

黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化

王长燕^{1,2}, 郁耀闯^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013;

2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 运用双环法,探讨了黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季的变化。结果表明:(1) 赖草地土壤稳定入渗率在生长季内呈现出“W”型显著的季节变化趋势($P < 0.05$),紫花苜蓿地土壤稳定入渗率则无显著的生长季变化($P > 0.05$)。在草地生长季,赖草地土壤稳定入渗率值的变化范围为 $1.61 \sim 4.53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,平均值为 $2.89 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。赖草地土壤稳定入渗率最小值出现在抽穗期($1.61 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),最大值出现在种子成熟期($4.53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。紫花苜蓿地土壤稳定入渗率值的变化范围为 $2.12 \sim 2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,平均值为 $2.23 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。紫花苜蓿地土壤稳定入渗率最小值出现在种子成熟初期,在旁枝形成期、开花期和种子成熟末期出现最大值 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。(2) 赖草地与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异($P < 0.05$),紫花苜蓿地与裸地则无显著性差异($P > 0.05$),赖草地的平均土壤稳定入渗率最大($2.89 \pm 1.03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),其次是紫花苜蓿地($2.23 \pm 0.09 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$);(3) 土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度等土壤属性生长季的变化是影响黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化的主要因素;(4) 利用土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度等参数可以很好地模拟黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季的变化($R^2 > 0.86$, $NSE > 0.86$)。

关键词: 土壤稳定入渗率;退耕草地;生长季变化;土壤物理性质;黄土丘陵区

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Variation of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in loess hilly region

WANG Chang-yan^{1,2}, YU Yao-chuang^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Baoji Arts & Sciences University, Baoji, Shaanxi 721013, China;

2. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: Using two rings method, the seasonal variation of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in loess hilly region was discussed. The results were indicated that: (1) The soil stable infiltration rate of *Leymus secalinus* was presented the significant seasonal change trend as “W” type ($P < 0.05$) in the growing season, but the soil stable infiltration rate of alfalfa was presented no obvious seasonal variation ($P > 0.05$). During the grass growing season, the change range of soil stable infiltration rate of *Leymus secalinus* was from $1.61 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ to $4.53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the average value of was $2.89 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. The minimum value of soil stable infiltration rate of *Leymus secalinus* was appeared in earing stage, the maximum value of $4.53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ was appeared in seed maturing stage. The soil stable infiltration rate of alfalfa was from $2.12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ to $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the average value was $2.23 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. The minimum value of soil stable infiltration rate of alfalfa was appeared in early seeds maturing stage, the maximum value of $2.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ was appeared in side branch forming stage, flowering stage and seeds mature stage. (2) The soil stable infiltration rate of *Leymus secalinus* and bare land was possessed significant difference ($P < 0.05$), but for the alfalfa and bare land was no significant difference ($P > 0.05$). The average soil stable infiltration rate of *Leymus secalinus* was the maximum ($2.89 \pm 1.03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), the secondly was the alfalfa grassland ($2.23 \pm 0.09 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). (3) The variation of soil attributes as soil bulk density, total porosity and capillary porosity etc. were the main factors to influence the change of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in losses hilly

收稿日期:2016-06-17

修回日期:2017-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41371497, 41171423);陕西省重点实验室项目(2009JS071);陕西省教育厅项目(14JZ013);宝鸡文理学院重点科研项目(ZK2017039, ZK2017040)

作者简介:王长燕(1979—),女,山东烟台人,副教授,博士,主要研究方向为气候变化与土壤水理性质。E-mail: wcyxa_1979@163.com。

seasonal region. (4) Using the parameters of bulk density, total porosity and capillary porosity etc. could be well simulated the change of soil stable infiltration rate in the growing season for rehabilitated grassland in losses hilly region ($R^2 > 0.86$, $NSE > 0.86$).

