

红河干旱河谷区典型地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响

陈婷婷¹, 段旭^{1,2}, 赵洋毅^{1,2}, 冷鹏³, 邵一敏¹, 杜云祥⁴

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224;

2.国家林业和草原局 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224;

3.云南省水土保持生态环境监测总站, 昆明 650106; 4.新平彝族傣族自治县水利局, 云南 新平 653400)

摘 要:为探明植物根系特征对土壤大孔隙的影响,以红河干旱河谷典型地段玉溪新平县龙潭箐小流域内林地、荒草地、园地和农地 4 种地类下植物根系和土壤为研究对象,基于水分穿透曲线法和经典统计分析,定量分析了植物根系特征对土壤大孔隙形成的影响。结果表明:(1) 4 种地类土壤水分穿透曲线的稳定出流速率表现为林地>园地>荒草地>农地,各地类间显著差异($p<0.05$),土壤每层水分穿透曲线发展趋向一致,均为先增加后趋于稳定,表层出流速率均大于深层;(2) 4 种地类土壤大孔隙当量半径在 0.3~3.7 mm 范围内,其中,0.3~1.0 mm 的密度最大,占大孔隙总数量的 96% 以上,大于 1.0 mm 的密度最小,只占小于大孔隙总数的 4%;大孔隙密度为 $1.383 \times 10^4 \sim 2.477 \times 10^4$ 个/ m^2 ,4 种地类中大孔隙密度均随着土层深度的增加而逐渐减少,整体趋势表现为林地>园地>荒草地>农地;(3) 随着土层深度的递增 4 种地类样地中植物根长密度及根重密度都表现为减小的趋势;细根系(根径 $d<1$ mm)对土壤大孔隙的形成有高贡献度,而相对较粗的根系(根径 $d>1$ mm)对土壤大孔隙的产生贡献度较低;(4) 农地、园地与林地土壤大孔隙率和 $0<d\leq 5$ mm 根径范围内的根重密度相关性极显著($p<0.01$);荒草地则是跟 $3<d\leq 5$ mm 根径范围内的根重密度显著相关($p<0.05$)。细根系显著影响土壤大孔隙的形成,而粗根系的影响较低。

关键词:土壤大孔隙;水分穿透曲线;根长密度;根重密度;干旱河谷

中图分类号:S152.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0107-09

Effects of Root Characteristics of Typical Native Plants on Soil Macropore in the Arid Valley of Honghe River

CHEN Tingting¹, DUAN Xu^{1,2}, ZHAO Yangyi^{1,2}, LENG Peng³, SHAO Yimin¹, DU Yunxiang⁴

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224,

China; 3.Yunnan Provincial Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station, Kunming 650106,

China; 4.Xinping Yi and Dai Autonomous County Water Resources Bureau, Xinping, Yunnan 653400, China)

Abstract: In order to investigate the effect of plant root system characteristics on soil macropores, based on the water penetration curve method and classical statistical analysis, quantitative analysis of plants in the forest land, grassland, garden land and agricultural land in the Longtanqing small watershed of Xinping County, Yuxi City was carried out. The effects of plant root characteristics on the formation of soil macropores were quantitatively analyzed. The results show that: (1) the stable outflow rate of soil water penetration curves of four land plots decrease in the order: forest land>garden>wasteland>farmland, and there are significant differences among different types ($p<0.05$); the overall development trend of the curve is consistent, all increase first, and then tend to be stable after a period of time; the surface outflow rate is greater than the deep layer; (2) the equivalent pore diameter of the four types of soil macropores is between 0.3~3.7 mm, of which the density of 0.3~1.0 mm is the largest, accounting for more than 96% of the total

收稿日期:2019-11-20

修回日期:2019-12-23

资助项目:国家自然科学基金(31860235,31560233);云南省重点研发计划项目(2018BB018);云南省教育厅研究生资助项目(2019Y0139);国家林草局林业科技创新平台运行补助项目(2019132161);云南省自然生态监测网络项目(2019-YN-13)

第一作者:陈婷婷(1995—),女,重庆人,在读硕士,研究方向为水土保持。E-mail:763689132@qq.com

通信作者:段旭(1983—),女,山西沁源人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事森林水文研究。E-mail:feixue20012360@163.com

number of large pores, the density greater than 1.0 mm is the smallest, accounts for only 2%~4% of the total number of large pores; the large pore density is $1.383 \times 10^4 \sim 2.477 \times 10^4$ per square meter, the macropore densities in the four types of land decrease gradually with the increase of the depth of the soil layer. The overall trend follows the order: forest land > garden land > wasteland > farmland; (3) both root length density and root weight density show the decreasing trend with the increase of soil depth; the fine root system (root diameter $d < 1$ mm) has the high contribution to the formation of soil macropores, while the relatively thick root system (root diameter $d > 1$ mm) has the lower contribution to the formation of large pores in the soil; (4) the correlation between the soil macropores of the agricultural land, garden land and forest land and the root weight density within the root diameter range of $0 < d \leq 5$ mm is extremely significant ($p < 0.01$); the desert grassland is within the root diameter range of $3 < d \leq 5$ mm, the root weight density is significantly correlated ($p < 0.05$); the fine root system significantly affects the formation of large pores in the soil, while the coarse root system has the lower effect.

