不同草本的根系分布特征及对土壤水分状况的影响

李建兴，谌 芸，何丙辉，陶 俊，李天阳

（西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆 400715）

摘 要：为明确草本植物根系对土壤水分性质的影响，以香根草〔*Vetiveria zizanioides*（Lin.）Nash〕、百喜草（*Paspalum natatum*）、狗牙根〔*Cynodon dactylon*（L.）Pers.〕和紫花苜蓿（*Medicago sativa* L.）为研究对象，用 WinRHIZO（Pro. 2004C）根系分析系统对根系进行扫描，用 SPSS 18.0 对根系、土壤物理性质指标、土壤持水量进行相关分析。结果表明，4 种草本植物的根长密度随土壤深度的增加而减小，分布规律可用指数函数来描述；香根草和紫花苜蓿的根系主要分布在 0—20 cm 土层，百喜草和狗牙根的根系则集中在 0—10 cm 土层；随土壤深度的增加，土壤的总孔隙度、非毛管孔隙、贮水能力和饱和持水量逐渐减小，土壤容重则逐渐增大；根系主要是通过 0.5 mm＜L（根系直径）≤1 mm 和 1 mm＜L≤2 mm 径级来实现对土壤水分性能的改良。

关键词：草本；根长密度；土壤物理性质；土壤持水量

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2013)01-0081-06 **中图分类号**：S152.5，S157.2

Distribution Characteristics of Different Herbs′ Root Systems and Their Effects on Soil Moisture

LI Jian-xing[1], CHEN Yun[1], HE Bing-hui[1], TAO Jun[1], LI Tian-yang[1]

(*College of Resources and Environment, and Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: To investigate the effects of herbs′ root systems on soil water properties, the root systems of vetiver〔*Vetiveria zizanioides*（Lin.）Nash〕, bahia grass（*Paspalum natatum*）, bermuda grass〔*Cynodon dactylon*（L.）Pers.〕and alfalfa（*Medicago sativa* L.）were scanned by WinRHIZO, and the correlations between these root systems and soil physical properties and soil water holding capacity were analyzed by SPSS18.0. Results showed that the root length density of herbs decreased as soil depth increased, which can be simulated by an exponential function. Roots of vetiver and alfalfa were mainly distributed in the 0—20 cm soil layer, but roots of bahia grass and bermuda grass were concentrated in the 0—10 cm soil layer. Soil porosity, non-capillary porosity, water capacity and saturated water holding capacity decreased, but soil bulk density increased as soil depth increased. The improvement of soil moisture was mainly realized by roots of diameters in the ranges of 0.5 mm＜L≤1 mm and 1 mm＜L≤2 mm (L stands for root diameter).

Keywords: herb; root length density; soil physical property; soil water holding capacity

三峡库区地处亚热带，降雨充沛，丰富的降雨不仅会引发滑坡、泥石流等地质灾害，而且对裸露边坡造成严重侵蚀，引发水土流失，对人民的生命财产构成极大的危害[1]。为防止边坡发生失稳破坏，传统上常采用土木工程措施进行防护，但绝大多数工程护坡随着时间的推移，会出现混凝土老化、钢筋锈蚀等问题，使防护效果显著降低[2]。科学研究和工程实践证明，草本植被不仅可以很大限度地截留降雨，消减雨滴侵蚀能量，降低坡面径流流速从而减轻降雨对坡面土壤的侵蚀[3]，还具有改善生态环境、减少水土流失、涵养水源等功能，所以以植被为主的生态护坡是一种经济、环保的防护措施，也是目前护坡工程研究的热点和发展方向。草本植物的根系可表征植物的水土保持性能的强弱[4]，根系在防止表土侵蚀、浅层滑坡，

收稿日期：2012-02-19 修回日期：2012-03-27

资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金“三峡库区草本植物根系的固土抗蚀效应研究”（XDJK2010C046）；国家自然科学基金“植物篱配置模式对三峡库区面源污染控制机理研究”（40971166）；国家科技支撑计划项目“坡地埂—路—沟—池工程配套技术集成示范”（2011BAD31B03）；基于产学研的生态环境类研究生创新型培养模式构建（JG2010005）；西南大学生态学重点学科“211 工程”3 期建设项目

作者简介：李建兴（1987—），男（汉族），云南省腾冲县人，硕士研究生，主要从事城市水土保持研究。E-mail：lijianxing0707@163.com。

通信作者：谌芸（1981—），女（汉族），四川省西昌市人，副教授，博士研究生，主要研究方向为水土保持及农业水利工程。E-mail：sy22478@126.com。

