桂西北峰丛洼地土壤水动力学性质对不同退耕措施的响应特征

张晓艳[1,2,3]，张建兵[1,2]，王静怡[4]

(1. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室(广西师范学院)，南宁 530001；
2. 广西地表过程与智能模拟重点实验室(广西师范学院)，南宁 530001；
3. 湖南第一师范学院，长沙 410205；4. 西安石油大学计算机学院，西安 710065)

摘要：以桂西北峰丛洼地石漠化治理区耕地(CL)为对照，结合原位入渗和数值模拟的方法，评估了 2 种典型退耕方式(自然退耕(NR)、任豆牧草(ZN)，始于 2007 年)对土壤水动力学性质的影响。结果表明：土壤饱和导水率 K_s 基本呈现为 CL＜ZN＜NR；退耕对表层(0—10 cm)和底层(＞30 cm)K_s 影响较大，其中表层和底层 K_s 分别提高了 49.0%(ZN)和 51.9%(NR)，底层则分别提高了 33.1%(ZN)和 21.1%(NR)。参数 α 和 n 分别呈现为 CL＜ZN＜NR 以及 CL＞NR＞ZN 的规律，而保水性(基于残留含水率 θ_r、饱和含水率 θ_s，参数 α 和 n 计算得出)则呈现为 CL＜NR＜ZN。这说明 NR 和 ZN 2 种退耕方式对土壤水文性质均有一定改善作用。统计分析表明，CL、NR 和 ZN 三者的土壤水动力学参数差异均无显著性(P＞0.05)，这主要是由退耕对土壤水动力学性质的影响相对缓慢和土壤空间差异共同导致的。研究结果可为石漠化治理和生态重建提供参考依据，也可为原位确定土壤水动力学参数提供方法参考。

关键词：退耕措施；土壤水文；数值模拟；峰丛洼地

中图分类号：S152.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2018)05-0140-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.023

Responses of Soil Hhydraulic Properties to Restoration Measures in Karst Peak-cluster Ddepression Area, Northwestern Guangxi

ZHANG Xiaoyan[1,2,3], ZHANG Jianbing[1,2], WANG Jingyi[4]

(1. *Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Guangxi Teachers Education University), Ministry of Education, Nanning* 530001; 2. *Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation (Guangxi Teachers Education University), Nanning* 530001; 3. *Hunan First Normal University, Changsha* 410205; 4. *School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an* 710065)

Abstract: By comparing to the crop land (CL), the effects of two typical restoration measures (*Zenia insignis Chun*＋*Napiergrass* (ZN) and Natural restoration (NR)) on soil hydraulic properties at three depths (surface layer 0—10 cm, subsurface layer 10—30 cm, underlying layer ＞ 30 cm) were investigated in a typical peak-cluster depression area in northwestern Guangxi, based on in *situ* infiltration experiments and numerical inversion methods. The results showed that, the order for K_s was CL ＜ ZN ＜ NR. The two restoration measures had more obvious impacts on K_s both in the surface and underlying layer. Compared to the CL, the K_s increased by 49.0% (ZN) and 51.9% (NR) in the surface layer, and by 33.1% (ZN) and 21.1% (NR) in the underlying layer, respectively. The order for parameter α and n were CL ＜ ZN ＜ NR and CL ＞ NR ＞ ZN, and the rank for water-retaining property (calculated based on residual water content θ_r, saturated water content θ_s, α and n) was CL ＜ NR ＜ ZN. These results indicated that the two ecological restoration measures could improve soil hydrological functions. However, the statistical analysis showed that the differences among the soil hydraulic parameters in CL, NR and ZN were not significant (P ＞ 0.05). There might be ascribed to the slow impacts of ecological restoration on soil hydraulic properties, and the high heterogeneity of soil hydraulic properties.

