

河北坝上地区不同坡向植物根系分布特征研究

王诗楠, 张卓栋, 韩 玥, 贾颖芳

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要:植物的根系分布特征具有重要的生态意义,能够反映植物适应和改变环境的能力,且根系的固持水土作用明显。采用根钻法研究了河北坝上地区不同坡向植物的根系分布特征。结果表明,河北坝上地区植物的根系分布特征在不同坡向表现出明显差异。各个坡向根系生物量与土层深度的回归关系式的系数各不相同。北坡的根系生物量明显大于南坡、西坡和东坡,北坡的草原植物较之其他坡向具有更大的生长潜势,水土保持的作用也更为明显。

关键词:根系分布特征; 坡向; 根钻法; 河北坝上地区; 水土保持

中图分类号: Q944.54; Q948.114

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0152-06

Research on Root Distribution Characteristics of Vegetation on Different Slope Aspects in Bashang Region of Hebei Province

WANG Shi-nan, ZHANG Zhuo-dong, HAN Yue, JIA Ying-fang

(School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Root distribution characteristics of vegetation have a significant impact on ecological environment and reflect the vegetation ability of adapting to the environment. Root systems can also conserve the soil and water effectively. Soil drilling method was used for investigation of root distribution characteristics of vegetation on different slopes in Bashang Region, Hebei Province. The results indicate that there are obvious differences in the root distribution characteristics on different slopes. The coefficients of the regression equation of root biomass and soil depth on four slopes are different. Root biomass of the northern aspect slope is significantly larger than that of the southern, western and eastern aspect slopes. The vegetation on the northern aspect slope has greater growth potential than that on other slopes and so has stronger ability of soil and water conservation.

Key words: root distribution characteristics; slope; soil drilling method; Bashang region of Hebei Province; soil and water conservation

根系是植物重要的功能器官,具有锚定植株、吸收和运输土壤中的水分及养分、合成和贮藏营养物质等重要功能^[1]。根系具有强大的固持水土功能,根系特征是牧草水分和养分管理、刈割和放牧利用的基本依据,与土壤耕作及作物种植制度关系密切。此外,植物根系可以通过改善土壤的自然侵蚀环境提高土壤的抗侵蚀能力^[2]。因而根系的研究对于水土保持、农业生产和生态保护等领域均有重要意义。

河北坝上地区位于我国农牧交错带,是华北温带阔叶林与草原、农区和牧区的过渡带,也是内陆流域和域外流域的交接带^[3]。这种特有的生态环境,形成

了该地区层次结构简单、自我调节能力差的脆弱生态系统^[4]。在不利自然因素和人为活动的干扰下,河北坝上地区生态环境的平衡系统容易被打破,产生草地退化严重,承载力急剧下降;生态环境恶化,自然灾害频发等多种生态问题^[5]。根系的分布特征能够反映土壤的物质和能量被利用的可能性以及土地的生产力。植物根系在土壤侵蚀控制中的作用是无法替代的,是改善土壤侵蚀环境的一个最重要的因素^[6]。植物根系在改善土壤生态环境方面具有两大显著特点,即强化降水就地入渗的水文效应和创造抗冲性土体构型的机械效应^[7]。因此定量研究根系的空分布

收稿日期:2013-06-06

修回日期:2013-07-27

资助项目:国家自然科学基金项目(41301282);国家基础科学人才培养基金项目(J1103403);中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介:王诗楠(1992—),女,江苏无锡人,本科生,主要研究方向为草原生态。E-mail: wangshinan@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张卓栋(1984—),男,湖南湘潭人,博士,副教授,主要研究方向为土壤侵蚀。E-mail: zhang@bnu.edu.cn