增加土体的抗风化吹蚀、流水冲刷和重力侵蚀等方面起着重要的作用[5-6]。前人对根系的研究主要集中在根系增强土壤抗冲性、改善土壤渗透性及增强根—土复合体抗剪强度等方面，而对根系影响土壤水分性能的研究则较少。本试验以三峡库区常用的草本护坡植物——香根草、狗牙根、紫花苜蓿和百喜草为研究对象，分析了这 4 种草本根系的分布特征及其根系对土壤水分状况的影响，以期为生态护坡中植被种类的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于重庆市北碚区歇马镇西南大学歇马实验基地(北纬 29°45′08″，东经 106°48′54″)，丘陵地貌，属亚热带季风气候，土壤为紫色土，海拔 563 m，年平均降雨量 1 100 mm，年平均气温 18.3 ℃，年日照 1 270 h。

1.2 试验设计和样品采集

在西南大学歇马实验基地选一样地建立 5 个 6 m×4 m 的小区，标为 A，B，C，D，E 区。采用当年实生苗，于 2010 年 3 月底在 A，B，C，D 各小区以株行距 30 cm×35 cm 分别栽植紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草，E 区为对照(裸露地)。栽培期间各小区进行常规管理，定期除杂草。

2011 年 8 月底幼苗长成成体植株，紫花苜蓿高 35～50 cm，盖度达 85%左右；百喜草高 10～20 cm，盖度达 80%左右；香根草高 80～110 cm，盖度达 87%左右；狗牙根高 2～10 cm 盖度达 90%左右，则在各小区进行采样。由于 4 种草本只生长了 5 个月，根系集中分布在 0—30 cm 土层[7-8]，故主要分析各草本 0—30 cm 土层根系的垂直分布特征。按照 S 型曲线，选择健壮的植株，确定采样点。去除植株的地上部分后，以植株为中心点，将环刀(内径 20 cm，高 5 cm)圆心与中心点重合，沿着植株竖直向下分别按 0—10，10—20，20—30 cm 的土层进行取样，每层 3 个重复。

1.3 土壤物理性质的测定及分析方法

样品带回实验室后，用环刀法测定土壤的容重、孔隙度、最大持水量、田间持水量等[9]物理性质。土壤的贮水能力[4]通过下式计算：

$$S=1\ 000hp$$

式中：S——土壤的贮水能力(t/hm²)；h——土层厚度(m)；p——非毛管孔隙(%)。

试验结束后，取出环刀内的土壤，置于 0.05 mm 的网筛内进行冲洗，直至洗出所有的根系。使用 WinRHIZO 根系分析系统，以 300 dpi 的扫描分辨率，按直径 $L\leqslant 0.5$ mm，$0.5\ \text{mm}<L\leqslant 1$ mm，$1\ \text{mm}<L\leqslant 2$ mm，$2\ \text{mm}<L\leqslant 5$ mm，$L>5$ mm 这 5 个径级，测定根系的根长密度参数。

所有数据采用 SPSS for Windows 18.0 进行统计和方差分析，显著性运用最小极差法分析，图表采用 Excel 2010 进行分析制作。

2 结果与分析

2.1 不同草本类型根长密度分布特征

根系的根长密度，即单位土壤体积中所含根系的长度，既能反映根系的穿插和缠绕能力，也能表征某一土壤层的根系伸展量[10]。三峡库区不同草本类型的根长密度对比显示(图 1)，在 0—10 cm 土层中，香根草的根长密度最大(5.07 cm/cm³)，紫花苜蓿(3.96 cm/cm³)、狗牙根(2.42 cm/cm³)次之，百喜草(2.06 cm/cm³)最小。在 10—20 和 20—30 cm 土层中，紫花苜蓿的根长密度最大，分别为 3.40，1.54 cm/cm³。在 0—30 cm 土层中，根系的总根长密度排序为：香根草＞紫花苜蓿＞狗牙根＞百喜草。

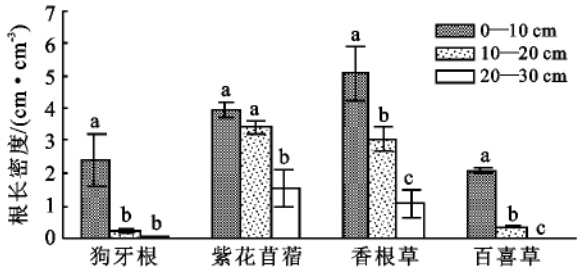


图 1 不同草本植物不同土层深度根长密度

注：不同小写字母表示 $p=0.05$ 水平不显著。下同。

从图 1 可以看出，狗牙根在 0—10 cm 土层的根长密度与其他土层之间差异性显著($p<0.05$)，但 10—20 和 20—30 cm 土层之间差异不显著。紫花苜蓿的根长密度在 0—10 和 10—20 cm 土层之间差异不显著，但分别比 20—30 cm 土层高 2.42，1.87 cm/cm³，且差异达到了显著水平。香根草和百喜草的根长密度在不同土壤层之间差异性显著($p<0.05$)。各草本类型的根系集中分布在 0—10 cm 土层，其根长密度是 10—20 cm 土层的 1.16～11.54 倍，是 20—30 cm土层的 2.57～78.96 倍。各种草本类型的根长密度随土层深度的增加均呈递减趋势，通过对根长密度与土层深度进行拟合分析，发现其遵从指数函数分布，表达式为：$y=ae^{bx}$(式中 y 为根长密度；x 为土壤深度；a，b 为方程参数)，与韩凤朋等[11]、李勇等[12]的研究结果一致。各草本拟合后的方程为：百喜草 y