收稿日期：2018-04-25

资助项目：广西地表过程与智能模拟重点实验室基金项目(2015GXESPKF05)；国家自然科学基金项目(41601262，41601585)；土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y20160037)；湖南省自然科学基金项目(2016JJ4025)

第一作者：张晓艳(1986—)，女，山东临沂人，博士，讲师，主要从事全球变化与生态系统响应研究。E-mail：hnfnuxyzhang@sina.com

通信作者：张建兵(1984—)，男，四川广安人，博士，副研究员，主要从事土壤过程与生态效应研究。E-mail：gxtczjb@163.com

Keywords: ecological restoration; soil hydrology; numerical simulation; karst peak-cluster depression area

在我国南方喀斯特区,土层浅薄,同时高强度人为活动加剧了水土流失,导致严重的石漠化[1]。为综合治理石漠化,有效改善喀斯特地区自然环境,自 21 世纪初开始,西南地区开展了大范围退耕还林还草工程。退耕导致用地类型的改变,可通过改变根系穿插及分泌物、凋落物腐解等多种途径影响土壤水动力学性质。土壤水动力学性质密切关系到土壤水分入渗、滞存和转化。特别在土层浅薄的喀斯特地区,地表水分亏缺频繁,植被改变对土壤水动力学性质的影响,甚至可能关系到恢复植被的可持续性。因此,评估退耕对土壤水动力学性质的影响,对综合评估石漠化治理模式的生态效应具有重要参考意义。特别在当前我国开展第二轮石漠化治理工程与全球变暖极端气候事件频发的背景下,其显得更加重要。

实际上,退耕对土壤水文性质影响的研究[2-3]已有不少报道,西南喀斯特地区[4-5]也并不少见。一般认为,随着生态系统的正向演替(耕地往顶级群落方向)或人为活动的减弱,土壤持水保水性质都有一定提升[5-6]。但综合来看,现有研究在方法上或基于如孔隙度、容重、有效含水量等土壤参数[6],或基于原位入渗或采样测定等传统的方式[4,7]。这些方式不仅工作量大,测定过程中对土壤的扰动也会影响所测结果的代表性。从主题上,现有研究对导水率多有叙述,对持水性涉及较少。要综合评估退耕对土壤水动力学特征的影响,导水性和持水性都是不可或缺的。要解决传统方法的缺陷,结合原位试验和模型数值反演的方法是可能有效途径。因此,本文结合原位入渗和数值模拟的方法,以耕地为参照,研究了西南喀斯特地区峰丛洼地 2 种退耕方式对土壤水动力学性质的影响,以期为石漠化治理和生态重建提供参考依据,也为原位确定土壤水动力学参数提供方法参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验样地位于广西环江毛南族自治县下南古周村(24°54′ N,107°57′ E),属典型的喀斯特峰丛洼地。当地土壤发育于灰岩,土质黏性较重。气候属典型的亚热带季风气候,雨热同季,年均气温 18.5 ℃,年均降水量 1 389 mm。自 2007 年始,古周全面实施退耕还林还草工程,其中一部分撂荒自然恢复,一部分恢复成牧草地和经济林(薪柴林地),另有少部分农田耕作至今。

1.2　入渗试验和土壤理化性质

本文于古周小流域内的下坡位置(耕地一般在下坡位)选择任豆牧草地(ZN)和自然退耕(NR)(均由耕地退耕而来)2 种退耕模式,并以耕地(CL,玉米大豆轮作)作为对照(为便于讨论,下文中 CL、ZN 和 NR 统称为用地类型)。在每种用地类型样地内随机选择 3 个样点,每个样点分 3 层(表层 0—10 cm、亚表层 10—30 cm 和底层 30 cm 以下)进行单环入渗试验(2017 年 6 月)。试验之前,先将地面植物去除并整平地表,且在相邻位置开挖不同深度(10,30 cm)剖面并平整其底面,且同时采样测定土壤初始含水率。之后,将单环(内直径 15.0 cm)小心敲入土中 1.0 cm。试验时往单环中小心倒入 1.0 cm 深的水(约 176.6 mL),在环内积水入渗完成的瞬间添加另一次水(1.0 cm 深,176.6 mL)并记录时间。如此反复,直至每次加水间隔时间基本相同为止[8]。入渗结束后,用环刀(100 mL)采样测定土壤饱和含水率(2017 年 6 月)及土壤理化性质(2017 年 8 月),包括颗粒组成、容重和土壤有机碳。其中,土壤机械组成采用激光粒度仪(Master sizer 2000)测定,其余指标测定方法参考《土壤农化分析》[9]。如此,试验共采集有 27 组数据,包括不同时段累积入渗量、初始含水率、饱和含水率、容重和土壤有机碳等。