特征对进一步研究根系分布规律及其影响机制、水土保持、充分发挥土地生产力有重要意义。河北坝上地区这种生态脆弱性和敏感性使得该地区的根系研究具有必要性。

地形是影响河北坝上地区水热分配的首要限制因子,坝上地区坡向等不同地形条件对温度、降水、蒸散等都有明显的影响,导致根系会体现一定的分异规律。前人对根系的分布特征做过很多研究,其中包括对根系的生物量等指标与土壤垂直深度关系模式的研究^[8],对根系指标与阴阳坡立地关系的研究^[9],以及对根系各指标与海拔高度因素关系的研究^[10]等。但已有的研究主要集中于根系垂直分异规律、根系指标与阴阳立地和海拔的关系等方面的研究,对生物量与4个不同坡向之间关系的研究尚少见报道。本文旨在通过野外实地调查,研究河北坝上地区东、南、西、北四个坡向植物根系的垂直分异特征,进而分析其影响因素,以期对坝上地区植物建设和生态保护提供理论依据。

1 研究区和方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省丰宁县大滩镇二道河村坝上草原地区,所在纬度为 $41^{\circ}32'07''$ — $41^{\circ}32'30''$ 、经度为 $116^{\circ}05'$ — $116^{\circ}07'$,海拔高度为1 500~1 800 m。该村年平均气温约为 0.6°C ,最热月均温为 17.5°C ,年无霜期有90~150 d,降水少且多集中在7—8月,年均降水量437 mm左右,属大陆性季风气候,年均风速为4.41 m/s,年均大风日数达150~160 d。

研究区属中国北方温带典型的农牧林交错区,雨热同期,适合较多农作物、草木的生长。丰宁大滩地区坝上草原多为草甸草原,主要植物为多年生草本植物,高度30~60 cm。沿坝一带还分布有坝上天然林和灌木林,天然林多以白桦、山杨、杏林为主;灌木林有白榆、小红柳、沙杞柳、柠条等。当地植物生长繁茂,土壤中根系复杂繁多。4个坡向样带如图1所示。

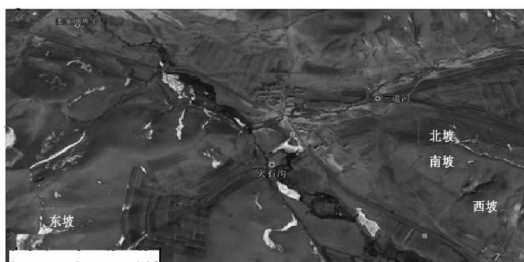


图1 研究区位置及四个坡向示意图
(影像来源:GOOGLE EARTH)

1.2 研究指标与方法

根系研究发展至今,出现了许多测定方法,如挖掘法^[11]、根钻法^[12]、根室法、土柱法等。每种方法都有其优缺点,根钻法是研究根系生物量最常用、最可靠的方法。本研究通过根钻法获取土壤样品,称量其中所含的根系生物量。所使用的根钻由荷兰Eijkelkamp公司生产,其技术参数如下:重量为27 kg,采样深度为2 m,采样类型为原状土、直径8 cm、长15 cm。另附标准配置一支复合型Edelman钻头(直径10 cm)和一支Riverside钻,两者均可用于打钻。此外,还配备有击打手柄等相关附件。

选取的研究指标为根系生物量,同一坡向上调查5~10个样点。样点的选定尽量保证从山坡的坡脚至坡顶海拔高度均匀分布,其中,南坡和北坡各10个样点,东坡和西坡各5个样点,每个样点分土层(总取样深为60 cm,前30 cm每5 cm一层,后30 cm每15 cm一层)用根钻钻取土柱。将其装入密封的塑料袋并编号,然后在室内进行洗根。用清水将其清洗干净后置于 60°C 烘箱,烘干8 h至恒重,再分别使用电子天平(0.0001 g)称重和记录。

为获取水分数据,分别在研究区东、西、南、北4个坡选取样点,用剖面环刀和洛阳铲取0—5 cm,20—25 cm,40—45 cm深度田间土样。并对环刀所取土样进行称重、吸水、再称重处理,对洛阳铲所取土样进行称重、烘干、再称重处理,即可计算各点土壤容重及含水率。