Keywords: soil stable infiltration rate; rehabilitated grassland; seasonal variation; soil properties; loess hilly region

黄土丘陵区土壤结构疏松,降水主要集中于6—9月,植被覆盖率较低,土壤侵蚀较为严重^[1-2],是国家退耕还林、还草生态工程建设的重点区域。剧烈的土壤侵蚀加速了河道泥沙的淤积,并潜在地威胁着黄河流域的生态安全和人地系统的可持续发展^[3-6]。近年来,随着黄土高原地区退耕还林、还草工作的开展,该区的水土保持效益和水资源的有效利用问题引起了学术界的广泛关注。在陆地生态系统中,降雨入渗是地表水文循环过程的一个重要环节,作为一个重要的水文参数,土壤入渗决定着近地表层土壤蓄水量的多少和地表径流量的大小及其空间分布^[7-8],进而影响着土壤侵蚀过程。因此,研究黄土丘陵区土壤入渗问题,对该区的水土资源配置和生态环境建设具有重要意义。

入渗过程是土壤水文循环过程的重要组成部分^[9-10],土壤稳定入渗率是表征土壤入渗性能的重要参数之一,它的准确测量对近地表层土壤水文循环和土壤侵蚀控制等具有重要意义,以往的研究表明,土壤稳定入渗率通常受到降雨强度和土壤属性(土壤类型结构、容重、初始含水量、孔隙度、饱和导水率等)的影响^[11-18]。

在黄土高原地区,以退耕还林还草为主要手段的自然和人工的植被恢复已经被广泛地应用于退化了的生态系统。人工植被的恢复加速了生态系统的正向演替,降低了土壤容重,增加了有机质的含量和土壤的稳定性^[19-21],并缩短了生态系统达到稳定阶段的时间^[22]。但是,人工植被的恢复也带来了一些负面效应。例如,植被生长受到限制(小老头树),土壤干层的形成^[23],土地质量的退化等。针对这些问题,在黄土高原自然植被恢复过程中,查明土壤入渗的动态变化机制是非常需要的,它可以为该区的生态环境建设提供更好的参考依据。目前,关于自然植被恢复过程中土壤入渗的动态变化机制研究还相对较少。以往有限的研究表明:土壤入渗受到土壤有机质、容重、团聚体和土壤结皮等的影响^[24-28],对动态变化机制的探讨还相对缺乏。在植被恢复过程中,由于受植被恢复的影响,土壤属性随时间发生了明显的动态变化^[21,29],这种变化如何影响土壤稳定入渗率生长季的变化目前还不清楚。

因此,在黄土高原退耕还林(草)条件下,开展土壤稳定入渗率生长季变化研究是非常需要的。

本文以黄土丘陵区自然植被恢复过程中退耕3a草地(赖草)和退耕17a草地(紫花苜蓿)为研究对象,以裸地为对照,采用双环法,系统测定了黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季的变化,同时测定土壤初始含水量、容重、总孔隙度和毛管孔隙度等土壤属性生长季的变化,分析土壤属性生长季内动态变化对土壤稳定入渗率生长季变化的影响。

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研究所安塞水土保持综合试验站(109°19'23"E,36°51'30"N),海拔1068~1309m,属暖温带半湿润向半干旱气候过渡区,年平均气温为8.8℃,年平均降雨量为505.3mm,降雨量年内分配不均匀,6—9月集中了全年70%以上的降雨,多为短历时暴雨,常导致严重的土壤侵蚀。该区地貌类型以崩状、梁状丘陵为主,沟壑纵横,地形破碎,沟壑密度高达2.0~7.6km·km⁻²,沟蚀和面蚀为该区的主要土壤侵蚀类型^[30]。土壤类型为黄绵土和沙黄土,结构较为松散,抗侵蚀能力较差,水土流失严重。

1.2 样地选择

选取该区典型退耕草地(赖草和紫花苜蓿)作为试验样地,赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)为退耕3a草地,紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为退耕17a草地,赖草和紫花苜蓿生长季基本特征见表1。赖草和紫花苜蓿地土壤质地均为粉砂壤土,黏粒、粉粒和砂砾的含量分别为9.75%、57.21%、33.04%和11.24%、60.76%、28%,土壤有机质含量分别为9.86g·kg⁻¹和11.66g·kg⁻¹。