1.3　土壤水分运动基本方程

采用直径为 15.0 cm 的单环进行入渗,相对样地尺寸而言,该入渗方式在严格意义上属于点源三维入渗。然而,若进行三维数值模拟反演,则将极大地增加计算量。因此,本文假设相同土层内(0—10,10—30,> 30 cm 土层)的土壤各向均质且各处初始含水率相同(不同土层之间有差异),将单环入渗简化为二维入渗。同时,为减少边界效应,将入渗区设定为 300 cm(宽)×150 cm(深)的区域(远大于入渗实际湿润区,符合田间实际情况)。二维水分运动 Richards 方程可以描述为:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K(\theta)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K(\theta)\frac{\partial h}{\partial z}+K(\theta)\right) \quad (1)$$

式中:θ 为体积含水率(cm^3/cm^3);$K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率(cm/s);h 为土壤水势(cm)。

模型初始条件为土壤初始含水率,即:

$$h(x,z,t)=h_0(x,z) \quad (2)$$

模型中入渗边界设定为稳定水头入渗边界(水头高度设为 0.5 cm),即:

$$h(x,z,t_0)=0.5\ \text{cm},142.5\ \text{m}<x<157.5\ \text{cm},z=0\ \text{cm} \quad (3)$$

上边界(即地表)中除入渗边界(15.0 cm)外的其余部分以及两侧边界为零通量边界,即:

$$K(\theta)\frac{\partial h}{\partial x}=0,x=0\ \text{cm}\ x=300\ \text{cm};$$

0 cm$<x<$142.5 cm,157.5 cm$<x<$300 cm,z=0 cm (4)

下边界条件为自由排水边界,即:

$$\frac{\partial h}{\partial z}=0, z=-150 \text{ cm}, 0 \text{ cm}<x<30 \text{ cm}, t>0 \quad (5)$$

土壤水动力学参数采用 van Genuchten 土壤水力特征方程和水力传导度方程[10]:

$$\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m}, h\leqslant 0 \quad (6)$$

$$\theta(h)=\theta_s, h\geqslant 0 \quad (7)$$

$$K(\theta)=K_s\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{0.5}\left[1-\left(1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{1/m}\right)^m\right]^2, h\leqslant 0 \quad (8)$$

式中:$\theta(h)$为非饱和含水率(cm^3/cm^3);θ_s 和 θ_r 分别为土壤饱和含水率和残留含水率(cm^3/cm^3);K_s、$K(\theta)$为土壤饱和导水率和非饱和导水率(cm/s);α、m 和 n 为经验参数,其中 $m=1-1/n$。

1.4 参数反演方法

土壤水动力学参数采用 Hydrus 模型进行反演[11]。Hydrus 模型应用在反演土壤水力参数的研究[12-13]有不少报道。其土壤水力参数反演模块(inverse solution)的原理是通过最小化实测值和预测值之间的误差来优化参数[11],目标函数为:

$$OF(b)=\sum_{j=1}^{N}\{v_i\sum_{i=1}^{M}w_{i,j}[O_j(x,z,t_i)-S_j(x,z,t_i,b)]^2\} \quad (9)$$

式中:O_j 和 S_j 分别为参考量(如累积入渗量)在 t_i 时刻的实测值和模拟值; N 为变量数;M 为各变量数据数;b 为不同变量的优化参数(Optimized parameters);v_j 和 $w_{i,j}$为不同变量间的权重。以累积入渗通量为参考量,$w_{i,j}$取值为 1,而 N、v_j 和 b 均为默认[11]。

先用 GEOMETRY 模块绘制模拟区域(图 1),并用 MESHGEN2D 进行有限元离散。离散主要原则为"上层单元密,下层单元疏,入渗边界(单环)格外加密"。如此,模拟区节点(nodes)总数为 3 048,分布见图 1。由于土壤饱和含水率已由试验确定,残留含水率均设置为 0.05 cm^3/cm^3。因此,所需反演的参数为 K_s、α 和 n。此外,反演模型以 s 为基本时间单位,土壤含水量的迭代精度为 0.000 01 cm^3/cm^3,压力水头的迭代精度为 0.001 cm。