$=1.442e^{-4.377x}$, $R^2=0.991$; 狗牙根 $y=1.173e^{-4.161x}$, $R^2=0.999$; 紫花苜蓿 $y=3.787e^{-8.698x}$, $R^2=0.986$; 香根草 $y=3.791e^{-7.692x}$, $R^2=0.962$。紫花苜蓿和香根草的根系垂直变化幅度小于狗牙根和百喜草。

2.2　不同径级根长密度分布特征

从表 1 可以看出,各草本类型中不同径级的根长密度差异较大,根长密度随着径级的增大依次减小,最大径级均为 $L\leqslant0.5$ mm。在 0—10 cm 土层,百喜草的不同径级根长密度差异最大,最大根长密度是最小的 13.23 倍,其他依次为紫花苜蓿 11.23 倍,香根草 8.84 倍,狗牙根 8.16 倍。在 10—20 cm 土层中,狗牙根、百喜草仅有 $L\leqslant2$ mm 的根系分布。20—30 cm土层百喜草无根系分布,而狗牙根总根长密度仅为 0.03 cm/cm^3。

各草本根系的不同径级根长密度的垂直分布均随土层深度的增加而逐渐减小。$L\leqslant0.5$ mm 径级根系:0—10 cm 土层的根长密度是 10—20 cm 土层的 1.16～9.25 倍,狗牙根差异最大,紫花苜蓿差异最小。0.5 mm$<L\leqslant1$ mm 径级根系:0—10 cm 土层的根长密度是 20—30 cm 土层的 2.62～59.89 倍,百喜草差异最大,紫花苜蓿差异最小。

表 1　各草本不同径级根长密度的垂直分布

草本类型	土层/cm	不同径级的根长密度/(cm·cm^{-3})				
		$L\leqslant0.5$ mm	0.5 mm$<L\leqslant1$ mm	1 mm$<L\leqslant2$ mm	2 mm$<L\leqslant5$ mm	$L>5$ mm
百喜草	0—10	1.17±0.61	0.41±0.01	0.24±0.02	0.16±0.03	0.09±0.04
	10—20	0.24±0.26	0.08±0.01	0.05±0.01	0	0
	20—30	0	0	0	0	0
狗牙根	0—10	0.73±0.19	0.57±0.27	0.62±0.15	0.42±0.17	0.09±0.08
	10—20	0.08±0.02	0.06±0.02	0.07±0.06	0	0
	20—30	0.01±0.01	0.01±0.01	0.01±0.01	0	0
香根草	0—10	1.73±0.77	1.05±0.11	1.20±0.26	0.89±0.45	0.20±0.05
	10—20	1.01±0.28	0.65±0.16	0.75±0.25	0.53±0.24	0.12±0.02
	20—30	0.34±0.12	0.22±0.08	0.26±0.13	0.20±0.16	0.04±0.02
紫花苜蓿	0—10	2.34±0.23	0.61±0.07	0.40±0.08	0.41±0.10	0.21±0.08
	10—20	2.01±0.22	0.52±0.04	0.34±0.05	0.35±0.07	0.18±0.07
	20—30	0.92±0.37	0.23±0.07	0.15±0.04	0.15±0.02	0.09±0.05

2.3　不同草本覆盖下土壤物理性质的变化

土壤容重是土壤物理性质的一个重要指标,反映土壤透水性、通气性,影响根系的穿插、根系生长的阻力状况,决定土壤水源涵养功能[3,13]。由图 2 可知,不同草本类型的土壤容重均随土壤深度的增加而增加,垂直分布与根长密度分布趋势相反。在 0—10,10—20,20—30 cm 土层,裸地土壤容重均为最大,在各土层之间变化幅度很小。在 0—10 土层中,4 种草本土壤容重存在显著性差异($p<0.05$),表现为百喜草>狗牙根>香根草>紫花苜蓿,其原因可能是根系分布在该层土壤差异性最大,其中紫花苜蓿和香根草表层根系最发达,在根系的作用下土壤容重分别比对照降低 10%和 9%,表层根系对容重的影响作用明显,植物根系的活动可改善土壤的通透性,降低土壤容重。在 10—20 cm 土层中,狗牙根的土壤容重与裸露地差异性不显著,狗牙根在该层仅有 $L\leqslant2$ mm 根系分布,细小根系对土壤容重存在一定的影响,由于分布较少,故效果较差。在 20—30 cm 土层中,不同草本土壤容重之间差异性不显著($p>0.05$),土壤容重变异范围在 1.50～1.62 g/cm^3,趋于稳定。以上说明根系分布越广容重越小,根系分布与土壤容重呈负相关。