Keywords: soil macropore; water penetration curve; root length density; root weight density; dry valley

干旱河谷地区气候炎热,降雨不均且蒸发量巨大,水土流失严重,水资源利用难度大,属于我国典型的生态脆弱区^[1-3]。土壤中大孔隙作为土壤水分运移和径流过程的重要影响因素,在区域水资源管理中发挥重要作用^[2-3]。土壤中的植物根系、动物、微生物、水分及人为扰动是导致土壤大孔隙形成的主要因素^[4]。研究探明,土壤大孔隙构造直接造成土壤水的运移途径和形式,确定了土壤的保水性、浸透性及导水性等水利特征^[5-6],是影响壤中流及溶质运动的首要影响要素^[5-7]。就此,研究相对缺水的干旱河谷区的土壤大孔隙特征具有刻不容缓的科学价值。

目前,土壤大孔隙的探究主要针对土壤大孔隙的空间结构布局特征以及影响因子等方面,最常用的研究方法有扫描法^[6]、染色示踪法^[8]、树脂填充法^[9]、张力渗透仪法^[10]、离子示踪法^[10-11]和水分穿透曲线法^[12]等。土壤大孔隙存在对入渗水和溶质快速传导的非均匀水流运动形式^[13],对生物的生存空间造成了严峻的影响^[13-14]。土壤质地^[15]、土壤容重^[16]、初始含水量^[7]、动物孔隙^[10]、土壤裂隙^[10]、石砾含量^[12]以及植物根系^[17]等因素共同影响大孔隙的形成,相关研究指出植物根系对土壤大孔隙的形成有密不可分的关系^[17-19]。同时大孔隙也能够提高土壤通透性,有助于植被根系生长,有利于植被生存。因此,研究根系对大孔隙的作用,能利于进一步证实土壤水分运动规律及其与植被恢复的关系,为生态环境和谐发展提出理论引导和技术支撑。

以往探究中,国内外学者对土壤大孔隙特征及其对土壤水分运动的作用展开了详细探究^[4,6-7,14],干旱河谷地区缺水严重,生态脆弱,水资源管理使用困难程度大,就此,研究该地域土壤大孔隙特征对当地的生态恢复、水资源保护具有重大启示。本文选取位于红河典型干旱河谷地区的龙潭箐小流域4种地类样

地为研究对象,基于水分穿透曲线法对4种地类下土壤的大孔隙数量和半径等特征进行定量研究,同时探究4种地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响,为干旱河谷和类似区域的水资源管理、保护以及植被恢复工作提供一定的理论基础和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于云南省玉溪市新平县平甸乡龙潭箐小流域,地理坐标为东经 $101^{\circ}50' - 101^{\circ}51'$,北纬 $24^{\circ}01' - 24^{\circ}03'$ 。年平均气温 23.5°C ,极端最高气温 45.0°C 。无霜期为 248 d,干湿两季分明,年降雨量的 60% 以上主要在 7—10 月,多年平均降雨量 900 mm,冬春温和干旱多风,夏秋酷热雨多。试验区属红壤区,主要以红壤为主,易侵蚀,成土母岩以砂岩为主,以亚黏土类碎石,碎石土为主,碎石为风化砂泥岩。龙潭箐小流域内主要为常绿阔叶林,主要成林乔木树种有银合欢 [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit]、云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.)、华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 等,灌木树种有余甘子 (*Phyllanthus emblica* Linn.)、悬钩子 (*Rubus idaeus* Linn.) 等,草本植物以扭黄茅 [*Heteropogon contortus* (Linn.) P. Beauv. ex Roem. et Schult.]、龙须草 [*Eulaliopsis binata* (Retz.) C. E. Hubb.]、紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum* Spreng.) 等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 以研究区内4种典型地类农地、荒草地、园地和林地作为研究对象(表1),选取高程、坡向、坡度等要素相似性的区块,在各个地类区域内依据地形分别设置4个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 或 $10\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的固定样地,总计16块。

表 1 样地基本情况

样地 类型	地理 坐标	坡度/ (°)	坡向	坡位	海拔/ m	植被 类型	覆盖度	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤质地/%			石砾体积 含量/%
									黏粒	粉粒	砂粒	
农地	101°84′22.81″E 24°02′24.09″N	7	西北	坡上部	1216.8	玉米(<i>Zea mays</i> L.)	37	1.4	46.74	65.36	7.85	11.75
荒草地	101°84′22.71″E 24°02′23.60″N	7	东南	坡上部	1214.6	龙须草	95	1.28	49.76	61.87	8.32	6.31
园地	101°84′21.14″E 24°02′22.42″N	8	西南	坡上部	1214.5	柑橘(<i>Citrus reticulata</i>)	42	1.33	47.01	65.75	7.20	9.87
林地	101°84′22.07″E 24°01′21.51″N	8	东南	坡中部	1203.5	银合欢	85	1.07	53.81	61.68	4.45	20.56

1.2.2 水分穿透曲线试验 用专用环刀(直径 $D=7$ cm,高度 $H=5.2$ cm)分 5 层(每 10 cm 一层)采集原状土。将采集的原状土放入水里浸泡 12 h,随后在粗砂上静置 12 h 使含水量与田间含水量一致,然后用 ST-70 土壤水分渗透仪测定水分穿透曲线。通过马氏瓶控制 8 cm 水头高度,当土柱开始出流时,每隔 5 s 收集出流量,直到出流量稳定为止。水分出流速率即为区间出流量与 5 s 时间的比率。当土壤水分与田间持水量一致时,基质势 0,这时的水流出速率取决于压力水头,假设土壤孔隙形状为圆形,根据水分穿透曲线理论^[12],结合流量公式(1)和 Poiseuille 公式(2),作水分穿透曲线。

$$Q=Av=\pi r^2\tau L/t$$

(1)

$$Q=\pi r^4\Delta P/(8\eta\tau L)$$

(2)

已知任意时间水流量,结合公式(3)推算相应孔隙半径。将孔隙半径依据一定间隔划分孔隙范围,并演算其均值,利用公式(4)计算相应孔隙数量 $n^{[12]}$ 。

$$R=\tau L[8\eta/(t\Delta P)]^{\frac{1}{2}}$$

(3)

$$Q_c=nAv=n\pi r^2\tau L/t$$

(4)

式中: Q 为单位流量(cm^3/s); A 为孔隙面积(cm^2); v 为流速(cm/s); r 为孔隙半径(cm); τ 为土柱长度与水流实际路径比值,范围在 1.1~1.2,通常取 1.2; L 为土柱长度(cm); t 为开始加水计时时间(s); ΔP 为压力水头(cm); η 为水的粘滞系数 $[\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})]$; Q_c 为间隔排水量(cm^3/s); n 为大孔隙数量。

