

黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中 土壤入渗特征的变化

勃海锋^{1,2}, 刘国彬², 王国梁²

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用空间代替时间的方法, 将黄土丘陵区 1, 4, 8a 退耕地上的植物群落组成演替序列, 并以当地较稳定的天然狼牙刺群落和人工柠条群落作对照, 用圆盘入渗仪 (Z-700) 对上述群落下土壤稳定入渗过程和入渗特征进行了对比研究。(1) 天然狼牙刺群落下土壤稳定入渗速率小于人工柠条群落下的稳定入渗速率, 因为人工柠条群落生物量较高, 植被对土壤的改善作用更大。(2) 随着退耕年限的增加, 土壤的平均入渗速率和饱和导水率也在增加, 其中 1, 4, 8a 退耕地上饱和导水率分别达到狼牙刺群落下的 52%, 74% 和 98%。稳定入渗率能够达到狼牙刺群落下的 57%, 88% 和 91%。说明随着退耕地上植被的恢复, 土壤稳定入渗速率不断提高。(3) 土壤的入渗特征受土壤理化性质影响很大。其中土壤孔隙度对土壤稳定入渗影响最大, 因为随着退耕地植被的恢复, 通过根系的穿插分割作用, 以及根系死亡后形成的生物性大孔, 使土壤中有效孔隙数量不断增加, 土壤入渗性能得到提高。

关键词: 黄土高原; 植被恢复; 入渗; 饱和导水率

文献标识码: A **文章编号:** 1000—288X(2007)03—0001—05 **中图分类号:** S714.6, S152.7⁺2

Changes of Infiltration Characteristics of Abandoned Cropland with Plant Restoration in Loess Hilly Region

BO Hai-feng^{1,2}, LIU Guo-bin², WANG Guo-liang²

(1. Northwest Sci-Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the space-for-time method, the 1, 4 and 8-year plant communities of abandoned cropland were selected to investigate infiltration process and characteristics using Disc infiltrometer (Z-700). One artificial community (*Cargana korshinkii*) and one natural community (*Sophora davidii*) were chosen as control. We found that: (1) stable infiltration rate under *Sophora davidii* communities was less than that under *Cargana korshinkii* communities. It may relate with soil perturbation and the higher root biomass of artificial *Cargana korshinkii*. (2) The average infiltration rate and saturated hydraulic conductivity of abandoned cropland were increased with the abandoned time. Soil saturated hydraulic conductivities (SHC) of 1, 4 and 8-year abandoned croplands were 52%, 74% and 98% of the SHC under nature *Sophora davidii* communities respectively, while stable infiltration rates of 1, 4 and 8-year abandoned cropland were 57%, 88% and 91%. It indicated that infiltration rate increased with plant restoration. (3) Soil infiltration characteristics were influenced by soil physical and chemical properties, such as soil porosity, bulk density, texture, compaction, moisture and organic matter content. With plant restoration, plant can generate a large amount of root.

Keywords: the Loess Plateau; plant restoration; infiltration; saturated hydraulic conductivity

植被是防止地面水土流失最积极的因素^[1-2]。黄土丘陵区是黄土高原水土流失最严重、生态环境最为脆弱的地区之一。造成水土流失的主要原因是该区长期不合理的土地利用及对植被的破坏。植被的

生长,不但使具有特殊结构的黄土成壤过程顺利进行,而且对巩固土壤的“点棱接触侧斜支架式多孔结构”具有重要意义。更为重要的是,植被通过枯枝落叶层及其形成的土壤有机质可以极大地改良土壤的

收稿日期: 2006-10-12

修稿日期: 2007-03-08

资助项目: 国家科技支撑课题“植被优化配置与可持续建设技术”(2006BAD09B03); 中国科学院西部行动计划“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究”(KZCX2—XB2—05)

作者简介: 勃海锋(1979—), 男(汉族), 宁夏自治区灵武县人, 硕士研究生, 主要从事植被恢复和土壤性质方面的研究。E-mail: bhf20002000@yahoo.com.cn。

