎生长所导致的地表裂隙有关。

以上分析表明,黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率的季节变化,主要受农事活动、土壤孔隙度、容重和作物根系生长的影响。

3 结论

(1) 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率具有明显的季节变化,不同作物地土壤稳定入渗率的季节变化趋势存在差异。谷子地、大豆地和马铃薯地的

土壤稳定入渗率分别呈现出:增加—降低—增加,增加—降低和持续增加的变化趋势。

(2) 3种作物地与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异。马铃薯地平均土壤稳定入渗率最大,其次是大豆地和谷子地,裸地最小。

(3) 农事活动、土壤孔隙度和作物根系生长等是影响黄土丘陵区农耕地土壤稳定入渗率的主要因素。在作物生长季,种植和除草活动分别导致土壤稳定入渗率增大160.0%和27%,3种作物根系密度分别平均增加了52.2%,71.4%和98.5%,与之相应的作物地土壤稳定入渗率的平均增幅分别为12.1%,30.2%和47.3%。

[参 考 文 献]

- [1] 鄂竟平. 中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J]. 中国水土保持, 2008(12): 3-6.
- [2] Fu Bojie. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China[J]. Soil Use and Management, 1989, 5(2): 76-82.
- [3] Kheir R B, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon[J]. Geomorphology, 2006, 82(3/4): 347-359.
- [4] Moore I D, Larson C L, Slack D C, et al. Modelling infiltration: A measurable parameter approach[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1981, 26(1): 21-32.
- [5] Lassabatere L, Angulo J R, Goutaland D, et al. Effect of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins[J]. Geoderma, 2010, 156(3/4): 316-325.
- [6] Parchami A F, Mirlatifi S M, Dashtaki S G, et al. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils[J]. Journal of Hydrology, 2013, 481(5): 35-47.
- [7] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 529-535.
- [8] 王鹏程, 肖文发, 张守攻, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 51-55.
- [9] 王梦军, 张光灿, 刘霞, 等. 沂蒙山林区不同森林群落土壤水分贮存与入渗特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 26-31.
- [10] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [11] Williams J R, Ouyang Y, Chen J S, et al. Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Application of Selected Mathematical Models[M]. US: United States Environmental Protection Agency, 1998.

- [4] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34(2):309-342.
- [5] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet the users need[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(2):107-111.
- [6] 张国平, 张增祥, 刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(2):146-158.
- [7] 梁海超, 师华定, 白中科. 中国北方典型农牧交错区的土壤风蚀危险度研究[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(4):510-516.
- [8] 郭索彦, 刘宝元, 李智广, 等. 土壤侵蚀调查与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:107-132.
- [9] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(3):640-646.
- [10] 侯秀瑞, 马为民. 河北省土壤侵蚀现状及防治对策[J]. *河北林业科技*, 2001, 5(2):47-49.
- [11] 陈莉, 李涛, 韩婷婷, 等. WEPS 模型下天津郊区风蚀尘对城区空气质量的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(8):1353-1360.
- [12] 张春来. 现代沙质荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究[D]. 甘肃 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002.
- [13] 高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京:科学出版社, 2008:33-42.
- [14] 邸兰杰, 王卫, 成贺玺, 等. 基于 ATI 和 TVDI 模型的河
- 北平原土壤湿度遥感反演[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(6):737-743.
- [15] 左玉珊, 王卫, 郝彦莉, 等. 基于 MODIS 影像的土地覆被分类研究:以京津冀地区为例[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(11):1556-1565.
- [16] 吴云, 曾源, 赵炎, 等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(7):1417-1424.
- [17] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 北京市农田风蚀的野外观测研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2):401-406.
- [18] 何文清, 高旺盛, 妥德宝, 等. 北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):1-4.
- [19] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Span W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 44(2):347-349.
- [20] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. *Progress on Physical Geography*, 1993, 17(3):50-68.
- [21] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞试验研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):32-33.
- [22] 胡孟春, 刘玉璋, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞试验研究[J]. *中国沙漠*, 1991, 11(1):22-29.
- [23] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞试验研究[J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4):41-49.
- [24] 董治宝, 董光荣, 陈广庭. 以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J]. *干旱区资源与环境*, 1996(2):31-37.

(上接第 11 页)

- [12] 张健, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区植被次生演替灌木初期土壤物理性质特征[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4):101-104.
- [13] 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.
- [14] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透能力的有效性[J]. *科学通报*, 1992, 37(4):366-369.
- [15] Wu Weidong, Zheng Shizhang, Lu Zhihong, et al. Effect of plant roots on penetrability and anti-scourability of red soil derived from granite[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(2):183-188.
- [16] Joseph L, Pikul J, Kristian J A. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3):859-866.
- [17] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2007, 70(3):350-355.
- [18] McCully M E, Boyer J S. The expansion of maize root-cap mucilage during hydration(3): Changes in water potential and water content [J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, 99(1):169-177.
- [19] 李莉, 孟杰, 杨建振, 等. 不同植被下生物结皮的水分入渗与水土保持效应[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5):105-109.
- [20] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(5):808-812.
- [21] 国家发展改革委, 水利部, 农业部, 国家林业局. 黄土高原地区综合治理规划大纲 [OL/S]. (20100910) [20110117]. <http://www.sdpc.gov.cn/>.
- [22] 任宗萍, 张光辉, 王兵, 等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):94-97.
- [23] 徐敬华, 王国梁, 陈云明, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2):19-25.