1.2.3 根系参数的测定 取环刀同时,按层分开收集所有的活根和死亡腐败根,用于研究植被根系情况。用水冲洗去除粘在根系上的泥沙,静置风干后,以根系径级为标准,分别按照直径(d): $0<d\leq 1$ mm, $1<d\leq 3$ mm, $3<d\leq 5$ mm, $5<d\leq 10$ mm 和 $d>10$ mm^[17] 这个 5 个径级分类,并计算各径级根长密度^[17]、根重密度^[17]以及贡献度^[17]。

(1) 根长密度是反映植物根系生长状况的重要参数,是指单位体积土壤空间中分布的不同径级的根系总长度状况^[17]。计算公式为:

$$q_{rl}=\sum L_r/V_{soil}$$

(5)

式中: q_{rl} 为根长密度(m/m^3); L_r 为某径级根系长度(m); V_{soil} 为土壤体积(m^3)。

(2) 植物的根重密度是指单位体积土体中植被根系生物量的情况^[17]。根重密度愈大,植被根系愈粗大,根系和土壤的接触范围就愈大、产生的缝隙就愈大,可能产生的大孔隙孔径较大^[17]。根重密度计算公式为:

$$q_{rm}=\sum M_r/V_{soil}$$

(6)

式中: q_{rm} 为根重密度(kg/m^3); M_r 为某径级根系重量(kg); V_{soil} 为土壤体积(m^3)。

(3) 贡献度是指量定全部土体内 5 种不同根径的根长密度各自跟总根长密度的比值,得到各个根径对土壤的大孔隙贡献度^[17]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分穿透曲线特征

如图 1 所示,4 种地类不同土层深度大孔隙的出流速率基本为起始时增大,到 60—80 s 时出流速率逐渐平稳,大约 100 s 时趋于平稳。不同地类中土壤水分穿透曲线有明显异同,石砾含量少的样地(农地和荒草地)的土壤出流稳定速率都较低,不同土层的出流稳定速率都小于 0.5 ml/s;而石砾含量多的样地(林地和园地)土壤出流稳定速率相对较大^[12],表现为林地>园地>荒草地>农地。同时发现,随土层深度加深,各地类土壤稳定出流速率均逐步减小,土壤稳定出流速率最大值都在 0—10 cm 土层出现。在深度为 40—50 cm 土层时平均出流稳定速率最低,4 个地类平均出流稳定速率只有 0.11 ml/s,而土层深度在 0—10 cm 时的平均稳定出流速率最高,平均达到 0.78 ml/s。这说明诸多因子造成土壤出流稳定速率的改变,或许受植被生长状况、根系对土壤结构的改善影响降低的作用^[7],从而导致土壤稳定出流速率从土壤表层向下逐步减小;同时,土壤出流稳定速率也受石砾的影响^[12],石砾含量与大孔隙协同增长,土壤稳定出流速率随之增大,所以植被根系和石砾分布共

同影响土壤稳定出流速率。

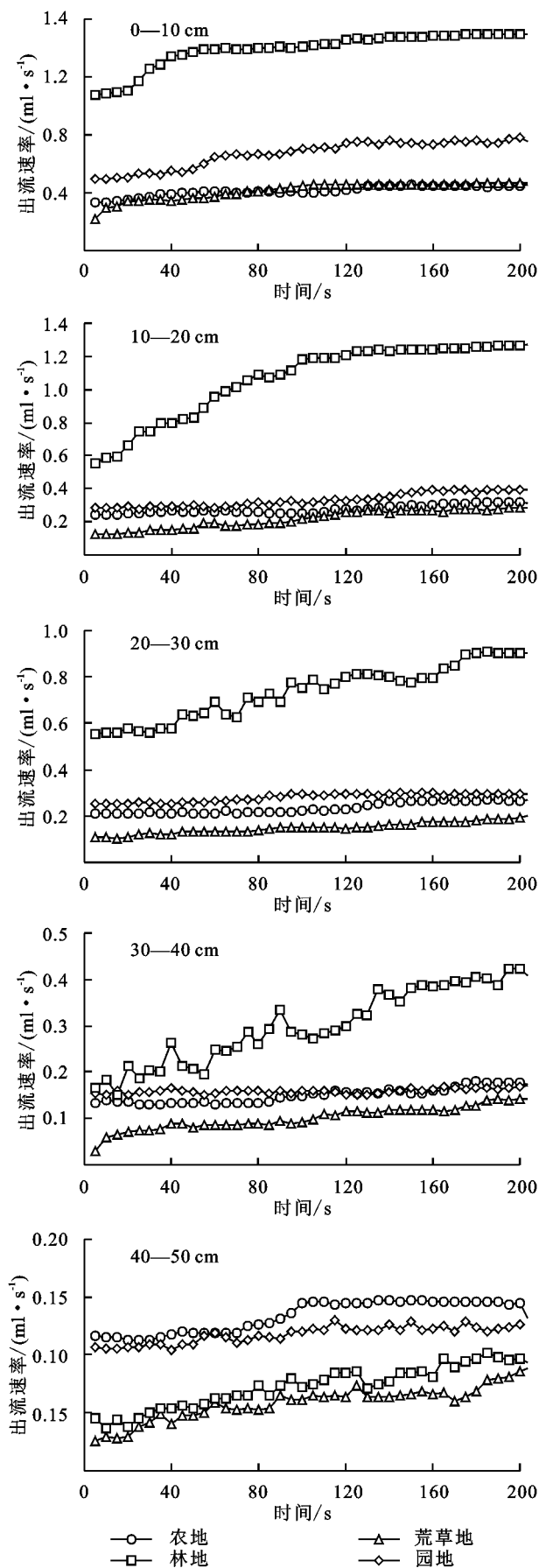


图 1 不同土层土壤水分穿透曲线

2.2 不同地类土壤的大孔隙特征

由表 2 可知,4 种地类土壤大孔隙的当量半径范围为 $0.3 \sim 3.7 \text{ mm}$,其中最小孔径 0.3 mm 和水能无限制运移孔隙半径的最低要求相同 ($d > 0.3 \text{ mm}$)^[19]。研究区内,荒草地、园地、林地 3 种地类生物行为扰动较小,土壤各发生层的土壤大孔隙密度为 $1.383 \times 10^4 \sim 2.477 \times 10^4$ 个/ m^2 ,其中园地 40—50 cm 层最小,林地 0—10 cm 层最大。3 种地类同一土层中土壤大孔隙密度之间对比:整体趋势为林地>荒草地>园地。以 0—10 cm 为例,林地最大 (2.477×10^4 个/ m^2),荒草地最小 (2.074×10^4 个/ m^2)。农地大孔隙密度均值为 9.152×10^3 个/ m^2 ,是其他 3 种地类土壤大孔隙平均密度的一半。此外,4 种样地中土壤大孔隙密度均随土层深度加深而逐步减少。同时,4 个样地中当量半径 $0.3 \sim 1.0 \text{ mm}$ 范围内的大孔隙数量最多,占大孔隙总量的 $96\% \sim 98\%$,大于 1.0 mm 的密度最小,只占小于大孔隙总数的 4% 。