反演过程中,首先基于底层(>30 cm)累积入渗量反演底层土壤参数。在此步骤中,认为模拟区土壤为均质(即只有 1 层土壤)(图 1a)。其次,以亚表层(10—30 cm)累积入渗量反演亚表层参数。此时,模拟区分为 2 层土壤(图 1b),且底层土壤水动力学参数已由第 1 步得出,且作为已知量输入。再次,基于表层累积入渗量反演表层参数。同理,此时模拟区分为 3 层(图 1c),而亚表层和底层土壤水动力学参数已由第 1 步和第 2 步得出并作为已知量输入。如此,则综合考虑了下层土壤水动力学性质对上层土壤水分运动的影响。

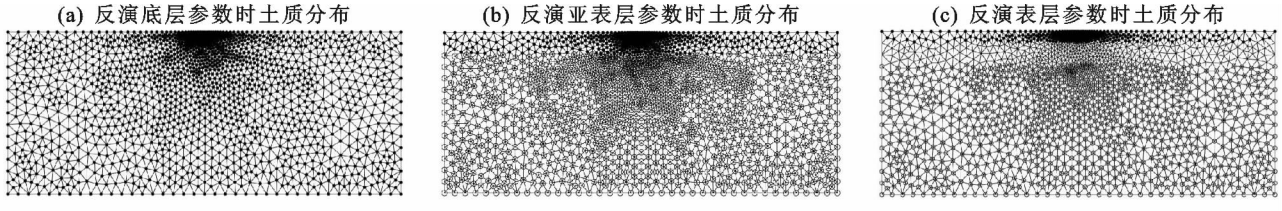


图 1 模拟区域和离散化

1.5 数据分析

本文依据 θ_s、K_s、α 和 n 来探讨退耕对土壤水动力学性质的影响。其中数据处理、方差分析、多重比较分析和作图等采用 Matlab 2016a 和 Excel 2016 完成。同时,采用均方根误差(RMSE)和"相对均方根误差(RRMSE)"来评估模拟精度:

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{j}^{m}(S_i-O_i)^2}{M}} \quad (10)$$

$$\text{RRMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{j}^{m}(S_i-O_i)^2}{M}}/\overline{O}\times 100\% \quad (11)$$

式中:O_i 和 S_i 分别表示累积入渗通量在 t_i 时刻的实测值和模拟值;M 实测值个数;$\overline{O}$ 为观测值平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

由表 1 可知,供试土壤均属粉砂壤土,不同用地类型土壤理化性质基本无显著差异($P>0.05$)。其中,土壤容重范围为 1.39~1.55 g/cm^3,基本呈现表层和底层高,而亚表层低的规律。土壤黏粒、粉粒、沙粒含量范围分别为 15.47%~26.39%,49.98%~56.61%,16.17%~32.08%。其中黏粒和粉粒含量依土层深度上升而上升,而沙粒含量则相反。土壤有机碳总体随土层深度上升而下降(不论用地类型),且总体有耕地(CL)>自然退耕(NR)>任豆牧草(ZN)的趋势。

2.2 土壤水力参数反演结果评估

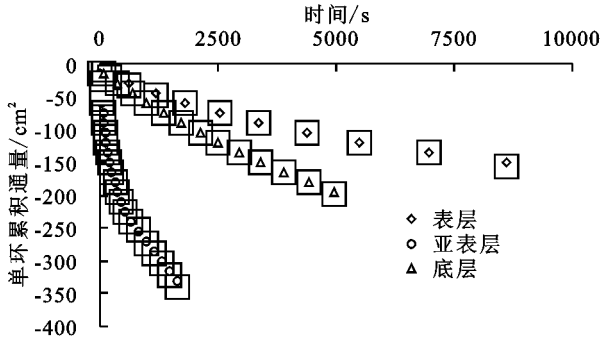
由图 2 可知,模拟值和实测值基本吻合。其中,表层、亚表层和底层的均方根误差(RMSE)分别