1.3 实验方法

根据黄土高原降雨非常集中的特点,本研究入渗试验采用双环法^[31]。双环的内外环高度均为18.5cm,直径分别为20cm和35cm。当进行土壤入渗试验时,在赖草地和紫花苜蓿地,分别在地势较为平坦的地面选取长势大致相同的3~4颗植株,用剪刀剪掉地表的植被,尽量不造成对地表的破坏。

每次试验持续时间大约为 100 min,每次每个样地一般重复测定 3~4 次,在土壤入渗率基本达到稳定时停止试验,取达到稳定后的 3 组相近数据的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率平均,得到该退耕草地在这个生长阶段的稳定入渗率,每次试验时按照赖草地、紫花苜蓿地和裸地顺序依次完成入渗试验。入渗试验开始于 2012 年 4 月上旬,9 月底结束,分别选取各退耕草地 7 个关键生长阶段开展试验,单次试验累计 74 次。在实验过程中记录水温,土壤入渗速率计算公式

为^[32]:

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

式中, f_{10} 是 10℃ 标准水温所对应的土壤入渗速率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); v 为用量杯加入内环中的水量 (ml); s 为内环面积 (cm^2); t 为定量水 v 入渗所需的时间 (min); T 为实验时记录的水温 (℃)。

土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度均用环刀法测定,每次测定 3 个重复。土壤初始含水量用烘干法测定,每次测定 5 个重复。

表 1 退耕草地生长季基本特征

Table 1 The basic properties of the rehabilitated grasslands in growing period

草被类型 Grass type	生长季 Growing period(m-d)						
	04-18	05-24	06-18	07-18	08-15	09-10	09-30
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	返青 Regreening	抽穗 Earing	开花 Flowering	种子成熟 Seed maturing	种子散落初期 Early seeds scattering stage	种子散落高峰期 Peak of seeds scattering	种子散落末期 Late stage of seeds scattering
紫花苜蓿 Alfalfa	返青 Regreening	旁枝形成 Side branch forming	现蕾 Budding	开花 Flowering	结荚 Podding	种子成熟初期 Early seeds maturing stage	种子成熟末期 Late seeds maturing stage
生长阶段 Growth stage	I	II	III	IV	V	VI	VII

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计分析软件进行数据分析,土壤稳定入渗率和土壤属性生长季变化的显著性均采用 Kendall's W 检验 ($P < 0.05$),均值比较采用 LSD 法,相关分析采用 Pearson 法,作图采用 Excel 2003 软件。

2 结果分析

2.1 土壤初始含水量生长季变化特征

如图 1a 所示,赖草地的土壤初始含水量在整个生长季内呈现出先升高后降低、再升高又降低的变化趋势,其值在 7.25%~18.32% 之间波动变化,平均值为 11.3%,出现了 2 个高值和 2 个低值,最大值出现在种子散落高峰期(9 月上旬),最小值出现在种子散落末期(9 月下旬)。紫花苜蓿从返青期到种子成熟末期,土壤初始含水量值在 6.55%~17.82% 之间波动变化,平均值为 12.56%,出现了 2 个高值和 3 个低值(图 1a),最大值出现在现蕾期(6 月中旬),最小值出现在旁枝形成期(5 月下旬)。统计分析表明,两种草地土壤初始含水量生长季的变化具有统计学显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 土壤容重生季变化特征

由图 1b 可以看出,赖草地的土壤容重在生长季大致呈“M”型变化趋势,出现了 2 个高值和 1

个低值(图 2b),值在 0.94~1.06 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间波动变化,平均值为 1.01 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值出现在种子散落高峰期(9 月上旬),最小值出现在种子成熟期(7 月中旬)。紫花苜蓿从返青期到种子成熟末期(4 月中旬到 9 月底),土壤容重值在 1.10~1.22 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间波动变化,平均值为 1.15 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,出现了 2 个高值和 3 个低值(图 1b),最大值出现在种子成熟初期(9 月上旬),最小值出现在种子成熟末期(9 月下旬)。统计分析表明,赖草地土壤容重在生长季的变化无统计学显著性差异 ($P > 0.05$),紫花苜蓿地土壤容重在生长季的变化有统计学显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 土壤总孔隙度生长季变化特征