不同草本类型下土壤的总孔隙度、非毛管孔隙和毛管孔隙存在差异性,在空间分布上随着土层深度的增加而逐渐减小,垂直分布与根长密度分布趋势相同。在 0—10 cm 土层中,紫花苜蓿和香根草土壤的总孔隙度、毛管孔隙差异性不显著,狗牙根与百喜草之间也表现不出差异性,但各草本与裸地之间差异性显著($p<0.05$)。4 种草本的表层土壤总孔隙度在 43.65%～29.87%变动,表现为香根草>紫花苜蓿>狗牙根>百喜草>裸露地。各草本表层土壤之间的非毛管孔隙差异性显著($p<0.05$),变异范围在 11.56%～2.83%。有研究表明[14],土壤的非毛管孔隙小于 3%根系生长受阻,对照的非毛管孔隙接近 3%,说明试验区土壤比较黏实,通透性较差。而香根草、狗牙根、紫花苜蓿的表层非毛管孔隙分别比对照增

加3.5,2.6 和 1.6 倍,不同草本类型对土壤非毛管孔隙的改良作用明显。研究表明,含根系的各草本土壤的孔隙性显著高于不含根系的裸露地,草本植物可有效地改善土壤的孔隙性,增加土壤的通气性和透水性。

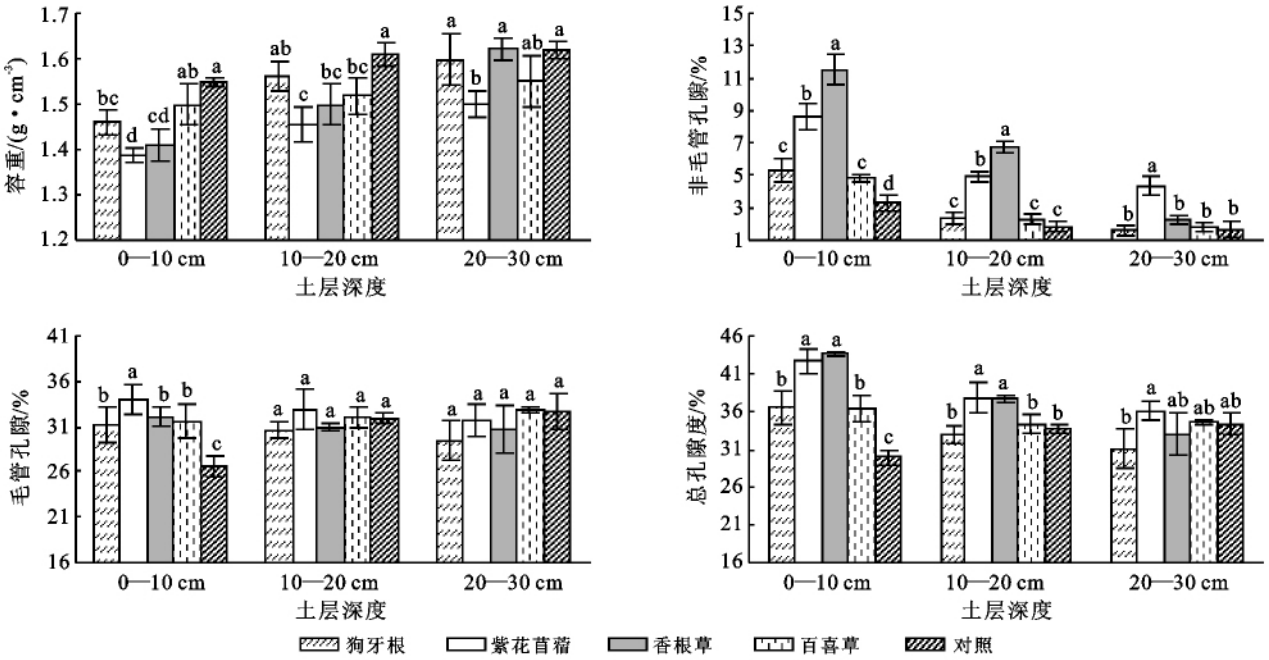


图 2 不同草本植物小区土壤容重和孔隙度的差异性比较

2.4 不同草本覆盖下土壤持水能力的变化

由图 3 可见,在 0—10 cm 土层,紫花苜蓿和香根草土壤的饱和含水量差异性也不显著,且狗牙根与百喜草之间差异性不明显,但各草本植物小区与裸地之间差异性显著($p<0.05$),其中紫花苜蓿和香根草土壤的饱和含水量显著大于狗牙根和百喜草。薛立等[15]认为土壤的饱和含水量越大涵养水源效果越好,所以在 4 种护坡草本中紫花苜蓿和香根草的涵养水源效果最好,吸收和过滤地表径流的作用强于狗牙根和百喜草;不同草本类型土壤的毛管持水量与裸地比较差异性显著($p<0.05$),表现为:紫花苜蓿>香根草>百喜草>狗牙根>裸地。由于毛管孔隙中的水分体现土壤的保水能力,紫花苜蓿在保水能力方面显著强于其他护坡草本植物,紫花苜蓿的土壤可以更好地为其根系提供必需的水分。这表明由于根系分布的差异性,造成土壤容重和孔隙性的差异,从而影响土壤持水能力的变化。