2 结果与分析

2.1 典型坡面根系的垂直分布特征

选取不同坡向共22个有效样点(有效样点是指在0—60 cm深度范围内均有数据的样点)进行作图分析。其中,由于个别样点打钻时遇到砾石,东、南、西、北4个坡的有效样点分别为9,5,4,4个(图2)。

从北坡按海拔从低到高排序第1,3,6,9共4个样点的曲线可以发现,表层土壤中的根系生物量明显高于其它层,并随土层深度的增加基本呈减少的趋势,但根系生物量在10—20 cm深度都会有一个峰值。对比第6点和第9点,发现第6点处第二层(5—10 cm)根系生物量超过第一层(0—5 cm),第9点处第三、四层(10—15 cm,15—20 cm)根系生物量远超过第二层。根系生物量随土层深度变化的规律和峰值出现的规律基本适用于各个坡向所有有效样点。从图2可以发现,表层土壤(0—10 cm)根系生物量的比重占到总生物量的一半以上,说明根系主要分布于土层较浅的地区。随着土层深度的增加,根系生物量

急剧下降,最低点多出现在 25—30 cm 深度范围之内,在 10—20 cm 深度范围内也有出现。此外,北坡、西坡和东坡大部分样点的数据显示根系生物量在土

层深度为 15—25 cm 范围内时会出现一个峰值,该峰值明显高于周围土层中的根系生物量,但远低于表层土壤的根系生物量。

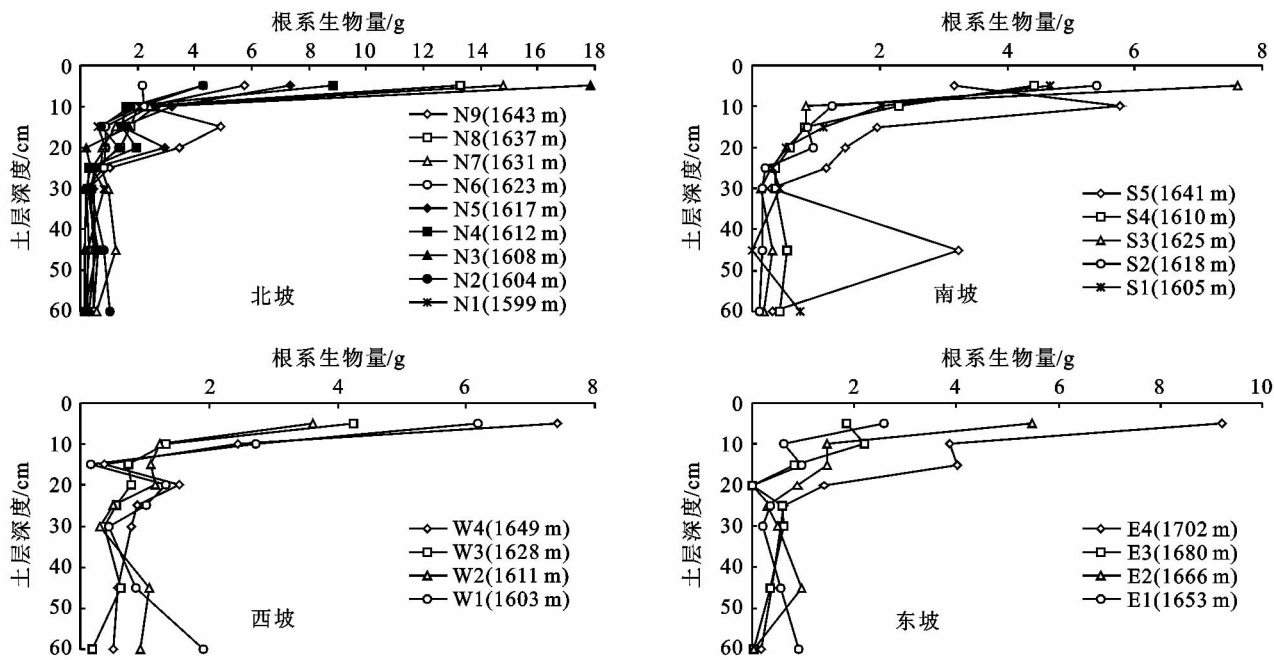


图 2 四个坡向样点根系生物量随土层深度变化图(图例中括号里内容为海拔)