图 1c 为赖草地和紫花苜蓿地土壤总孔隙度的生长季变化形式。从中可以看出:两种草地土壤总孔隙度在整个生长季分别呈现出了“W”型和先下降后上升的变化趋势,两种退耕草地土壤总孔隙度的变化范围分别为 45.21%~48.85% 和 47.39%~50.19%,平均总孔隙度分别为 47.26% 和 49.16%。赖草地的土壤总孔隙度在抽穗期(5 月底)出现最小值,在种子成熟期(7 月中旬)出现最大值。紫花苜蓿地的土壤总孔隙度在种子成熟初期(9 月上旬)出现最小值,在种子成熟末期(9 月底)出现最大值。裸地的土壤总孔隙度在整个生长季随容重的增加呈

下降趋势(图 1c),变化范围为 46.65% ~ 52.67%,平均值为 49.65%。统计分析表明,赖草地土壤总孔隙度在生长季的变化无统计学显著性差异($P > 0.05$),紫花苜蓿地土壤总孔隙度在生长季的变化有统计学显著性差异($P < 0.05$)。

2.4 土壤毛细孔隙度生长季变化特征

如图 1d 所示,赖草地土壤毛细孔隙度在生长季表现出了先下降后升高、再下降又上升的显著的季

节变化趋势($P < 0.05$),变化范围分别为 45.0% ~ 48.6%,均值为 46.6%,最小值出现在抽穗期,最大值出现在种子散落初期。紫花苜蓿地土壤毛细孔隙度在生长季表现为先升高后下降、在种子成熟末期又上升的不显著的季节变化趋势($P > 0.05$),变化范围分别为 35.95% ~ 42.63%,均值为 39.3%,最小值出现在种子成熟初期,最大值出现在旁枝形成期。