在 10—20 cm 土层,不同处理土壤的饱和含水量差异不显著($p>0.05$),表现为:紫花苜蓿>香根草>百喜草>狗牙根>裸地,说明不同草本类型根长密度在该层土壤存在一定的差异性,但对饱和含水量的影响较小;不同草本植物土壤的毛管持水量存在一定的差异性,表现为:紫花苜蓿>百喜草>香根草>狗牙根>裸地,紫花苜蓿在该层的保水能力依然显著大于其他草本植物。

在 20—30 cm 土层,由于不同草本类型的根长密度与裸地差异不明显,4 种护坡草本的饱和含水量、毛管持水量和田间持水量差异性不显著($p>0.05$),表现均为紫花苜蓿>百喜草>香根草>狗牙根。其大小变化范围为:饱和持水量在 19.48%~23.43%,毛管持水量在 18.4%~21.22%,田间持水量在 12.37%~15.45%,其中饱和含水量和毛管持水量差异不明显,原因可能是在 20—30 cm 土壤的非毛管孔隙非常小,在饱和含水量中起决定作用的主要是毛管孔隙。

为进一步比较不同种护坡草本蓄水能力的差异,引进表征土壤蓄水能力的因子——贮水能力,土壤的贮水能力主要取决于土壤的非毛管孔隙度[4]。研究结果表明,香根草、紫花苜蓿、狗牙根、百喜草和裸地的贮水能力在 0—30 cm 土层的变动范围分别为:115.6~22.13,86.63~43.33,52.9~16.00,48.3~18.03,33.0~46.67 t/hm^2,贮水能力随土层的深度增加而逐渐下降。在 0—10 cm 土层,不同护坡草本土壤的贮水能力差异性显著($p<0.05$),香根草土壤的贮水能力极显著($p<0.01$)大于其他草本,贮水能力极强,贮水能力分别是其他草本土层的 1.3,2.2 和 4 倍,表明香根草的表层土壤能够快速容纳降水并及时下渗,涵养水源效果较其他草本强。