林地 0—10 cm 层土壤大孔隙率最大,农地 40—50 cm 层最小。除农地外,其余几种地类(荒草地、园地、林地)的土壤大孔隙率均超过 13% 。不同地类各个土层的大孔隙率的整体趋势为:林地>园地>荒草地>农地。林地中的土壤大孔隙率较高是因为土体内植被根系分布广,石砾含量高,土壤疏松的结构,水分下浸途径多样^[14]。农地中土壤大孔隙率最小,追其原因是由于人类活动堵截了根孔、洞穴,造成了土体结构的毁坏,降低了大孔隙密度^[20]。

2.3 植物根系对大孔隙特征的影响

2.3.1 根长密度对大孔隙的影响

由图 2 可知,根长密度随土层深度加深,总体有逐渐递减的趋势,同时,土壤大孔隙率随根长密度减小表现为逐渐减小的趋势。根长密度均值随着根径、土层深度加深都出现减小的趋势,土壤表层中分布着大多数的根系^[21-22],4 种地类上均呈现 $0 < d \leq 1 \text{ mm}$ 根长密度最大,其次依次是 $1 < d \leq 3 \text{ mm}$, $3 < d \leq 5 \text{ mm}$, $5 < d \leq 10 \text{ mm}$ 根长密度最小的是 $d > 10 \text{ mm}$ 。表明细根系在土壤中占比大,随着根径加粗其根长密度也会随之减小。

由表 3 可知,农地根径 $0 < d \leq 1 \text{ mm}$ 根长密度对土壤大孔隙的贡献度是 74.9% ,根径 $1 < d \leq 3 \text{ mm}$ 的贡献度为 19.6% ,根径 $3 < d \leq 5 \text{ mm}$ 的贡献度为 5.5% ;荒草地根径 $0 < d \leq 1 \text{ mm}$ 根长密度对大孔隙形成的贡献度为 83.9% ,根径 $1 < d \leq 3 \text{ mm}$ 的贡献度为 12.9% ,根径 $3 < d \leq 5 \text{ mm}$ 的贡献度为 2.7% ,根径 $5 < d \leq 10 \text{ mm}$ 的贡献度为 0.5% ;园地根径 $0 < d \leq 1 \text{ mm}$ 根长密度对土壤大孔隙的贡献度是 58.4% ,

根径 $1 < d \leq 3$ mm 的贡献度为 33.9%,根径 $3 < d \leq 5$ mm 的贡献度为 6.6%,根径 $5 < d \leq 10$ mm 的贡献度为 1.1%;林地根径 $0 < d \leq 1$ mm 根长密度对土壤大孔隙形成的贡献度是 31.81%,根径 $1 < d \leq 3$ mm 的贡献度为 22.53%,根径 $3 < d \leq 5$ mm 的贡献度为 21.12%,根径 $5 < d \leq 10$ mm 的贡献度为 15.92%,根径 $d > 10$ mm 的贡献度为 8.63%。由此可见,不同

地类中根径为 $0 < d \leq 1$ mm 对土壤大孔隙的形成贡献度最大。说明细根系显著影响土壤大孔隙的形成,这主要是因为细根系在土壤中占比较多,对土壤大孔隙形成贡献度高。而粗根系在土壤中占比较少,并且粗根在一定程度上会破坏土壤稳定的团聚体结构,改变土壤的孔隙度,进而影响土壤大孔隙的形成,因此对土壤大孔隙的形成贡献度低。

表 2 不同地类土壤的大孔隙特征

样地类型	土层深度/cm	不同类型土壤大孔隙数量/(个·m ⁻²)				总大孔隙数/(个·m ⁻²)	大孔隙率/%
		3.7~2.0 mm	2.0~1.5 mm	1.5~1.0 mm	1.0~0.6 mm		
农地	0—10	41.36±0.50Ba	80.16±1.50Aa	192±10Ba	9940±500Ca	10254±120Ca	9.49±0.00Ca
	10—20	33.24±2.53Bb	44.39±2.02Bbc	149±31Bb	9030±870Cb	9257±900Cb	8.56±0.85Ca
	20—30	26.88±0.47Ac	37.60±0.62Dc	152±22Cab	9060±30Db	9276±60Cb	8.58±0.05Ca
	30—40	26.3±4.55Ac	60.08±11.55Aab	153±40Bab	8660±480Cbc	8899±440Cbc	8.23±0.40Ca
	40—50	19.17±0.51Ad	45.98±4.68Abc	135±2Bb	8240±60Bc	8440±70Cc	7.81±0.06Da
荒草地	0—10	24.00±2.00Da	78.00±19.00Ba	770±250Aa	1994±980Ba	20812±990Ba	19.25±0.98Ba
	10—20	7.00±1.00Cb	52.00±16.00ABb	500±150Ab	19030±520Bb	19589±20Bb	18.07±0.50Bb
	20—30	12.50±1.00Bb	53.50±0.51Cab	625±100Aab	19060±500Bb	19751±530Ab	18.27±0.51Ab
	30—40	12.50±11.00Bb	53.50±1.01Aab	395±50Abc	18660±1510Abc	19121±1500Abc	17.77±0.98Abc
	40—50	5.50±1.50Cc	25.00±14.5.00ABc	225±150Ac	18240±1000Ac	18496±1010Ac	17.11±1.01Bc
园地	0—10	27.36±1.51Ca	105.79±13.00Ba	687±53Aa	23990±3500Aa	24810±980Aa	22.88±1.51Aa
	10—20	20.79±3.00Cb	70.55±18.00ABb	563±50Ab	19980±1010Bb	20634±1150Bb	19.33±0.91Bb
	20—30	13.24±2.00Bc	64.24±10.50Abc	469±50Bc	16330±510Cc	16876±530Bc	15.81±0.89Bc
	30—40	12.92±0.02Bc	42.43±31.50Ac	179±8.7Bd	14660±10Bd	14894±510Bd	13.75±0.52Bd
	40—50	6.48±1.50BCc	40.64±2.50Bd	149±7.3ABe	13670±680ABd	13866±590Bd	13.19±0.68Cd
林地	0—10	66.50±0.33Aa	76.87±0.34Ba	812±48Aa	23930±440Aa	24885±870Aa	23.01±0.79Aa
	10—20	50.66±0.73Ab	76.28±0.40Aa	636±49Ab	22390±440Ab	23153±730Ab	21.41±0.40Ab
	20—30	29.36±0.83Ac	58.39±0.45Bb	458±34Bc	20010±440Ac	20556±470Abc	19.01±0.69Ac
	30—40	8.75±0.73Bd	53.62±0.45Ab	389±24Ad	19610±610Ac	20061±770Ac	18.55±0.54Ac
	40—50	9.22±0.54Cd	45.27±0.40ABb	232±41Ae	18640±650Ad	18926±670Ac	17.51±0.80Ad