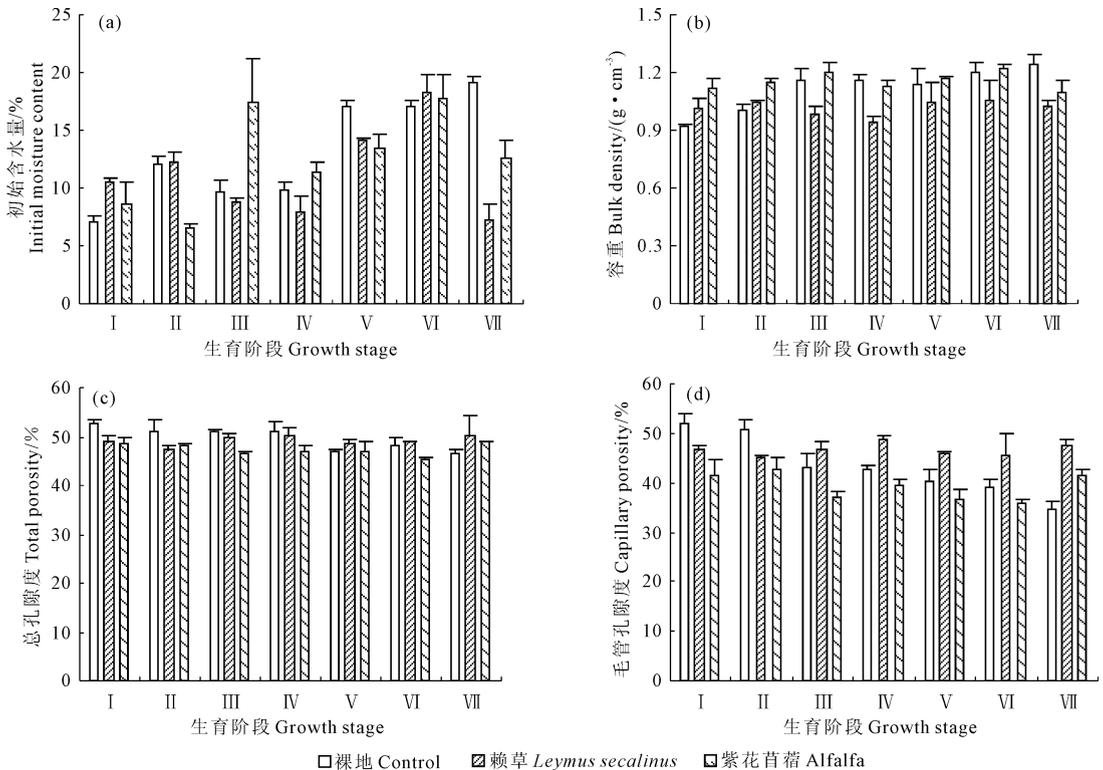


图 1 退耕草地土壤属性生长季变化

Fig. 1 The variation of soil properties for the rehabilitated grassland in growing season

2.5 土壤稳定入渗率生长季变化特征

在黄土丘陵区退耕草地生长季,赖草地的土壤稳定入渗率在不同的生长阶段具有显著的生长季变化($P < 0.05$),紫花苜蓿地的土壤稳定入渗率在整个生长阶段无显著生长季变化($P > 0.05$),两种退耕草地土壤稳定入渗率生长季的变化趋势存在差异(图 2)。在整个生长阶段,赖草地和紫花苜蓿地的土壤稳定入渗率分别呈现出“W”型变化和“W”型变化的趋势。赖草地与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异($P < 0.05$),紫花苜蓿地与裸地土壤稳定入渗率无显著性差异($P > 0.05$)。在退耕草地生长季,赖草地的土壤稳定入渗率变化范围为 1.61 ~ 4.53 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,此变化范围分别是对照样地土壤稳定入渗率变化范围的 1.72 ~ 2.35 倍,赖草地土壤稳定入渗率在整个生长季的均值为 2.89 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,

该值为对照样地均值的 1.96 倍。紫花苜蓿地的土壤稳定入渗率变化范围为 2.12 ~ 2.30 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,此变化范围分别是对照样地土壤稳定入渗率变化范围的 1.07 ~ 2.63 倍,紫花苜蓿地土壤稳定入渗率的均值为 2.23 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,是对照样地均值的 1.52 倍。赖草地的平均土壤稳定入渗率最大,其次是紫花苜蓿地。由此可以看出,退耕草地的土壤稳定入渗率要大于对照样地的土壤稳定入渗率,这说明在黄土高原地区退耕还草有利于增加该区的降雨入渗。具体来讲:在 4 月中旬,赖草和紫花苜蓿均处于返青阶段,此时,受冬季冻融解冻的影响,赖草地的土壤比较疏松,土壤稳定入渗率相对较高,随后,赖草地的土壤稳定入渗率呈下降趋势,在抽穗期(5 月底)下降到最低值 1.61 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,然后,随着赖草的开花,土壤稳定入渗率呈上升趋势,在种子成熟期(7

月中旬),上升到最大值 $4.53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,此后,随着赖草种子的散落,土壤稳定入渗率又呈下降趋势,在种子散落高峰期(9月上旬),土壤稳定入渗率下降到 $1.96 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,下降幅度为 56.7%,在种子散落末期(9月下旬),土壤稳定入渗率又上升到 $3.76 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。紫花苜蓿经历了返青、旁枝形成、现蕾、开花、结荚、种子成熟初期和种子成熟末期等 7 个生长阶段,土壤稳定入渗率的值在 $2.12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 到 $2.30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间波动变化,变化幅度大约为 8% 左右。在返青、旁枝形成、开花和种子成熟末期,紫花苜蓿地土壤稳定入渗率相对较大,较大值均为 $2.30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,在现蕾期和种子成熟初期土壤稳定入渗率相对较小,较小值分别为 $2.14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $2.12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。从 4 月中旬到 9 月底,裸地土壤稳定入渗率基本呈下降趋势,在 4 月中旬呈现最大值 $2.14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,在 9 月底呈现最小值 $0.81 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,平均值为 $1.47 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。裸地的土壤稳定入渗率相对较低,这可能与裸地近地表层缺少植被覆盖,强降雨所导致的土壤物理结皮降低了土壤的入渗能力有关[24-25]。