结构,又通过根系形成的生物性大孔能够容纳更多的水分,提高土壤的渗透能力。此外,研究不同植被类型自然恢复过程及其对土壤入渗的影响是该地区有效植被建造、树草种配置及水土保持功能评价的特别重要的应用性基础工作,也是黄土丘陵区生态恢复的关键所在。土壤渗透性是描述土壤入渗快慢极为重要的土壤物理特征参数之一。通过植被建设提高土壤渗透性能,地表径流就会越少,减少了土壤侵蚀动力,土壤流失量就相应减少。目前,关于土壤入渗方面的研究已有不少报道,但主要集中于不同土壤条件和不同土地利用方式下土壤的入渗特性^[3-6]。关于不同植被类型下土壤入渗特征的研究,多集中在稳定入渗速率的研究上^[2,7-10,16],对不同植被类型下土壤入渗整个过程的研究较少,尤其是缺乏对土壤初始入渗速率特征的研究,而这个指标能够反映土壤的初始状况。因此,本研究以退耕地灌木和草本植物群落为对象,通过研究不同植被恢复阶段中,土壤的入渗特性,如稳定入渗率和饱和导水率,揭示植被恢复与重建对改善土壤物理性质的作用机制,为揭示植被的水土保持功能,评价人工林促进生态恢复效果提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持试验站纸坊沟流域内,属典型的大陆性半干旱季风气候,夏季多雨,冬季严寒干燥。日照时数为 2 415.5 h,辐射总量为 480.06 kJ/cm²,平均气温 8.8℃, 10℃ 活动积温 3 177.4℃;多年平均降水量 492.4 mm,年蒸发量 1 645.4 mm。该区地形主要为梁峁状黄土丘陵,沟谷发育,土壤侵蚀作用十分强烈。土壤类型为黄绵土,保水性差,疏松易碎,易受水蚀和风蚀,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。

1.2 研究方法

(1) 研究样地设在野外监测样地内,采用时空互代法在流域内选择土壤类型相同,坡向、坡位相似的退耕地组成演替序列。其中 1 a 退耕地上植被稀疏,主要为狗尾草,4 a 退耕地为茵陈蒿群落,8 a 退耕地为长芒草+赖草群落。选择流域内较稳定的天然狼牙刺群落(*Sophora davidii*) (CK₁)和人工柠条林群落(*Caragana korshinkii*) 25 a (CK₂),其中狼牙刺群落被认为是该区一个亚顶极群落,其土壤入渗可以看作该区具有良好结构土壤的入渗值。

(2) 土壤入渗采用澳大利亚生产的圆盘入渗仪(Z-700)测定^[11]。圆盘入渗仪底盘直径为 25 cm,负

压均为 -1.7 cm。测定方法:试验开始后,前 30 s 每隔 5 s 读数一次;30~90 s 每 10 s 读数一次;3 min 后,每 3 min 读数一次。每次试验 5 次重复,测定时间至少 60 min,试验时水温为 10℃。初始入渗率为每次试验前 1 min 的土壤入渗率,稳定入渗率为 30 min 后的土壤入渗率。稳定入渗时间把每次试验的平均稳定速率代入入渗方程,求得稳定入渗时间。土壤饱和导水率是反映土壤的入渗和渗漏性质的一个重要指标,见文献[12]。

(3) 土壤容重用环刀法测定,孔隙度可根据下式计算:

$$f = (1 - b/s) \times 100\%$$

式中: f ——孔隙率(%); b ——容重(g/cm³); s ——土壤比重(取 2.65 g/cm³)。

由于水分在土壤非活性孔中移动极慢,但在毛管孔和通气孔中移动较快,因此,文中将土壤毛管孔与通气孔的孔度合称活性孔度。计算公式:活性孔度=土壤总孔隙度-非活性孔度,其中非活性孔度=凋萎含水量×土壤容重,黄绵土凋萎含水量取 4.5%。