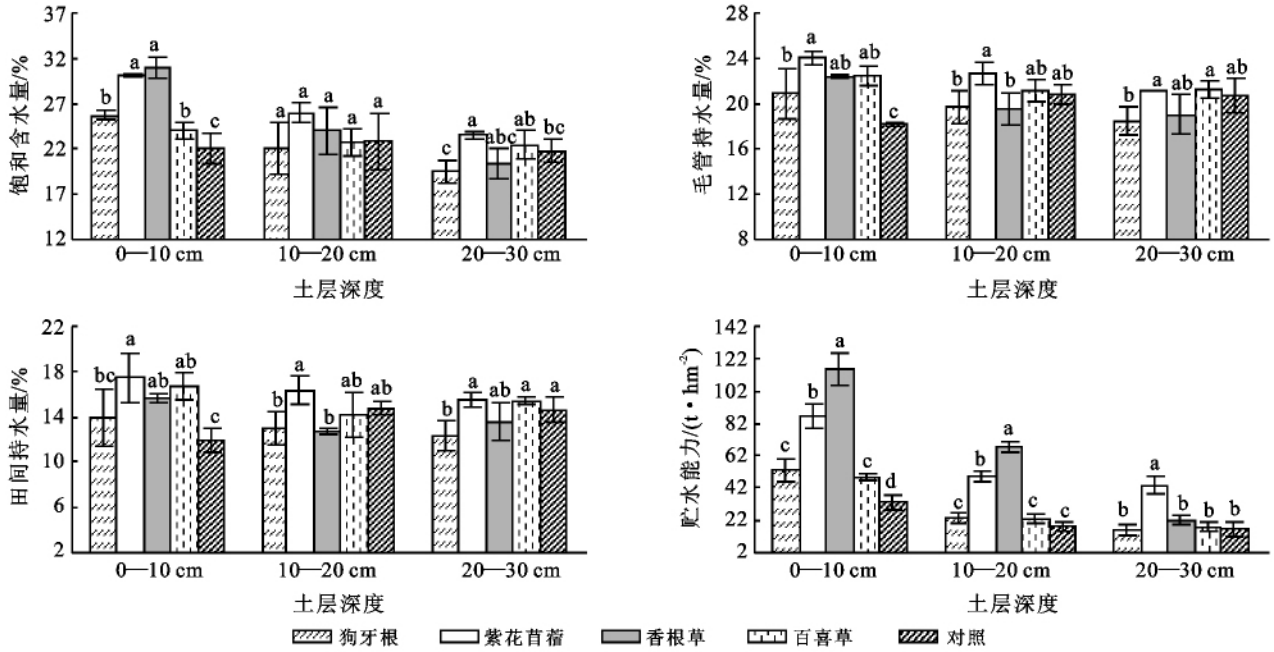


图 3　不同草本植物小区土壤持水量的差异性比较

2.5　根系特征与土壤性质相关性分析

根系一方面在土体中交错、穿插,网络固持土壤,另一方面改善土壤的物理性质,形成疏松多孔的根土复合体[5,12]。为了分析根系与土壤持水性能的相关关系,将 0—30 cm 土层根系不同径级的根长密度与土壤性质作相关性分析,如见表 2 所示。

(1) 根长密度与土层厚度显著负相关,相关系数为−0.687;土层厚度显著影响不同径级的根长密度分布,其中极显著影响 0.5 mm＜L≤1 mm 的根系,相关系数达−0.717。这说明土壤厚度显著影响不同径级的根系分布。

(2) 土壤容重与 0.5 mm＜L≤1 mm 和 1 mm＜L≤2 mm 径级的根系显著负相关,相关系数为−0.578,−0.576,土壤容重与不同径级根长密度的相关系数先减小后增大,在 0.5 mm＜L≤1 mm 出现最小值,说明 0.5 mm＜L≤2 mm 径级的根系对降低土壤容重,改善土壤孔隙性贡献最大。土壤容重与土层厚度极显著正相关,相关系数达 0.663,与非毛管孔隙、总孔隙度、毛管持水量、饱和持水量和贮水能力极显著负相关,与田间持水量显著负相关。

表 2　土壤持水性能与不同径级根长密度的相关性系数

项 目	土层厚度	根总长密度	容重	毛管孔隙	非毛管孔隙	总孔隙度	毛管持水量	田间持水量	饱和持水量	贮水能力
L≤0.5 mm	−0.621*	0.909**	−0.317	0.438	0.209	0.327	0.372	0.276	0.319	0.209
0.5 mm＜L≤1 mm	−0.717**	0.971**	−0.578*	0.362	0.691*	0.694*	0.422	0.274	0.676*	0.691*
1 mm＜L≤2 mm	−0.603*	0.863**	−0.576*	0.265	0.796**	0.745**	0.362	0.227	0.712**	0.796**
2 mm＜L≤5 mm	−0.592*	0.931**	−0.514	0.304	0.704*	0.684*	0.360	0.242	0.641*	0.704**
L＞5 mm	−0.611*	0.968**	−0.376	0.450	0.343	0.441	0.398	0.305	0.412	0.343
土层厚度	1	−0.687*	0.663**	−0.060	−0.592*	−0.494	−0.378	−0.215	−0.666**	−0.592*
根总长密度		1	−0.486	0.405	0.532	0.580*	0.413	0.286	0.557*	0.532*
容 重			1	−0.420	−0.858**	−0.863**	−0.722**	−0.569*	−0.909**	−0.858**
毛管孔隙				1	0.256	0.647**	0.895**	0.910**	0.503	0.256
非毛管孔隙					1	0.903**	0.558*	0.418	0.937**	1
总孔隙度						1	0.838**	0.735**	0.962**	0.903**
毛管持水量							1	0.955**	0.780**	0.558*
田间持水量								1	0.638*	0.419
饱和持水量									1	0.937**
贮水能力										1

注:** 表示在 0.01 水平上极显著相关;* 表示在 0.05 水平上显著相关。

(3) 土壤的总孔隙度、非毛管孔隙与 1 mm＜L≤2 mm径级的根系极显著正相关，相关系数达 0.745 和 0.796，与根长密度和 0.5 mm＜L≤1 mm 显著相关。土壤的总孔隙度、非毛管孔隙与不同径级根长密度的相关系数呈现偏峰曲线的特征，相关系数随着径级的增加先增大后减小，在 1 mm＜L≤2 mm 均出现峰值。根系的穿插、细根的死亡产生大量根孔对土壤结构的改善起到作用[16]，提高了土壤的孔隙性。土壤总孔隙度与土壤毛管持水量、田间持水量、饱和持水量和贮水能力极显著相关。土壤的毛管孔隙与根长密度、不同径级的根系相关性不明显，与毛管持水量、田间持水量极显著正相关。