总体而言,赖草地的土壤稳定入渗率具有明显的生长季变化,紫花苜蓿地的土壤稳定入渗率无明显的生长季变化,这可能与两种退耕草地土壤属性生长季的变化特点有关。

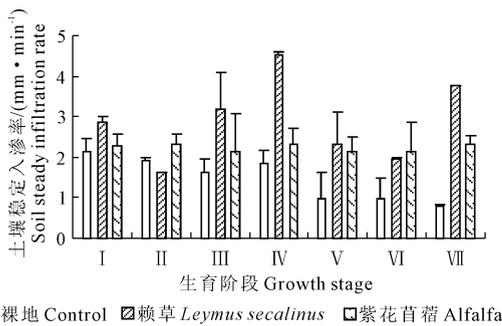


图2 赖草和紫花苜蓿地土壤稳定入渗率生长季变化

Fig.2 The variation of soil steady infiltration rate for *Leymus secalinus* and alfalfa in growing season

2.6 土壤稳定入渗率生长季变化影响因素

Pearson 相关分析表明,在两种退耕草地生长季内,土壤稳定入渗率与土壤初始含水量和容重呈显著负相关关系(表 2),与土壤总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关关系(表 2)。这说明土壤初始含水量、容重、土壤总孔隙度及毛管孔隙度是影响土壤稳定入渗率生长季变化的重要因子。

2.7 土壤稳定入渗率生长季变化模拟

在野外条件下,土壤稳定入渗率通常是难以直

接测量的。但是,它是土壤水文循环过程中的一个重要组成部分^[9,33],精确模拟土壤稳定入渗率对提高土壤蓄水量和土壤侵蚀的控制起着至关重要的作用。

表 2 土壤稳定入渗率与影响因子的相关系数

Table 2 The correlation coefficients of soil stable infiltration rate and influence factors

类型 Type	初始含水量 Initial moisture content/%	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity /%	毛管孔隙度 Capillary porosity /%
SIR (<i>Leymus secalinus</i>)	-0.791*	-0.87*	0.887**	0.999**
SIR (Alfalfa)	-0.85*	-0.916**	0.816*	0.936**

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

Note: * Indicated the significant differences at $P < 0.05$, ** Indicate significant differences at $P < 0.01$.

本研究中,采用非线性回归的方法,结合土壤稳定入渗率与其影响因素的函数关系方程形式,利用退耕草地土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度能够较好地模拟土壤稳定入渗率生长季的变化:

$$SIR = \exp\left(a \cdot \int BD + b \cdot \int TP + c \cdot \int CP\right) \quad (2)$$

式中, SIR 为土壤稳定入渗率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); BD 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), TP 为总孔隙度(%); CP 为毛管孔隙度(%); a , b 和 c 分别为回归系数。

在模拟方程(2)中,土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度分别能够解释自变量土壤稳定入渗率 88% 和 85.9% 的变量,这说明土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度是影响土壤稳定入渗率生长季变化的主要因素。总体而言,模拟方程(2)分别高估了赖草地和紫花苜蓿地土壤稳定入渗率的 2% 和 4%。模拟方程(2)的决定系数(R^2)分别为 0.88 和 0.859, NSE 系数分别为 0.878 和 0.855 (表 3)。总体上,模拟方程(2)分别高估了赖草地和紫花苜蓿地土壤稳定入渗率的 2% 和 3%。土壤稳定入渗率模拟效果如图 3。本研究中只考虑了土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度对土壤稳定入渗率生长季变化的影响,未考虑根系特征参数及其它土壤属性因素的影响,具有一定的偏差和局限性。在黄土丘陵区退耕还林(草)条件下,进一步研究根系特征参数对土壤稳定入渗率生长季变化的影响是非常需要的。