(4) 含水量采用烘干法测定,饱和含水量采用重量法测定。终止含水量在试验结束时立即用小铲取表层土壤,用烘干法测定。

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限植被的土壤初始入渗特征

不同植被类型土壤初始入渗速率差异较大,同一植被不同时段土壤入渗速率差异亦较大(见表 1)。从表 1 可见,前 3 min 土壤平均入渗速率随着退耕年限延长明显增加,但显著低于柠条林地的平均入渗速率,不同植被其前 3 min 入渗速率依次为:柠条林地 > 8 a 退耕地 > 4 a 退耕地 > 狼牙刺林地 > 1 a 退耕地。随着土壤水分的入渗,15 min 时入渗速率显著下降,下降幅度平均为 43%,其中下降最少的是 4 a 退耕地,为 38%,下降幅度最为明显的是柠条林地,为 48%。此时,平均入渗速率大小顺序没有发生变化;30 min 时,各植被类型土壤下降幅度变缓,平均入渗速率大小顺序发生变化,依次为:柠条林地 > 8 a 退耕地 > 狼牙刺林地 > 4 a 退耕地 > 1 a 退耕地。开始土壤入渗速率快,后期变的缓慢,因为土壤水分在入渗的开始阶段,土壤孔隙处于缺水状况,持水能力很强,前期土壤入渗速率维持在一个较高水平,但随着土壤中水分的增加,进入土壤的水分开始变缓慢,土壤入渗速率相应就变小。

从表 2 也可以看出,试验结束时土壤充水孔隙达到孔隙的 80%以上,说明土壤水分已接近饱和,土壤

吸水速率变得缓慢,土壤入渗速率降幅趋于平缓。总体来说,人工柠条林在前30 min土壤平均入渗速率大于狼牙刺,不同退耕年限的退耕地中,只有退耕8a的大于狼牙刺,其余都小于狼牙刺,其中只有1a退耕地和狼牙刺差异显著的差距明显(表1)。

从表1可见,退耕1a的土壤初始入渗速率最小,仅为2.34 mm/min。单独分析退耕地,随着退耕时间

延长,初始入渗速率增大,而且8a退耕地的初始入渗速率是1a退耕地的1.7倍。人工柠条林地的初始入渗速率最大,是1a退耕地的2.4倍。处于亚顶级群落的狼牙刺林地初始入渗速率小于8a退耕地,大于1a和4a退耕地,但明显小于人工柠条。和狼牙刺林地比较,随着退耕地植被的自然恢复,土壤的初始入渗速率也能够达到与天然植被相同的状况。

表1 不同退耕植被类型土壤的初始入渗率

mm/min

样地	前3 min 平均入渗速率	前15 min 平均入渗速率	前30 min 平均入渗速率	初始入渗速率 f_0
1a退耕地	1.325 ±	0.726 ±	0.651 ±	2.34 c
4a退耕地	1.732 ±	1.082 ±	0.828 ±	2.39 c
8a退耕地	2.109 ±	1.174 ±	0.976 ±	3.87 b
CK ₁	1.639 ±	0.967 ±	0.851 ±	2.98 bc
CK ₂	2.903 ±	1.504 ±	1.241 ±	5.64 a

注:表中数值指平均值 ±标准误,初始入渗速率采用多重比较。

表2 不同植被类型土壤的特性

样地名称	初始含水量/ %	终止含水量/ %	容重/(g cm ⁻³)	土壤总孔隙度/ %	活性孔隙度/ %	饱和含水量/ %
1a退耕地	9.01	23.97	1.24ab	0.531ab	0.475ab	38.58
4a退耕地	7.71	30.08	1.23a	0.532b	0.476b	40.69
8a退耕地	6.28	32.82	1.18b	0.553a	0.500a	41.99
CK ₁	6.42	35.90	1.19b	0.550ab	0.496ab	41.57
CK ₂	4.87	37.77	1.18b	0.555a	0.502a	40.64