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母代表同一地类下同一列差异显著,不同大写字母代表同一土层深度不同地类差异显著($p < 0.05$)。

表 3 典型地类不同根径根长密度贡献度 %

样地类型	根长密度贡献度				
	$d \leq 1$ mm	$1 < d \leq 3$ mm	$3 < d \leq 5$ mm	$5 < d \leq 10$ mm	$d > 10$ mm
农地	74.90	19.60	5.50	—	—
荒草地	83.90	12.90	2.70	0.50	—
园地	58.40	33.90	6.60	1.10	—
林地	31.81	22.53	21.12	15.92	8.63

注:“—”代表未发现,下表同。

2.3.2 根重密度对大孔隙的影响 如图 3 所示,不同地类不同根径的根重密度随着土层深度加深而逐步减小,其与土壤大孔隙率的发展趋势类似,见前文表 2。不同地类的植被根系均多分布于土壤表层当中,因此,表层土壤根重密度较深层土壤根重密度高。

林地各土层平均根重密度明显大于其余几种地类(农地、荒草地、园地)的平均根重密度,这可能与不同地类研究点上植被类型及覆盖度有关。同时,林地中大量的乔木植被以及较大覆盖度,使得林地根重密度大于其他样地。

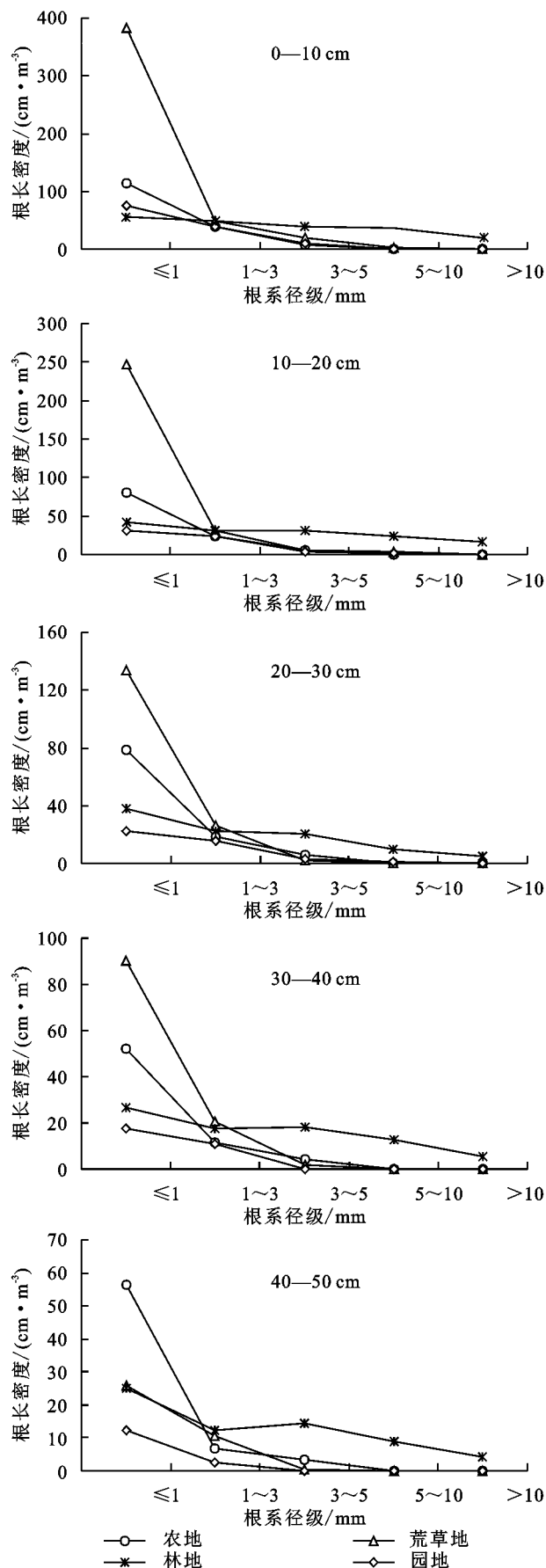


图 2 不同地类根长密度在土壤中的分布特征

随土层深度的加深,农地不同根径根重密度均逐

步减少,且未见 $d > 5$ mm 的根系,表明农地作物根径较小,农地土壤大孔隙率也较其他几种地类的小;随土层深度的加深,荒草地各根径根重密度都逐渐减少, $3 < d \leq 5$ mm 根系只在 0—30 cm 土壤层中出现, $d > 5$ mm 范围的根系各层土壤中均未出现;随着土层深度加深,园地 $d < 3$ mm 的根系根重密度逐步减少, $3 < d \leq 5$ mm 根系只在 0—30 cm 土壤层中出现,且 10—20 cm 土壤层中的根重密度大于表土层, $d > 5$ mm 范围的根系整个土体中均未出现;随着土层深度加深林地各径级根系根重密度均逐渐减少。