(4) 土壤的饱和持水量与根长密度显著正相关，相关系数为 0.641；与土层厚度极显著负相关；与 1 mm＜L≤2 mm 径级的根系极显著正相关，与 0.5 mm＜L≤1 mm 径级的根系显著相关，相关系数随着根系径级的增加呈现先增大后减小的趋势；与总孔隙度和非毛管孔隙极显著正相关，相关系数分别为 0.962，0.937。土壤的贮水能力与根长密度显著正相关；与 1 mm＜L≤2 mm，2 mm＜L≤5 mm 径级的根系极显著正相关，与 0.5 mm＜L≤1 mm 径级的根系显著相关。土壤的毛管持水量与土壤容重极显著负相关，不同径级的根系对毛管持水量的影响不显著，但毛管持水量中部分膜状水和全部的毛管水可以完全被植物根系利用[17]。土壤的田间持水量与总孔隙度和毛管孔隙极显著正相关，相关系数分别达0.735，0.910。

3 结 论

(1) 植物根系在土壤不同深度的分布因植物种类及生存环境的变化而有所差异，本试验通过对不同护坡草本的根系研究发现，狗牙根 90%的根系分布在 0—10 cm 土层，百喜草在 0—10 cm 土层的根系占到了总根系的 82%，而紫花苜蓿和香根草的根系集中分布在 0—20 cm 土层，与张宏波、沈林洪等[7-8]的研究结果相一致。在 0—30 cm 土层，根系的根长密度随深度的增加而减小，根长密度与土层深度显著负相关，且遵从指数函数分布，0.5 mm＜L≤1 mm 的根系受土层厚度极显著影响。

(2) 不同草本类型的土壤总孔隙度、非毛管孔隙和毛管孔隙垂直分布与根系分布趋势相同，即随着土壤深度的增加逐渐减小，而土壤容重随着土壤深度的增加逐渐增大。前人的研究结果表明细根最能充分接触土壤[18]，能有效地缠绕和串联土体，故细根能显著地改变土体的理化性质，本研究发现 1 mm＜L≤2 mm径级的根系与土壤容重、土壤总孔隙度和非毛管孔隙显著相关，在根系长度相同的情况下，径级过大或者过小对土壤水分性质的改良都将减弱。不同草本根系和土壤之间是一个互相促进的过程，由于土壤本身的发育特性影响草本的根系生长，而根系的穿插、挤压反作用于土壤，二者互相促进。

(3) 各草本土壤的饱和持水量、毛管持水量和田间持水量随着土层深度的增加逐渐降低，均与根系分布趋势相同。香根草和紫花苜蓿土壤的贮水能力显著大于百喜草和狗牙根。土壤的饱和持水量与土层厚度，0.5 mm＜L≤1 mm 和 1 mm＜L≤2 mm 径级的根系显著相关，相关系数随着根系径级的增大呈现偏峰曲线特征。

[参 考 文 献]

[1] 姚裕春. 边坡开挖工程活动对环境影响研究[D]. 成都：西南交通大学，2005.

[2] 段晓明. 植被护坡研究与应用现状[J]. 中国农业通报，2007，23(3)：474-477.

[3] 巍强，张秋良，代海燕，等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报，2008，22(2)：111-115.

[4] 成向荣，黄明斌，邵明安，等. 紫花苜蓿和短花针茅根系分布与土壤水分研究[J]. 草地学报，2008，16(2)：170-175.

[5] 谌芸，祝亚军，何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J]. 水土保持学报，2010，24(6)：42-45.

[6] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境，2001，10(3)：250-252.

[7] 张宏波，姚环，林燕滨. 香根草护坡稳定性效果浅析[J]. 土工基础，2008，22(1)：52-55.

[8] 沈林洪，陈晶萍，黄炎和. 百喜草特性的研究[J]. 福建水土保持，2001，13(2)：52-56.

[9] 张万儒，许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京：中国林业出版社，1986：30-45.

[10] 徐少君，曾波，类淑桐，等. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J]. 土壤学报，2011，18(1)：160-165.

[11] 韩凤朋，郑纪勇，张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(2)：50-55.

[12] 李勇，张晴雯，李璐，等. 黄土区植物根系对营养元素在土壤剖面中迁移强度的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(4)：427-434.