3 讨论

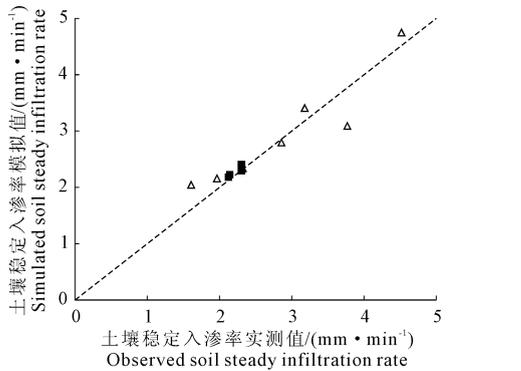
如图 1 所示,在整个退耕草地生长季内,赖草地和紫花苜蓿地的土壤初始含水量、容重、总孔隙度和

毛管孔隙度在降水、风、土壤硬化、结皮发育等作用的影响下^[34-35],表现出了较大的季节波动,其中,两种草地土壤初始含水量、紫花苜蓿地的容重和毛管孔隙度还表现出了显著的季节变化($P < 0.05$),这可能影响土壤稳定入渗率生长季的变化。

表 3 土壤稳定入渗率模拟方程参数值

Table 3 The parameter values of simulated equation of soil stable infiltration rate

草地类型 Grass type	a	b	c	R^2	NSE
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	-4.314	0.04	0.074	0.88	0.878
紫花苜蓿 Alfalfa	-0.013	0.008	0.012	0.859	0.855



▲ 赖草 *Leymus secalinus* ■ 紫花苜蓿 Alfalfa --- 1:1 线 1:1 line

图 3 土壤稳定入渗率实测值与模拟值的关系

Fig.3 The relationship between the measured and simulated values of soil stable infiltration rate

在整个草地生长季,两种草地的土壤稳定入渗率与土壤初始含水量表现出了反相位变化,即土壤初始含水量出现高值时,土壤稳定入渗率出现低值,反之,土壤稳定入渗率出现高值。Pearson 相关分析发现土壤初始含水量与土壤稳定入渗率呈显著负相关关系(表 2),这一结果与 Diamond^[36]和 Yang 等^[37]的研究结果相同。Hu^[38]和 Zhou^[39]等的研究表明:土壤初始含水量与土壤稳定入渗率和土壤渗透系数关系密切。在退耕草地生长季,赖草地和紫花苜蓿地土壤初始含水量干湿交替的季节变化,会导致近地表层土壤缝隙的发育,有助于增加土壤的稳定入渗率^[37]。

土壤容重与土壤稳定入渗率关系密切,二者呈负相关关系^[11,14,40]。土壤容重较大时,近地表层的土壤往往比较紧实,土壤孔隙度较小,水流在土壤中下渗时比较缓慢,土壤稳定入渗率较小。反之,土壤容重较小时,近地表层土壤通常比较疏松,或者存在裂隙,水流沿着疏松土壤或者裂隙下渗速度较快,从

而导致土壤的稳定入渗率较大。本研究中,相关分析表明,土壤容重与土壤稳定入渗率也呈显著负相关关系(表 2),这一研究结果与王国梁^[11]、李卓^[14]、Nielsen^[40]和 Yang 等^[37]的研究结果较为一致。在退耕草地生长季,土壤结皮的发育、雨滴的打击和土壤生物的活动等因素改变了土壤容重在生长季的大小,影响了土壤中孔隙度的大小,会导致水流在土壤中的运移速度发生变化,从而影响土壤稳定入渗率的大小。

土壤孔隙性和毛管孔隙度也是影响土壤水分运移的重要物理属性之一,在评价土壤孔隙性时,常将总孔隙度作为评价指标。土壤中孔隙的大小、形状等通常各不相同,这会导致对土壤中水分的保持和运移影响的不同,从而导致土壤稳定入渗率大小的不同。以往的研究表明,土壤孔隙度与土壤稳定入渗率间呈正相关关系^[11-12,40]。本研究中, Pearson 相关分析表明,两种退耕草地土壤总孔隙度与土壤稳定入渗率呈显著正相关关系,这一研究结果与王国梁^[11]、王鹏程^[12]、Nielsen^[40]和 Yang 等^[37]的研究结果较为一致。另外, Pearson 相关分析表明,土壤毛管孔隙度与土壤稳定入渗率也呈显著正相关关系(表 2),这一结果与 Yang 等^[37]的研究结果相同。