由表 4 可知,农地根径为 $0 < d \leq 5$ mm 的根系根重密度极显著影响土壤大孔隙率 ($p < 0.01$),未见 $d > 5$ mm 的根系,说明农地根系径级 $d \leq 5$ mm 的根系根重密度对土壤大孔隙的形成具有重要作用;荒草地根径为 $0 < d \leq 5$ mm 的根系根重密度与土壤大孔隙率均有显著相关关系 ($p < 0.05$),根径为 $5 < d \leq 10$ mm 的根重密度对土壤大孔隙率无影响 ($p > 0.05$),说明荒草地根径 $d \leq 5$ mm 的根系根重密度对土壤大孔隙的形成有影响作用,但不明显,土壤大孔隙的形成与根径为 $5 < d \leq 10$ mm 的根系无关,未见 $d > 10$ mm 的根系;园地根径为 $d \leq 1$ mm 的根系根重密度与土壤大孔隙率有显著相关关系 ($p < 0.05$), $1 < d \leq 5$ mm 径级内的根系根重密度与土壤大孔隙率有极显著相关关系 ($p < 0.01$),根径为 $5 < d \leq 10$ mm 的根系与土壤大孔隙率无相关关系 ($p > 0.05$),说明园地土壤大孔隙的形成与根径 $d \leq 5$ mm 的根系有关联关系,根径为 $5 < d \leq 10$ mm 的根系对土壤大孔隙的形成无影响作用,未见 $d > 10$ mm 的根系;林地根径为 $d \leq 1$ mm 的根系根重密度与土壤大孔隙率有显著相关关系 ($p < 0.05$),根径为 $1 < d \leq 5$ mm 的根系根重密度与土壤大孔隙率有极显著相关关系 ($p < 0.01$),根径为 $d > 5$ mm 的根系根重密度与土壤大孔隙率无相关关系 ($p > 0.05$),说明林地土壤大孔隙的形成与根径 $d \leq 5$ mm 的根系有关联关系,土壤大孔隙的形成与根径 $d > 5$ mm 的根系没有关联关系。

3 讨论

基于水分穿透曲线法对于干旱河谷地区 4 种地类土壤大孔隙的特征和分布与土体中根系特征关联开展探究。干旱河谷区土壤大孔隙的当量半径范围为 0.3~3.7 mm,其中最小孔径 0.3 mm 和水能无限制运移孔隙半径的最低要求相同 ($d > 0.3$ mm)^[19],孔径范围与 Beven^[4]、王红兰^[13]等的研究结果一致,比时忠杰等^[12]分析得到的孔径区间 0.4~2.3 mm 更宽。当量半径 0.3~1.0 mm 的孔隙数量最多,孔径 >

1.0 mm 的孔隙数小于总大孔隙数的 4.08%。各个地类土壤的大孔隙数量与大孔隙率相比较:林地>园地>荒草地>农地。此外,人类耕种活动毁坏了土壤

构造,大孔隙数量急剧减少,其在农地中仅为 9.15×10^3 个/ m^2 ,比荒草地、园地和林地的 大孔隙密度均值 1.912×10^4 个/ m^2 少一半左右。