为 2.7,1.08,1.3 cm^2,相对均方根误差(RRMSE)分别为3.2%,4.2%,1.2%。统计表明,所有样点(n=27)的 RMSE 平均为(3.8±4.1) cm^2,RRMSE 平均为 3.8%。

表 1　不同植被类型土壤理化性质

植被类型	土层深度/cm	容重/(g·cm^{-3})	机械组成/%			总有机碳/(g·kg^{-1})
			黏粒	粉粒	沙粒	
耕地(CL)	0—10(表层)	1.46±0.12a	20.67±2.94abc	51.88±0.94ab	27.45±3.26abc	12.42±2.76ac
	10—30(亚表层)	1.44±0.03a	20.65±2.85abc	49.98±0.93a	29.38±2.35ab	9.84±2.42abc
	>30(底层)	1.47±0.03a	26.39±6.03b	52.20±1.11ab	21.41±5.37abc	4.24± 0.68b
任豆牧草(ZN)	0—10(表层)	1.47±0.02a	15.47±1.66c	52.45±3.62ab	32.08±5.28b	8.11±1.38abc
	10—30(亚表层)	1.42±0.06a	17.06±2.18c	51.99±4.64ab	30.95±6.82b	6.18±2.65abc
	>30(底层)	1.49±0.04a	20.44±2.78abc	56.61±4.16ab	22.95±6.93abc	5.43±3.15bc
自然退耕(NR)	0—10(表层)	1.55±0.21a	18.20±1.81abc	51.78±1.04ab	30.02±2.85b	11.53±2.54ac
	10—30(亚表层)	1.39±0.10a	20.65±0.97abc	55.44±1.82ab	23.91±2.78abc	9.10±2.48abc
	>30(底层)	1.44±0.07a	25.54±2.13b	58.28±2.82b	16.17±0.83c	6.46±0.47abc

注:表中同列不同小写字母表示该列数据间差异显著(P<0.05)。



注:本文采用二维模型,因此图中累积入渗通量为入渗水深与单环直径的乘积(cm^2,方向为负);空心方框为模型模拟值,方框内图例为相应实测值。

图 2　耕地累积入渗通量观测值和模拟值对比

2.3　土壤水动力学性质

由图 3 可知,无论用地类型和土层,土壤水动力参数基本无显著差异(P>0.05),在垂向上,饱和含水率 θ_s 随土层深度上升而有所下降,其中 CL、ZN 和 NR 的平均 θ_s 分别为 0.40,0.40,0.39 cm^3/cm^3。参数 α 在 CL 和 NR 中随土层变化较小(分别平均为 0.84×10^{-3}(CL)和 2.48×10^{-3}(NR));在 ZN 中,表层最高(3.46×10^{-3}),亚表层和底层基本一致,分别为 0.88×10^{-3} 和 0.94×10^{-3}。CL 中参数 n 随土层深度上升而下降(分别为 5.21,3.71,3.50);ZN 中则随土层深度上升而有所上升(1.39,1.75,1.87);NR 中亚表层 n(4.05)显著高于表层(1.47)和底层(1.40)。同时,CL 中亚表层 K_s 最高(3.52×10^{-4} cm/s),底层其次(2.55×10^{-4} cm/s),表层最次(2.43×10^{-4} cm/s);ZN 和 NR 的 K_s 均随土层深度上升而有所下降,分别为 3.61×10^{-4},3.06×10^{-4},3.40×10^{-4} cm/s(ZN)以及3.69×10^{-4},3.78×10^{-4},3.09×10^{-4} cm/s(NR)。

由图 3 可知,不同用地类型间土壤饱和含水率 θ_s 相差不大。参数 a 基本表现为 CL<ZN<NR(除 ZN 表层外);参数 n 总体有 CL>NR>ZN 的趋势;而 K_s 基本为 CL<ZN<NR(ZN 亚表层除外)。相对于 CL 而言,ZN 和 NR 的表层 K_s 分别提高了 49.0%和 51.9%,底层 K_s 分别提高了 33.1%和 21.1%。

由图 4 可知,CL 表层土壤持水曲线最为平缓(相对于横坐标),而 ZN 和 NR 形似且较为陡峭。亚表层土壤持水曲线陡峭程度依次为 NR、CL 和 ZN,而底层则依次为 CL、ZN 和 NR。