4 结 论

1) 在黄土丘陵区退耕草地生长季,赖草地的土壤稳定入渗率呈现出“W”型显著的生长季变化趋势($P < 0.05$),紫花苜蓿地的土壤稳定入渗率没有显著生长季变化趋势($P > 0.05$)。赖草地与裸地的土壤稳定入渗率具有显著性差异($P < 0.05$),紫花苜蓿地与裸地无显著差异($P > 0.05$)。赖草地平均土壤稳定入渗率最大,其次是紫花苜蓿地。

2) 土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度等土壤属性生长季的变化是影响黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化的主要因素。

3) 利用土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度等土壤属性生长季的变化可以很好地模拟退耕草地土壤稳定入渗率的生长季变化,模拟方程的决定系数分别为 0.88 和 0.86。

4) 两种退耕草地在整个生长季土壤稳定入渗率的平均值分别为裸地土壤稳定入渗率平均值的 1.96 倍和 1.52 倍,这说明在黄土丘陵区退耕还草有利于增加该区的降雨入渗。

参 考 文 献:

[1] 胡 琳,苏 静,桑永枝,等.陕西省降雨侵蚀力时空分布特征

- [J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1101-1107.
- [2] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [3] Fu B J. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Use and Management*, 1989, 5(2): 76-82.
- [4] Kheir R B, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon[J]. *Geomorphology*, 2006, 82(3/4): 347-359.
- [5] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [6] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200-203.
- [7] Moore I D, Larson C L, Slack D C, et al. Modeling infiltration: a measurable parameter approach[J]. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 1981, 26(1): 21-32.
- [8] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 等. 不同入渗水头条件下壤砂土的一维垂直入渗特性[J]. 干旱区地理, 2014, 37(4): 713-719.
- [9] Lassabatere L, Angulo - Jaramillo 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.
- [10] Parchami - Araghi 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Williams J R, Ouyang Y, Chen J S, et al. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Application of selected mathematical models [M]. United States Environmental Protection Agency, 1998, volume II, EPA/600/R - 97/128a.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Abu - Hamdeh N H, Abo - Qudais S A, Othman A M. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(5): 609-616.
- [19] An S S, Huang Y M, Zheng F L. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 286-292.
- [20] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2011, 86(2): 110-116.
- [21] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [22] Jiao J Y, Tzanopoulos J, Xofis P, et al. Can the study of natural vegetation succession assist in the control of soil erosion on abandoned croplands on the Loess Plateau of China[J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(3): 391-399.
- [23] Wang Y, Shao M A, Shao H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1): 9-17.
- [24] Agassi M, Morin J, Shainberg I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(1): 186-190.
- [25] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(5): 848-851.
- [26] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66(2): 197-205.
- [27] Lado M, Paz A, Ben-Hur M. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 935-942.
- [28] Lado M, Ben - Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1992-1999.
- [29] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 55-72.
- [30] 国家发展改革委, 水利部, 农业部, 等. 黄土高原地区综合治理规划大纲. <http://www.sdpc.gov.cn/>. 2011 - 01 - 17.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Lassabatere L, Angulo-Jaramillo 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.
- [34] Angulo - Jaramillo R, Vandervaere J P, Roullet S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 55(1): 1-29.
- [35] Imeson A C, Kwaad F J P M. The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility[C]//Boardman J, Foster I D L, Dearing J A, et al. *Soil erosion on agricultural land*. Chichester John Wiley and Sons, 1990.
- [36] Diamond J, Thomas S. Infiltration rate assessment of some major soils[J]. *Irish Geography*, 2003, 36(1): 32-46.
- [37] Yang J L, Zhang G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2011, 11(5): 751-761.
- [38] Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 355-366.
- [39] Zhou X, Lin H S, White E A. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes[J]. *Catena*, 2008, 73(2): 180-188.
- [40] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[C]//Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, Pudoc Wageningen, Berman Press, 1985.