注:容重、土壤总孔隙度和活性孔隙度均采用多重比较。

由不同植被类型土壤的特性(表2)可见,退耕1a土壤的初始含水量为9.01%,其它植被类型土壤平均为6.32%,柠条不到5%,说明初始入渗速率和初始含水量成反比。因为,通常在相同质地的土壤和供水条件下,初始入渗率主要由土壤湿润程度决定。如果开始入渗时土壤较为湿润,在湿润前锋的吸力梯度小,最初入渗速率较低。随后入渗速率降低则相反,若开始入渗的土壤干燥,吸力梯度大,则最初入渗速率较高,以后随时间延长入渗速率降低也快。我们的研究结果说明耕地退耕后随着植被恢复,对土壤物理

性质的改善作用明显,随着年限的增加,恢复作用越好,而且退耕8a土壤的初始入渗速率已经大于天然稳定狼牙刺群落。

2.2 不同植被类型入渗过程及土壤稳定入渗率、饱和导水率特征

表3中入渗方程反应了不同植被恢复类型的土壤水分入渗过程,并对实测数据进行了方程拟合。拟合方程表明,土壤入渗过程中前期变化剧烈;在20 min后,不同植被类型的入渗都变得比较平缓,波动不明显,这与实测结果基本一致。

表3 不同森林植被下层土壤水分入渗方程及前30 min 累积入渗量

植被类型	入渗方程	决定系数	累积入渗方程	前30 min 累积入渗量/mm
1a退耕地	$f = 1.7396t^{-0.2718}$	$R^2 = 0.9336$	$F = -0.0010t^2 + 0.6650t + 1.0767$	13.76
4a退耕地	$f = 1.7109t^{-0.1996}$	$R^2 = 0.8378$	$F = -0.0051t^2 + 0.9650t + 1.2718$	25.63
8a退耕地	$f = 3.3199t^{-0.4233}$	$R^2 = 0.8888$	$F = -0.0062t^2 + 0.9894t + 2.0621$	26.16
CK ₁	$f = 1.6354t^{-0.2402}$	$R^2 = 0.7843$	$F = -0.0050t^2 + 0.8595t + 0.9587$	22.47
CK ₂	$f = 3.6186t^{-0.3877}$	$R^2 = 0.8871$	$F = -0.0040t^2 + 1.0201t + 2.5928$	29.60

注: f ——平均入渗速率, F ——累积入渗量。

稳定入渗率是土壤水分入渗达到稳定时的下渗速率,是评价土壤物理特性的一个重要指标。由图 1 可见,从左到右,稳定入渗率逐渐上升。人工柠条林地的稳定入渗率明显高于其它植被类型,是 1 a 退耕地的 2.58 倍。退耕地系列,随着年份的增加,稳定入渗率相应地也在增加。其中,4 a 退耕地,8 a 退耕地和狼牙刺林地的稳定入渗率差异不明显。说明退耕地植被恢复时间越长,对土壤稳定入渗速率的改善作用越显著,且退耕地在 8 a 时其稳定入渗率和天然狼牙

刺群落土壤较接近,数值已经达到狼牙刺林地的 90% 以上,但和人工柠条林地比较依然有一定的差距。因为不同植被恢复类型由于其群落结构组成不同,生境不同,土壤有机质含量、结构不同,导致不同植被类型土壤稳定入渗率不同。从稳定入渗时间上看,1 a 退耕地到达稳定入渗的时间明显要比其它植被类型的要长,从拟合结果可见,其它退耕地到达稳定入渗时间均为 50 min,而狼牙刺和柠条林地到达稳定入渗的时间平均为 35 min,这与实测值很接近。