3　讨 论

本文结合原位入渗和数值模拟的方法,以耕地(CL)为对照,研究了桂西北喀斯特峰丛洼地 2 种典型退耕方式(自然退耕(NR)和任豆牧草(ZN))对土壤水动力学性质的影响。结果表明,试验样点土壤质地较为均一(表 1),说明本文所得出的土壤水动力学性质的差异主要受用地类型的影响。3 种用地类型中土壤容重基本呈现表层(0—10 cm)和底层(>30 cm)高,亚表层(10—30 cm)低的特点(表 1)。这主要由于 NR 和 ZN 在退耕之前也均为耕地,表层土壤有一定压实,亚表层则在耕作的作用下较为疏松且在退耕后有一定保持。土壤有机质也是土壤水动力学性质的重要影响因素,总体上呈 CL>NR>ZN 以及随土层深度上升而下降趋势(表 1)。这与其他研究结果基本相似[5]。其中,CL 中有机肥和秸秆遗留或施加,使土壤保持有较高的有机碳含量;NR 中则有凋落物腐解对土壤有机碳进行补充;但在 ZN 中,有机肥施用水平低,不断采割造成凋落物稀少,土壤有机碳相对较低。

基于反演参数得出的累积入渗量与实测值之间较低的均方根误差((3.8±4.1) cm^2)和相对均方根误差((3.8±3.0)%)(图 2),说明反演参数能很好的表征实际情况[12]。3 种用地类型的土壤水动力学参数无显著差

异($P>0.05$),与很多研究[5]结果相似。其原因为:(1)土壤粒级组成的相似性在一定程度上限制了水动力学参数范围,如饱和导水率不可能在自然植被的作用下无限制地改变;(2)土壤空间异质性导致组内误差增大,在一定程度上掩盖了组间误差;(3)退耕还林对土壤水动力学性质的影响较为缓慢[14-15]。虽然无显著差异,但退耕对土壤水动力学性质产生了一定影响(图 3)。其中,土壤饱和导水率 K_s 基本为 CL<ZN<NR,特别是 2 种退退耕方式的表层和底层 K_s 明显高于 CL(图 3),说明退耕能够有效改善土壤导水性质[5,16]。分析其原因,应是由于 ZN 和 NR 均为草本和木本植物的组合,发达的根系可以影响到较深土层[17]。