对这 22 个样点在 SPSS 中进行回归分析,发现根系生物量与土壤剖面深度符合指数关系。在置信水平为 0.05 的条件下,两者的相关性十分显著,回归方程为:

$$y=12.680e^{-0.039x}$$
 (1)

式中: x ——土壤剖面深度; y ——根系生物量。从上式可以看出,随着土层深度的增加,根系生物量是减少的,其变形得到根系生物量和土壤剖面深度的关系式:

$$\ln y=2.540-0.039x$$
 (2)

从(2)式中可以发现,土壤剖面深度和根系生物量的自然对数是呈线性关系。

2.2 不同坡向根系的垂直分异规律

为了分析各个坡向根系生物量和土壤剖面深度之间关系的差异,分别对北南西东这 4 个坡向的所有有效样点进行回归分析,结果如表 1 所示

表 1 各坡向根系生物量和剖面深度回归分析结果

坡向	回归分析结果	<i>n</i>	显著性 水平 $\alpha=0.05$
北坡	$\ln y=2.814-0.037x$	9	显著
南坡	$\ln y=2.316-0.042x$	5	显著
西坡	$\ln y=2.085-0.025x$	4	显著
东坡	$\ln y=2.923-0.052x$	4	显著

从表 1 可以看出,各坡向的回归结果都为显著,

说明指数方程适用于该地区根系生物量与土层深度之间关系的计算和表达。为了进一步分析两者之间的关系,作根系生物量分配比例的垂直变化图,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以发现,在 0—20 cm 的表层土壤中,西、东、北、南坡向的根系生物量分配比例分别为 75.86%,81.27%,83.19%,83.79%,说明南坡、北坡和东坡的植物根系大多分布在较浅的土层,而西坡相较于其他三个坡向而言有更多根系分布在较深的土层。此外,在 45—60 cm 的深层土壤中,西坡的根系生物量所占比例为 7.00%,而其他三个坡向根系生物量所占的比例均小于 5%,东坡的比例仅为 3.79%,进一步说明了西坡的根系生物量分布较深,而东坡较浅。

将不同坡向各样点不同土层深度的根系生物量相加,得到样点的总根系量,再除以不同坡向有效样点的个数,得到不同坡向样点的平均根系生物量。北坡为 16.639 7g,南坡为 11.397 1 g,西坡为 11.998 7 g,东坡为 11.007 0 g。北坡根系质量明显高于其他坡向,比南坡高 46.0%,比西坡高 38.7%,比东坡高 51.2%。而南坡、东坡、西坡相对差异不大,这与实际情况结合较好。