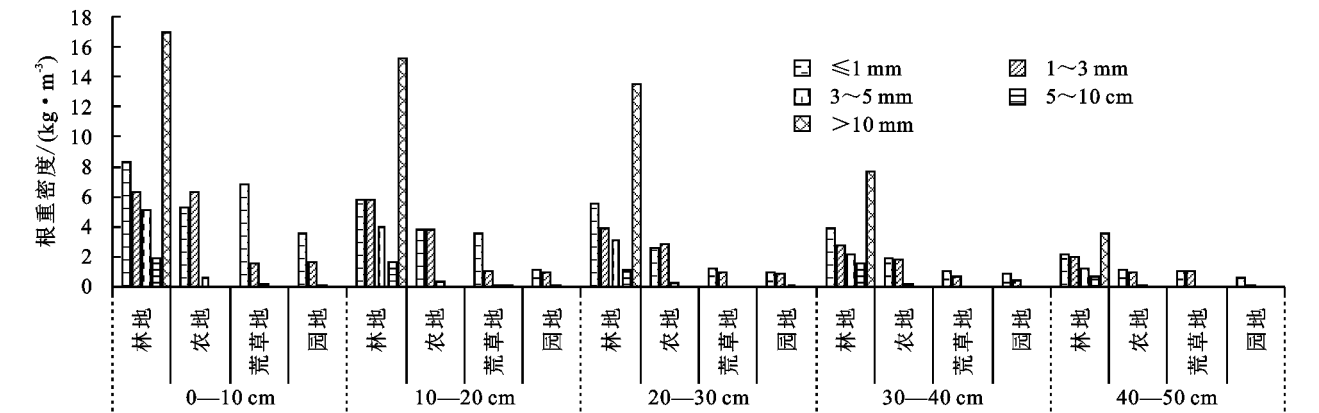


图 3 不同地类根重密度的分布

表 4 根重密度与土壤大孔隙率的相关关系

样地类型	根系径级/mm	R^2	Sig.	回归拟合方程	根重密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
农地	$0 < d \leq 1$	0.934 **	0.007	$Y = 0.358x + 7.475$	14.67
	$1 < d \leq 3$	0.962 **	0.003	$Y = 0.295x + 7.578$	15.75
	$3 < d \leq 5$	0.987 **	0.001	$Y = 3.675x + 7.366$	1.52
	$5 < d \leq 10$	—	—	—	—
	$d > 10$	—	—	—	—
荒草地	$0 < d \leq 1$	0.984 *	0.016	$Y = 0.608x^2 - 2.334x + 17.77$	13.62
	$1 < d \leq 3$	0.982 *	0.018	$Y = 29.822x^2 - 49.018x + 35$	5.21
	$3 < d \leq 5$	0.986 *	0.014	$Y = 1042.525x^2 - 122.343x + 16.38$	0.32
	$5 < d \leq 10$	0.723	0.277	$Y = -816.162x^2 + 92.99x + 17.717$	0.13
	$d > 10$	—	—	—	—
园地	$0 < d \leq 1$	0.834 *	0.03	$Y = 5.843\ln x + 16.04$	7.07
	$1 < d \leq 3$	0.939 **	0.007	$Y = 0.375x + 12.303$	4.02
	$3 < d \leq 5$	0.928 **	0.008	$Y = 3.645x + 13.48$	0.29
	$5 < d \leq 10$	0.956	0.086	$Y = 1.73x^2 + 3.271x + 12.017$	0.01
	$d > 10$	—	—	—	—
林地	$0 < d \leq 1$	0.861 *	0.023	$Y = 0.893x + 15.279$	25.67
	$1 < d \leq 3$	0.932 **	0.008	$Y = 0.062x + 15.112$	20.75
	$3 < d \leq 5$	0.941 **	0.006	$Y = 1.412x + 15.466$	15.55
	$5 < d \leq 10$	0.443	0.22	$Y = 1.119x + 12.961$	6.87
	$d > 10$	0.904	0.096	$Y = 0.041x^2 - 0.464x + 18.904$	56.86

注:**为 $p < 0.01$, *为 $p < 0.05$ 。

从本研究上看,几种不同地类的土壤水分穿透曲线呈现逐渐增大再趋于稳定的变化趋势,在 60~80 s 逐渐平稳,所有样地均在 40—50 cm 土层深度时平稳出流速率最小,4 个样地稳定出流速率均值只有 0.11 ml/s,而 0—10 cm 土层深度时的平稳出流速率最大,平均达到 0.78 ml/s。其中林地 0—10 cm 土层的稳定出流速率(1.485 ml/s)为 40—50 cm(0.085 ml/s)的 17 倍。多种因素共同影响土壤出流速率,受到土壤结构、石砾含量^[12]、植被根系^[17]、根孔^[17,23]、动物活动通道^[23-24]、人为活动(耕作)^[25]以及由于干湿交替^[26]和冻融交替^[4,26]引发的土壤裂隙等作用影响。

根系特征作为影响土壤大孔隙形成的重要因素

之一^[17],相关研究表明根系特征可以间接反映土壤内孔隙的数量、直径和大小,土壤大孔隙率随土层深度的增加呈现降低的趋势^[27],本文将不同地类植物根长密度和根重密度与土壤大孔隙率进行拟合,得到不同根径的根长密度同根重密度与土壤大孔隙率的相关关系,结果表明细根系根长密度对大孔隙形成的具有贡献度,细根系的根重密度对土壤大孔隙的形成具有显著相关性。随土层深度递增 4 种地类植物不同根径根长密度及根重密度均降低。主要原因为土壤表层中聚集着大多数根系,根系在深层土壤中占比较少。4 种地类根径 $0 < d \leq 1$ mm 根长密度对土壤大孔隙的贡献度最高;其中 $d \leq 1$ mm, $1 < d \leq 3$ mm, $3 < d \leq 5$ mm 根径范围内的

根重密度都跟土壤大孔隙率具有相关性。农地土壤大孔隙率和 $0 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根重密度具有极显著相关性 ($p < 0.01$); 荒草地则是跟 $3 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根重密度存在相关性但却不显著 ($p < 0.05$); 园地大孔隙率和 $1 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根重密度具有极显著相关性 ($p < 0.01$); 林地大孔隙率跟 $1 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根重密度具有极显著相关性 ($p < 0.01$), 与陈晓冰等^[28]的研究结果一致。但孙龙等^[29]通过研究柑橘地优先流特征表明只有 $1 < d \leq 3$ mm 根径范围内的根长密度与染色面积相关性显著, 其他径级的根系根长密度与染色面积无相关性, 与本文研究不符, 其原因除了植物根系不同外, 区域不同也是造成这种差异的原因, 干旱河谷区土壤感化严重, 土壤中石砾含量等也会对优先流的形成产生影响。另外, 本研究发现, 大于 5 mm 的根系与大孔隙率均无相关性, 此结果与董宾芳^[30]的研究成果一致, 细根系与土壤大孔隙形成的影响比粗根系更大, 细根系生长期短, 生长及腐烂后会形成更多的根孔隙通道, 促进大孔隙的形成。

土壤大孔隙与土壤优先流的形成密切相关, 用来分析干旱河谷地区土壤水分运动和溶质运移规律是合理的。土壤中大孔隙的形成与植被根系及根孔有关联。本文定量分析根系与土壤大孔隙形成的关系, 但影响土壤大孔隙形成的因子复杂多变, 今后研究土壤大孔隙的重点应放在对土壤大孔隙特征和环境因子对其影响的量化分析上, 进一步明晰土壤大孔隙的形成原理, 以期对红河干旱河谷地区水资源管理、保护以及植被恢复工作提供理论基础和科学依据。

4 结论

(1) 4 种地类样地土壤水分穿透曲线的稳定出流速率表现为林地 > 园地 > 荒草地 > 农地, 各地类间存在显著差异 ($p < 0.05$), 土壤各层水分穿透曲线总体发展趋向一致, 均为先增加, 一段时间后趋于稳定的规律, 表层出流速率均大于深层。因此, 不同地类并不能控制土壤水分运移的整体发展规律, 但影响水分稳定出流速率。

(2) 4 种地类土壤大孔隙的当量半径在 0.3~3.7 mm 范围内, 其中, 0.3~1.0 mm 的密度最大, 占大孔隙总数量的 96% 以上, 大于 1.0 mm 的密度最小, 只占小于大孔隙总数的 4%; 大孔隙密度为 $1.383 \times 10^4 \sim 2.477 \times 10^4$ 个/ m^2 , 4 种地类中大孔隙密度与大孔隙率都随着土层深度的增加而逐渐降低, 整体趋势表现为林地 > 园地 > 荒草地 > 农地。