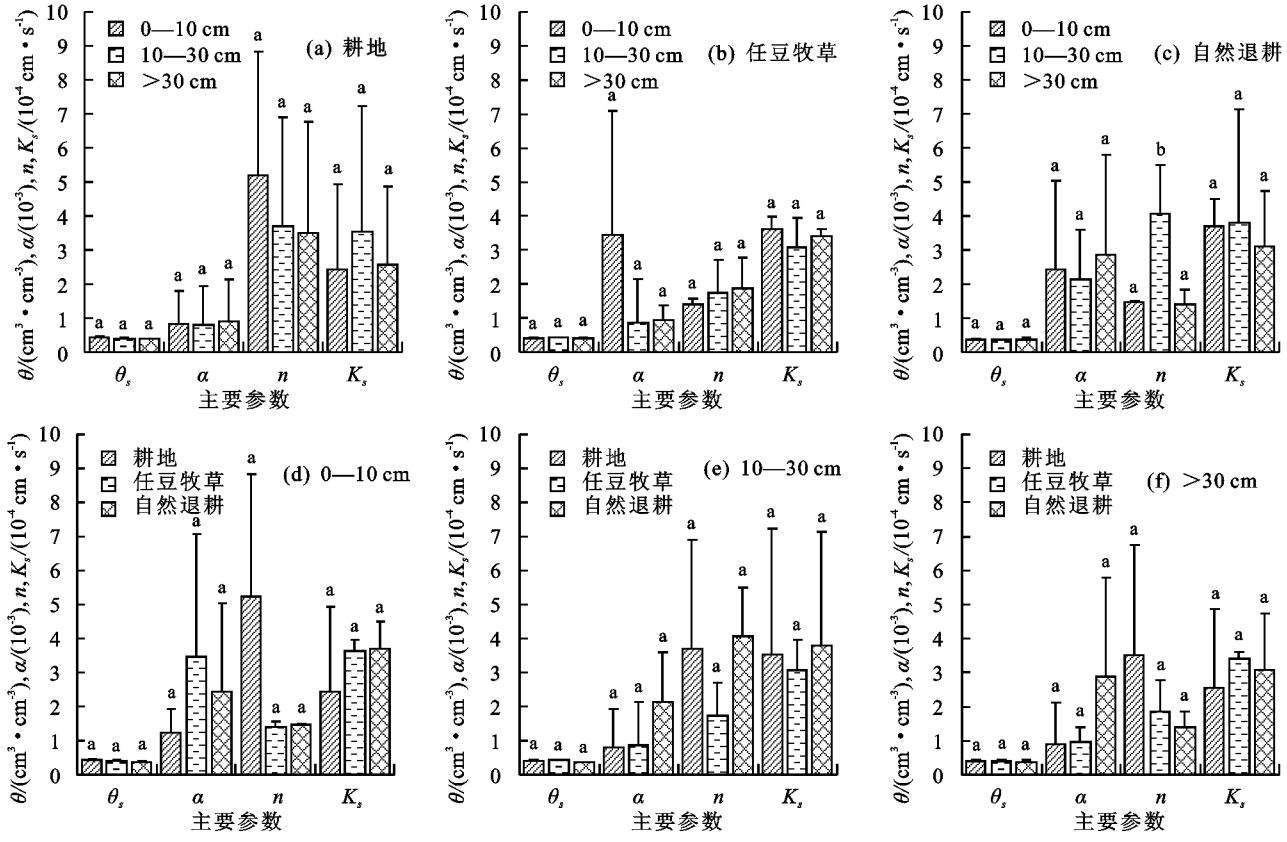


图 3 不同用地类型主要土壤水动力参数

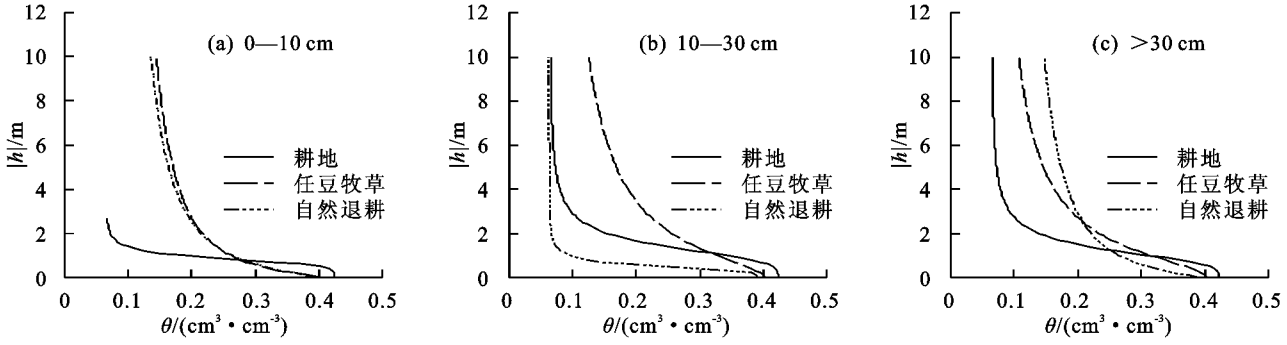


图 4 不同用地类型土壤水分特征曲线

参数 a 和 n 与土壤保水功能密切相关。数据显示,持水曲线的陡峭程度在表层土壤中依次为 ZN、NR 和 CL,亚表层依次为 NR、CL 和 ZN,底层则依次为 CL、ZN 和 NR(图 4)。平缓的土壤持水曲线说明土壤水分更容易被植物吸收或通过地表蒸发散失,反之亦反。由此来看,除 NR 亚表层外,2 种退耕地的土壤保水性总体优于 CL[18]。其中 NR 亚表层的反常现象,应与土壤容重有关。NR 中亚表层土壤容重平均为 1.39 g/cm³,低于 CL(1.44 g/cm³)和 ZN (1.49 g/cm³)。鉴于土壤粒级组成基本一致(表 1),低容重说明土壤矿质填充物较少而非毛细孔隙较多,导致保水性降低。