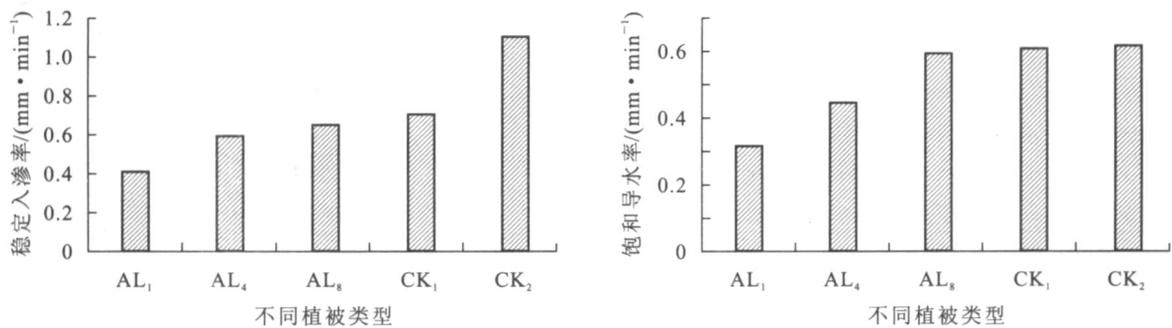


图 1 不同植被类型土壤稳定入渗率和饱和导水率

注:AL₁ 为 1 a 退耕地; AL₄ 为 4 a 退耕地; AL₈ 为 8 a 退耕地; CK₁, CK₂ 均为对照地

土壤饱和导水率是反映土壤的入渗和渗漏性质的一个重要指标,是研究水分、溶质在土壤中运动规律时的重要水力参数。饱和导水率由于土壤质地、容重、孔隙分布以及有机质含量等空间变量的影响空间变异强烈^[13-14]。1 a 退耕地的土壤饱和导水率较小,不到 0.4 mm/min,随着退耕年限的增加,土壤饱和导水率有不同程度的增加,退耕 8 a 时接近于天然狼牙刺林地,也能够达到 90% 以上(图 1)。人工柠条林地和狼牙刺林地的饱和导水率没有显著差异,表明通过退耕和人工植被促进生态恢复,可以利用植被恢复的作用,提高土壤渗透性能,其大小顺序和稳定入渗率的一样,依次:柠条林地 > 狼牙刺林地 > 8 a 退耕地 > 4 a 退耕地 > 1 a 退耕地。退耕年限越长,饱和导水率就越大,而且 8 a 退耕地和柠条、狼牙刺林地相差不明显。再由表 2 所示,土壤孔隙度越小,饱和导水率越小,说明饱和导水率大的土壤,渗透性能越强,与前人结果相似^[4]。这表明退耕年限越长对土壤结构的改良作用明显,可以有效地提高土壤的渗透性能。而且两个稳定的植被群落相比较,柠条改良土壤的作用更为明显。

表 3 说明土壤水分入渗过程、入渗量和入渗时间显著相关,回归方程具有很好的统计学意义。不同植被类型下,其土壤累积入渗量变化也不同。和 1 a 退耕地相比较,其它植被类型的土壤入渗量要大。本文以前 30 min 的土壤累积入渗量作为表征各植被类型

下土壤的渗透性能。从表 3 看出,前 30 min 累积入渗量以柠条为最大,多出对照地 2.15 倍,其大小顺序为:柠条林地 > 8 a 退耕地 > 4 a 退耕地 > 狼牙刺林地 > 1 a 退耕地。狼牙刺林地累积入渗量变小,可能是因为前期入渗很慢,入渗水量小,导致前 30 min 累计量较小。