不同坡向根系的状况还与土壤水分有密切的关系,通过环刀法测定得到不同坡向特定样点的土层含水率(表 2),结果表明北坡土壤样点平均含水率高于

南坡土壤样点。因此北坡比南坡更适合生长多种阴生植物,其实地测得的根系生物量也较高;而南坡较

不利于植物生长,大多生长较为矮小的牧草等生长周期短的植物,其根系生物量较小。

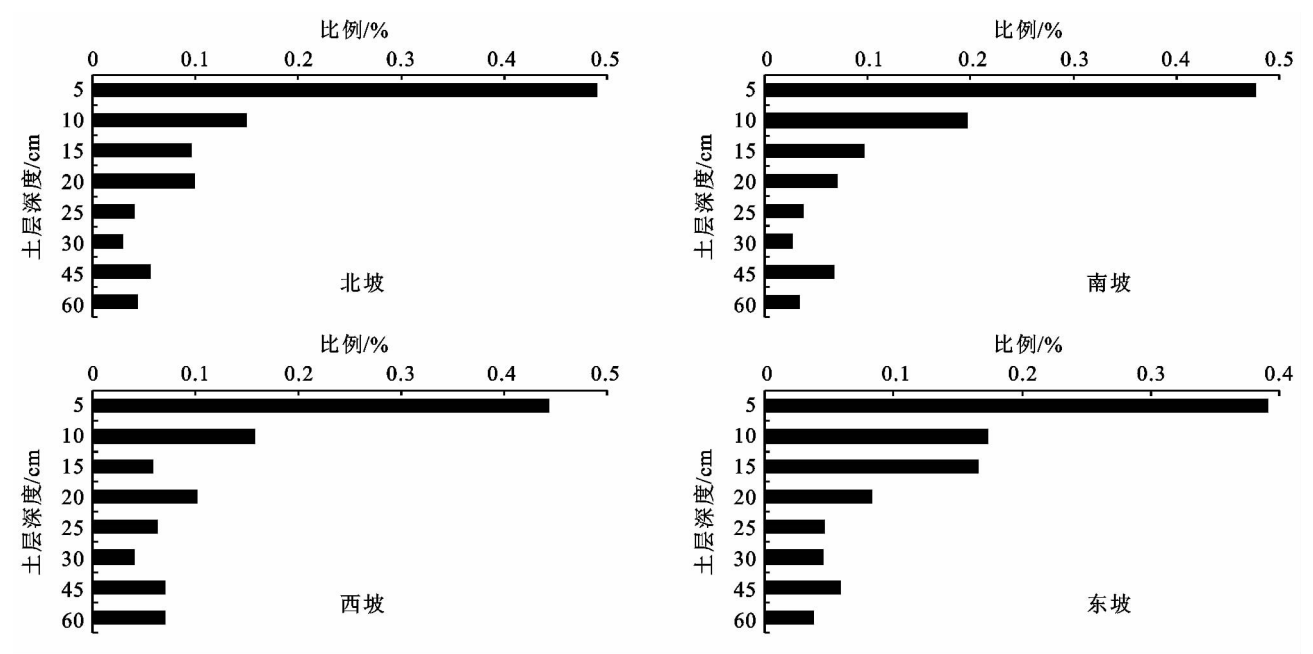


图 3 四个坡向样点根系生物量在各层中的平均分配比例

表 2 北坡和南坡土层含水率

坡向	样点海拔/ m	各土层含水率/%			各样点平均 含水率/%	各坡向样点 平均含水率/%
		0—5 cm	20—25 cm	40—45 cm		
北坡	1585	10.5297	7.2417	2.367	6.7128	11.6830
	1592	19.5402	13.1429	4.1415	12.2749	
	1601	16.8157	4.3173	2.151	7.7613	
	1612	6.8278	10.0054	5.6832	7.5055	
	1631	27.3286	10.9751	34.1772	24.1603	
南坡	1592	17.6841	237095	3.6506	15.0147	10.4824
	1599	16.9553	5.119	5.1652	9.0798	
	1608	20.0118	6.0574	5.498	10.5224	
	1616	16.9533	7.8392	4.1511	9.6479	
	1626	11.8989	5.162	5.7949	7.6186	
	1634	15.5626	6.7069	10.7636	11.0110	

3 讨论

3.1 河北坝上地区根系垂直分布特征

作物根系生物量在不同深度土层中的分布可用指数递减方程 $y=Ae^{-bx}$ 来描述。 b 为垂直递减速率, b 值越大,说明根系生物量随土层深度增加而减少的速率越大^[13]。牛海等^[14] 针对毛乌素沙地不同水分梯度地区进行了根系垂直分布规律的研究,4 个不同梯度分别位于沙丘的顶部、中坡、下坡、丘间低地。转换形式后的回归分析结果表明,根系生物量随着土壤剖面深度的加大均呈现递减的趋势,但表 1 和毛乌素沙地不同水分梯度地区作物回归方程的斜率有一定的差异,毛乌素地区作物回归方程的斜率总体上要高于表 1 中方程的斜率。这说明毛乌素地区根系重量随