(3) 4 种地类样地中植物根长密度和根重密度

都随着土层深度的递增表现为减小的趋向; 细根系 (根径 $d < 1$ mm) 对土壤大孔隙的形成有高贡献度, 而相对较粗的根系 (根径 $d > 1$ mm) 对土壤大孔隙的形成贡献度较低。

(4) 根径范围 $d \leq 1$ mm, $1 < d \leq 3$ mm, 和 $3 < d \leq 5$ mm 的根重密度均与土壤大孔隙率具有相关性, 其中, 农地土壤大孔隙率和 $0 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根重密度具有极显著相关性 ($p < 0.01$); 荒草地则是跟 $3 < d \leq 5$ mm 根径范围内的根长密度存在相关关系但却不显著 ($p < 0.05$); 园地和 $1 < d \leq 5$ mm 根径范围中的根重密度相关性极显著 ($p < 0.01$); 林地跟 $1 < d \leq 5$ mm 根径区间中的根重密度相关性极显著 ($p < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 余娇娥, 司宏敏, 吴雪涛, 等. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2017-2022.
- [2] 刘运通, 金艳强, 李敬, 等. 元江干热河谷土壤温湿度变化及其对干旱的响应[J]. 山地学报, 2017, 35(6): 790-798.
- [3] 郝雅婕, 邓巧玲, 王艳霞, 等. 元江干热河谷稀树灌丛土壤热通量特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 23-28.
- [4] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [5] Wang J M, Qian Q, Guo L L, et al. Multi-fractal characteristics of three-dimensional distribution of reconstructed soil pores at opencast coal-mine dump based on high-precision CT scanning [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 182: 144-152.
- [6] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 115-122.
- [7] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [8] 陈晓冰, 程金花, 陈引珍, 等. 基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 174-186.
- [9] Kim Y, Steenhuis T S, Nam K. Movement of heavy metals in soil through preferential flow paths under different rainfall intensities[J]. 2008, 36(12): 984-989.
- [10] 吕文星. 三峡库区 3 种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [11] 刘晓艳, 陈建生, 孙晓旭. 采用氯离子示踪法计算沙漠降雨入渗量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 146-149.
- [12] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4929-4939.
- [13] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 167-174.
- [14] 盛丰, 张利勇, 吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术

- 的研究进展[J].农业工程学报,2016,32(6):1-10.
- [15] Adolwa I S, Schwarze S, Buerkert A. Impacts of integrated soil fertility management on yield and household income: The case of Tamale (Ghana) and Kakamega (Kenya)[J]. Ecological Economics, 2019,161:186-192.
- [16] Tian Z, Kool D, Ren T, et al. Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model[J]. Journal of Hydrology, 2019,572:719-731.
- [17] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):1788-1797.
- [18] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.露天煤矿排土场不同复垦植被土壤大孔隙特征[J].煤炭学报,2018,43(2):529-539.
- [19] Carrière S D, St-Paul N K M, Cakpo C B, et al. The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings-Insights from isotopic tracing and leaf water potential[J]. Science of the Total Environment, 2019, 699.DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134332.
- [20] 曾强,徐则民,官琦,等.不同植被条件下斜坡土体大孔隙特征分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):3343-3352.
- [21] 燕辉,刘广全,李红生.青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化[J].应用生态学报,2010,21(11):2763-2768.
- [22] 陈硕芃,王韶仲,王政权,等.密度结构对大青川红松人工林细根生物量与根长密度的影响[J].森林工程,2013,29(4):1-7.
- [23] Green R D, Askew G P. Observations on the biological development of macropores in soils of Romney Marsh [J]. Journal of Soil Science, 1965,16(2):342-344.
- [24] Murphy C P, Banfield C F. Pore space variability in a sub-surface horizon of two soils[J]. Journal of Soil Science, 1978,29(2):156-166.
- [25] Ren L, Nest T V, Ruyschaert G, et al. Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 2019,192:76-86.
- [26] 吴国鹏,谌文武,崔凯,等.冻融和干湿作用下表生板岩的劣化行为与机制[J].中南大学学报:自然科学版,2019,50(6):1392-1402.
- [27] Bogner C, Baltasar T Y W, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering[J]. Ecological Informatics, 2013, 15:44-52.
- [28] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.
- [29] 孙龙,张洪江,程金花,等.柑橘林地优先路径分布及其影响因素[J].东北林业大学学报,2013,41(2):65-69.
- [30] 董宾芳.黄土丘陵区林地植物根系与土壤优势流关系研究[D].重庆:西南大学,2007.



(上接第 106 页)

- [9] 吕春花.黄土高原子午岭地区土壤质量对植被恢复过程的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [10] 赵清贺,徐珊珊,马丽娇,等.北江干流河岸带不同植被类型植物物种多样性分析[J].水土保持研究,2017,24(5):215-221.
- [11] 董旭杰,彭继庆,曹福祥,等.湘中、湘南石漠化地区植物多样性研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(12):102-107.
- [12] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.
- [13] 郭红艳,万龙,唐夫凯,等.岩溶石漠化区植被恢复重建技术探讨[J].中国水土保持,2016(3):34-37,73.
- [14] 肖杰,熊康宁,顾再柯,等.喀斯特石漠化治理区土壤养分综合评价与对比:以贵州朝营和顶坛小流域为例[J].水土保持研究,2018,25(2):293-299.
- [15] 熊康宁.喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究[M].北京:地质出版社,2002.
- [16] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容和规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.
- [17] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity[J]. Taxon, 1972,21(2/3):213-251.
- [18] Veech J A, Summerville K S, Crist T O, et al. The additive partitioning of species diversity: recent revival of an old idea[J]. Oikos, 2002,99(1):3-9.
- [19] Magurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement[M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988.
- [20] 杜荣骞.生物统计学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2009.
- [21] 李奇,朱建华,肖文发.生物多样性与生态系统服务:关系、权衡与管理[J].生态学报,2019,39(8):2655-2666.
- [22] 兰斯安,宋敏,曾馥平,等.木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局[J].生态学报,2016,36(22):7374-7383.
- [23] 黄宗胜,喻理飞,符裕红,等.退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征[J].土壤学报,2015,52(2):345-354.
- [24] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.