从以上结果来看,CL 中表层土壤导水性相对较低,容易出现地表径流而导致土壤侵蚀;而亚表层导水性明显高于底层,入渗水分也容易以壤中流的形式流失,难以下渗至更深土层。同时,CL 表层土壤保水功能较低,土壤水分容易随地表蒸发损失。相对而言,ZN 和 NR 2 种退耕方式对土壤导水和保水性能

均有一定改善,特别是对于表层和底层土壤。其中,垂向上导水性质的改善,使得水分更容易渗入较深土层;而保水性的改善,可在一定程度上缓解旱季水分亏缺。虽然 2 种退耕方式对土壤水动力学性质的改善作用无明显差异(图 3、图 4),但综合社会经济因素(任豆牧草均可作为饲料),ZN 的退耕方式相对更为可取。

4　结 论

退耕 10 年后,2 种退耕地(自然退耕 NR,任豆牧草 ZN)的土壤容重、土壤有机碳、饱和导水率 、持水参数 、以及 与 CL 相比均无显著差异($P>0.05$)。2 种退耕方式对土壤导水性和保水性均有一定改善作用。θ_s、α 和 n 分别呈现 CL<ZN<NR、CL<ZN<NR 以及 CL>NR>ZN 的规律。退耕对表层和底层土壤水动力学性质影响较大,与 CL 相比,退耕地表层 K_s 分别提高了 49.0%(ZN)和 51.9%(NR),底层 K_s 则分别提高了 33.1%(ZN)和 21.1%(NR)。垂向上土壤导水性的改善,使得水分更容易渗入较深土层;而土壤保水性的改善,可在一定程度上缓解旱季土壤水分亏缺。

参考文献:

[1] 袁道先.我国西南岩溶石山的环境地质问题[J].大自然探索,1996,15(4):21-23.

[2] Chen X, Zhang Z C, Chen X H, et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(4): 811-820.

[3] 王轶浩,王彦辉,谢双喜,等.六盘山小流域地形、植被特征与土壤水文物理性质的关系[J].生态学杂志,2012,31(1):145-151.

[4] Chen H S, Liu J W, Zhang W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1): 371-379.

[5] Yang J, Xu X L, Liu M X, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 247: 120-129.

[6] 苏广实,王世杰,胡宝清,等.喀斯特小流域不同土地利用方式对土壤物理性状和微生物的影响:以广西都安澄江小流域为例[J].地球与环境,2013,41(1):29-36.

[7] Fu T G, Chen H S, Zhang W, et al. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in a small karst catchment in Southwest China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3), DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-015-4320-1.

[8] Yang J, Xu X L, Liu M X, et al. Effects of Napier grass management on soil hydrologic functions in a karst landscape, southwestern China [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 157: 83-92.

[9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2007.

[10] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[11] Šimůnek J, van Genuchten M T, Šejna M. The HYDRUS software package for simulating two- and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media (Version 1.0) [R]. Prague: PC Progress, 2006.

[12] Mashayekhi P, Ghorbani-Dashtaki S, Mosaddeghi M R, et al. Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double-ring infiltrometer data using HYDRUS-2D/3D [J]. International Agrophysics, 2016, 30(2): 203-210.

[13] 张吉孝,张新民,刘久如,等.用 HYDRUS-2D 和 RETC 数值模型反推土壤水力参数的特点分析[J].甘肃农业大学学报,2013,48(5):161-166.

[14] Zimmermann B, Elsenbeer H. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1/2): 78-95.

[15] Zimmermann B, Papritz A, Elsenbeer H. Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest-pasture-forest transitions [J]. Geoderma, 2010, 159(1/2): 209-215.

[16] 张勇,王晶晶,李玉辉.云南石林景区恢复植被的土壤水文结构功能研究[J].中国岩溶,2009,28(3):293-299.

[17] 李民义,张建军,王春香,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):125-131.

[18] 黄承标,李保平,赖家业,等.桂西北主要退耕还林模式土壤水文:物理性质研究[J].水土保持通报,2006,29(3):108-113.