[13] 王新宇，王庆成. 水曲柳落叶松人工林近自然化培育对林地土壤理化性质的影响[J]. 林业科学，2008，44(12)：21-26.

(下转第 91 页)

用来生产更多的干物质，其结果是 CO_2 浓度升高，植物 N 利用效率提高[14]。本文研究结果显示，CO_2 浓度升高条件下，小叶章茎和叶器官的氮含量均下降，植株总体固氮量增加，最大降低幅度出现的时期与地上生物量、地下生物量的快速增长相对应，即植物快速生长的同时没有同比例的增加 N 的吸收量，因而各器官 N 含量表现为降低。小叶章各器官 N 含量的降低是 CO_2 浓度升高、植株生长加快、植株增大及体内淀粉积累、稀释效应引起养分浓度降低所致。此外，研究过程中还发现 CO_2 浓度升高对小叶章茎、叶 N 含量的影响在氮素不足条件下更为显著，而当氮源充足的时候对其影响减小，这也从另一方面反映出氮素可以缓解植物对高 CO_2 浓度产生的适应现象。

[参 考 文 献]

[1] IPCC Climate Change 2001: The scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 225-237.

[2] Larios B, Aguera E, de la Haba P, et al. A short-term exposure of cucumber plants to rising atmospheric CO_2 increased leaf carbohydrate content and enhances nitrate reductase expression and activity[J]. Planta, 2001, 212(2): 305-312.

[3] Cao B, Dang Q L, Yu X G, et al. Effects of [CO_2] and nitrogen on morphological and biomass traits white birch (*Betula paotrufera*) seedlings[J]. Forest Ecology Management, 2008, 254(3): 217-224.

[4] Ma Hongliang, Zhu Jianguo, Xie Zubin, et al. Responses of rices and winter heat to free-air CO_2 enrichment (China FACE) at rice/wheat rotation system[J]. Plant and Soil, 2007,294(1):137-146.

[5] 黄建晔，董桂春，杨洪建，等. 开放式空气 CO_2 增高对水稻物质生产与分配的影响[J]. 应用生态学报，2003，14(2):253-2557.

[6] Ferrano M S, Thibaud M C, Betsche T, et al. Modulation of carbon and nitrogen metabolism, and of nitrate reductase, in untransformed *Nicotiana plumbaginifolia* during CO_2 enrichment of plants grown in pots and hydropome culture [J]. Planta, 1997(4), 202:510-521.

[7] Zerihun A, Bassiriad H. Interspecies variation in nitrogen uptake kinetic responses of temperate forest species to elevated CO_2: Potential causes and consequences [J]. Global Change Biology, 2001,7(2):211-222.

[8] 赵光影，刘景双，王洋，等. 大气 CO_2 浓度增加和氮肥施用对三江平原典型湿地植物生物量及根冠比的影响[J]. 生态与农村环境学报，2009，25(1):38-41.

[9] 郭建平，高素华. 高 CO_2 浓度和土壤干旱对贝加尔针茅 C、N 积累和分配的影响[J]. 水土保持学报，2005，19(2):118-121.

[10] Pendall E, Mosier A R, Morgan J A. Rhizodeposition stimulated by elevated CO_2 in semiarid grassland [J]. New Phytologist, 2004,162(2):447-458.

[11] Zak D R, Pregitzer K S, King J S, et al. Elevated atmospheric CO_2, fine roots and the response of soil microorganisms: A review and hypothesis[J]. New Phytology, 2000,147(1):201-222.

[12] Gebauer R L E, Ehleringer J R. Water and nitrogen uptake patterns following moisture pulses in cold desert community [J]. Ecology, 2000,81(5):1415-1424.

[13] Brooker F L. Influence of carbon dioxide enrichment, zone and nitrogen fertilization on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf and composition[J]. Plant, Cell and Enviroment, 2000,23(3):573-583.

[14] Gifford R G, Barrett D L, Lutze J L. The effects of elevated CO_2 on the C∶N and C∶P mass ratios of plant tissues [J]. Plant and Soil, 2000,224(1):1-4.

（上接第 86 页）

[14] 杨弘，李忠，裴铁璠，等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. 应用生态学报，2007，18(2):267-271.

[15] 薛立，梁丽丽，任向荣，等. 华南典型人工林的土壤物理性质及其水源涵养功能[J]. 土壤通报，2008，39(5):986-989.

[16] 周本智，张守攻，傅懋毅. 植物根系研究新技术 Minirhizotron 的起源、发展和应用[J]. 生态学杂志，2007，26(2):253-260.

[17] 杨吉华，张永涛，李红云，等. 不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报，2003，17(2):141-144.

[18] Hu Xiao-tang, Chen Hu, Wang Jing, et al. Effects of soil water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation [J]. Agricultural Sciences in China, 2009,8(6):709-716.