土壤深度减少的速率要比河北坝上地区大,其主要原因可能为两个地区植物类型和土壤性质的差异。毛乌素地区的土壤以沙地为主,受水分影响,多浅根系植物生长,因此浅层土壤中根系较多,根系生物量随深度增加的减少速率较快;而河北坝上地区多黏土和壤土,不同土壤深度中土壤水分的变化没有在沙地中明显,因此根系生物量随深度增加的减少速率相对慢一些。

3.2 各坡向根系分布差异比较

植物根系的垂直分布与植物类型、生长时间、土壤水分、土壤养分和物理性质、地下水位等有关。无论是高草原、混合草原,还是矮草草原和荒漠草原,其地下生物量主要集中分布在 0—10 cm 的土层中。其中,土壤水分是限制植物根系生长的最主要环境因素

之一,土壤水分状况直接影响细根生物量、生长和周转^[1]。在一般情况下,南坡的水热条件较北坡好,但是由于河北坝上地区气候较为干旱,南坡光照强、土温高,其实际蒸散发量大于北坡,从而导致土壤含水量低于北坡。且从野外实际情况来看,南坡的环境比较恶劣,砾石多、植物覆盖度小,且土壤矿化严重。因此南坡土壤深度增加时根系的生物量会减少得较快,且根系生物量也会比北坡更小。

东坡样地植物较为稀少且多矮小,砾石较多,水热条件差,因此尽管其表层土壤较为肥沃,但由于根系生物量随深度增加会迅速减少,深层土壤中根系生物量较少。而西坡样地距离沟谷很近,土壤水分含量高,且光照适宜,温度适中,因而在深层土壤中会有更多根系生长,所以其垂直递减速率并不大,且平均根系生物量也是4个坡向中较大的。植物根系从水文效应和机械效应两个方面,通过提高土壤的抗冲性、抗蚀性、抗剪强度和根系网的固土功能提高土壤的抗侵蚀能力^[7]。由此来看,北坡根系生物量最大、植被盖度好,土壤侵蚀程度较低;而南坡、西坡与东坡由于根系生物量低、植被差,所以土层浅薄、土壤侵蚀相对严重、地表出露砾石明显增多。

3.3 根系生物量与土壤水分的关系

通过对比各样点附近的土壤水分数据(表2),发现含水率较高的土层中根系生物量也较多。此外,干旱胁迫会使细根向深土层发展,导致深土层细根比例相对增加。因此,引起北坡、西坡和东坡的大部分样点在土层深度为15—25 cm的范围内出现根系生物量极大值现象的可能是因为河北坝上地区深度为15—25 cm范围内的土层中水分含量较高,促进了在此范围内根系的生长。从表2中还可以看出各层土壤含水率较高的样点总根系生物量也较大。

长期以来,人们对植物根系的分布特征进行了大量的研究。但是对于不同坡向根系垂直分异规律的差异研究,仍然有待于进一步加深。在河北坝上地区,有限的土壤水分条件是生态重建的主要限制因素之一。深入探讨植物根系在不同坡向的生长情况和分布特征,并将其与当地的生态重建联系起来,对于提高当地生态系统的自我维系能力、抗干扰能力和自我恢复能力有着重要的实践意义^[8]。

3.4 植物根系的水土保持作用

土壤的抗侵蚀能力主要取决于土壤的内在特性,如土壤的孔隙状况、有机质含量、水稳性团聚体能指标^[15]。土壤这些特性的优劣,在很大程度上取决于地下植被状况,即植物根系。植物根系在稳定土壤结构,提高土壤抗冲性,防止土壤侵蚀等方面发挥着极

其重要的作用^[2],因此,根系具有极为显著的水土保持功能。查轩等^[16]的研究结果表明,地面林草植被遭到破坏和耕垦后,土壤的抗冲抗蚀性能明显减弱,侵蚀由轻微突变为强烈。