不同植被恢复类型土壤渗透性能不同,且恢复潜力差异较大。以不同恢复阶段的退耕地为例,恢复时间越长,土壤的渗透性能就越强(以土壤稳定入渗率和饱和导水率为参考)。以天然演替狼牙刺群落和人工柠条群落比较,能够看出柠条林地各个渗透性能的指标都要好于狼牙刺林地。以退耕地群落比较,说明恢复时间越长,土壤渗透性能越好。不同植被在地表形成枯枝落叶层,能够有效防止了土壤结皮的发生,从而防止了土壤结皮对水分入渗的阻碍作用,又通过根系的挤压、分割作用,改变了土壤结构。尤其是土壤中根系的增加,有效地增加了土壤孔隙含量。这些都促成了土壤入渗能力的增加。用天然狼牙刺群落作为参比群落,表明人工柠条植被改良土壤的作用更为明显,和退耕地植被比较,退耕地经过自身的恢复作用,不但能够提高土壤的渗透性能,而且能够达到自然恢复。

2.3 土壤渗透性能影响因素分析

土壤水分渗透性可以用土壤的初始入渗率、稳定入渗率和饱和导水率来反映,受土壤理化性质(土壤

孔隙度、容重、质地、紧实度、含水量、有机质含量)、土壤小气候等因素影响,同时又是一个动态指标。不同立地条件,土壤渗透能力不同,即使同一立地条件,也有季节性(土壤含水量、湿度、植被的季节性变化)和非周期性的变化。由于上述原因以及测定上的困难,不可能以精确方式表征这一性能,因此本文采用多次重复试验(大多是5次),测定了各土壤类型渗透能力的平均水平(见表1—2)。

从表2中看出,退耕地植被恢复不同阶段中,对土壤容重和孔隙度有明显的影响。退耕年限较长的植被,在土壤容重、总孔隙度和活性孔隙度与1a退耕地存在较大差异。因为植被恢复过程中,根系对土壤的穿插分割作用能使土体碎裂,形成裂隙,以及根系死亡分解后形成的通道使土体中孔隙增加;改善土

壤环境,土壤中虫孔数目增加。伴随着土壤容重的减小,土壤总孔隙度和活性孔隙度也明显增加^[15]。从饱和含水量也能看出,退耕地群落随着年限的增长,土壤的饱和含水量也在增大,说明土壤孔隙容纳水的能力增强。

土壤饱和导水率是表征土壤渗透性能的重要物理参数,由表4可看到,土壤的渗透性能与土壤容重之间有负相关关系,与总孔隙度、活性孔隙度呈正相关关系。表明土壤渗透性能提高的主要原因是土壤孔隙,尤其是活性孔隙增加。据相关研究报道,植被在恢复过程中往往会形成生物性大孔^[16],由于生物性大孔具有较好的连通性且孔隙直径较大,使水分在土壤中的移动加快,有些生物性大孔中还会形成优势流^[17—18],从而使水分在土壤中的移动速度更快。

表4 土壤饱和导水率与土壤容重及土壤孔隙度间的回归分析

影响因子	回归方程	相关系数 R^2	F	p
容重 x_1	$y = -3.0353x_1 + 4.1791$	0.9366	0.662	< 0.05
总孔隙度 x_2	$y = 6.9369x_2 - 3.2460$	0.9583	0.692	< 0.05
活性孔隙度 x_3	$y = 6.0983x_3 - 2.4575$	0.9497	0.672	< 0.05

在不同植被群落恢复过程中,各植被类型的土壤有机质含量都普遍高于1a退耕地,仅为0.280%。而柠条地和狼牙刺林地分别为0.438%和1.40%,其它退耕地有机质的含量居中。疏松多孔的有机质进入土壤后,除本身能提高土壤的入渗性能外,由于有机质是形成土壤团聚体的重要物质,在有机质作用下,土壤团聚体的大量形成也会间接促进土壤的稳定入渗性能,说明土壤有机质含量也是影响土壤渗透性能的重要因素。

3 结论

(1) 黄土丘陵区植被建设是提高土壤渗透性能的有效途径,不同恢复植被类型对其的改善能力不同。随着植被恢复,不同恢复阶段、不同植被类型土壤稳定入渗率、累积入渗量和饱和导水率较恢复前期(参照1a退耕地)显著增大,其平均增幅依次为81%、88%和70%。其中,人工植被柠条林地土壤的增幅最为明显。总体来说,通过和狼牙刺、柠条群落比较,说明退耕地植被在演替过程中能够提高土壤的渗透性能,改善土壤的理化性质。

(2) 土壤稳定入渗速率和饱和导水率分别和土壤容重、土壤总孔隙度、土壤活性孔隙度之间有明显的相关关系。因为随着植被恢复,使表层土壤孔隙度增加、容重减小,尤其使土壤中活性孔隙增加更有利于土壤水分的下渗,使土壤的渗透性能得到提高。

(3) 狼牙刺是黄土丘陵区较稳定的自然群落,该群落下土壤入渗特征是植被与土壤长期相互作用的结果。可以作为该区理想土壤所具有的土壤入渗参考标准。在退耕地植被恢复过程中,年限较高的退耕地土壤稳定入渗率、饱和导水率逐渐向该值(狼牙刺)逼近。说明土壤物理性质不断提高。此外,人工柠条群落下土壤稳定入渗率和饱和导水率高于狼牙刺群落下该值,说明人工群落对土壤物理性质的改善作用甚至可以大于天然植物群落。

[参 考 文 献]

- [1] 朱显谟. 黄土高原土地的国土整治问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 1—4.
- [2] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579—583.
- [3] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 273—275.
- [4] 解文艳, 樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(4): 381—384.
- [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] 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(5): 538—540.

(下转第31页)

- [2] 董三孝. 黄土丘陵区退耕坡地植被自然恢复过程及其对土壤入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 24(4): 1—5.
- [3] 吴明作, 刘玉萃, 郑东方, 等. 黄河中游的生境与林业生态工程[J]. 河南林业科技, 2000, 20(3): 1—6.
- [4] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究——以等高植物篱为例[J]. 地理研究, 2000, 19(3): 303—310.
- [5] Lampurlanes J, Angas P, Cantero - Martinez C. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain [J]. Soil & Tillage Research, 2002, 65: 207—220.
- [6] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China [J]. Catena, 2000, 39: 69—78.
- [7] Jeremy J. Gullison, Charles P. Bourque A. Spatial prediction of tree and shrub succession in a small watershed in Northern Cape Breton Island, Nova Scotia, Canada [J]. Ecological Modelling, 2001, 137: 181—199.
- [8] 冯秀兰, 张洪江, 王礼先. 密云水库上游水源保护林水土保持效益的定量研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 71—77.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [10] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 536—543.
- [11] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16—19.
- [12] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 441—444.
- [13] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46—50.
- [14] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 20—23.
- [15] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55—58.
- [16] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272—278.
- [17] 刘秉正, 李光录, 吴发启. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 77—86.

(上接第5页)

- [7] 许明祥, 刘国林, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54—58.
- [8] 陈一兵, Kim Troubowst, 等. 紫色土渗透性能的对比研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 11—14.
- [9] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339—344.
- [10] 陈丽华. 黄土地区水土保持林地土壤入渗规律的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(3): 51—55.
- [11] CSIRO Disc Permeameter - Instruction Manual[Z]. Canberra, 1988.
- [12] 王红闪, 黄明斌. 四种方法推求土壤导水参数的差别与准确性研究[J]. 干旱区农业研究, 2004, 22(2): 76—80.
- [13] Jury W A, Gardner W R, Gardner W H. Soil Physics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [14] Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field[A]. In: Hillel D (ed.). Applications of Soil Physics [M]. New York: Academic Press, 1980. 319—344.
- [15] 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.
- [16] Chisci G C, Bazzonffi P, Pageliani, et al. Association of sulla and atriplex shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 84: 45—53.
- [17] Martinez-Meza E, Whitford W G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan Desert shrubs [J]. Journal of Arid Environments, 1996, 32: 271—287.
- [18] Gile L H, Gibbens R P, Lenz J M. Soil-induced variability in root systems of creosote bush (*Larrea tridentata*) and tarbush (*Flourensia cernua*) [J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39: 57—78.