李勇等^[17]的研究指出,草类根系对土壤抗冲性具有强化效应。20 cm土层内,根系的减沙效应较强且不受坡度及雨强的影响。20 cm以下土层根系的减沙效应明显降低。本文的研究区为河北坝上草原地区,植物组成以草类植物为主。且从图3中可以看到,各个坡向根系生物量在0—20 cm土层中的分配比例均高于75%,说明坝上地区植物的根系能够明显提高土壤的抗冲性。根系生物量在0—20 cm土层中的分配比例以南坡最高,北坡略次之,东坡再次之,西坡最低,说明在同等的植被条件下,南坡对于土壤抗冲性的强化作用最为明显,西坡最不明显,北坡和东坡介于两者之间。坝上地区属农牧交错区,土壤质地为沙地的耕地和低覆盖度草地土壤侵蚀强度最高^[18]。因此,根据各坡向的水热条件,结合植物根系对土壤抗冲性的强化效应,保护和改良坝上地区的现有草场,能够显著提高该地区土壤的抗冲性,进一步降低土壤侵蚀的发生率。

4 结论

河北坝上地区土壤典型剖面根系的垂直分异特征明显,随着土层深度的增加,根系生物量呈指数减少的趋势。0—20 cm土壤层中的根系生物量占到了总生物量的75%以上,且在北坡、西坡和东坡土层深度为15—25 cm范围内会出现根系生物量的极大值。各坡向根系生物量自然对数的垂直分布规律基本符合线性方程,即 $\ln y = A - bx$,但回归方程的系数有所不同。土壤剖面中0—20 cm根系生物量分配比例以南坡和北坡最大,北坡略小于南坡,东坡次之,西坡最小。各坡向根系分布深度以西坡最深、北坡次之、东坡和南坡最浅,南坡略浅于东坡。

不同坡向根系的状况还与土壤水分有密切的关系,含水率较高的土层中根系生物量较多,各层土壤含水率均较高的样点总根系生物量也较大。由于草类植物在0—20 cm土层中根系能够有效控制土壤侵蚀,在不同坡向根系分布的差异性会对其土壤侵蚀情况产生一定影响。在同等的植被条件下,南坡的水土保持作用最为明显,北坡略次之,东坡再次之,西坡最不明显。因此,不同坡向根系的分布特征对于更有效地控制水土流失,保护和改善生态环境具有非常重要的意义。

致谢:感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院张科利教授对本研究的指导,感谢本科生方明、肖乐或、高翔在野外采样及实验过程中做出的贡献。

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.

[3] 王石英,蔡强国,吴淑安.中国北方农牧交错区研究展望[J].水土保持研究,2004,11(4):138-142.

[4] 程国栋,张志强,李锐.西部地区生态环境建设的若干问题与政策建议[J].地理科学,2000,20(6):503-510.

[5] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J].地球科学进展,2002,17(5):739-747.

[6] 毛谔,孟广涛,周跃.植物根系对土壤侵蚀控制机理的研究[J].水土保持研究,2006,13(2):241-243.

[7] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.植物根系与土壤抗冲性[J].水土保持学报,1993,7(3):11-18.

[8] 成文浩,陈林.贺兰山油松林根系空间分布特征研究[J].水土保持研究,2013,20(1):89-93.

[9] 王巧利,贾燕锋,王宁,等.黄土丘陵沟壑区自然恢复坡面植物根系的分布的特征[J].水土保持研究,2012,19

(50):16-22.

[10] 权伟,徐侠,王丰,等.武夷山不同海拔高度植被细根生物量及形态特征[J].生态学杂志,2008,27(7):1095-1103.

[11] 张小全,吴可红.森林细根生产和周转研究[J].林业科学,2001,37(3):126-135.

[12] McClaugherty C A, Aber J D, Melillo J M. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems [J]. Ecology, 1982: 1481-1490.

[13] 杨丽雯,张永清.4 种旱作谷类作物根系发育规律的研究[J].中国农业科学,2011,44(11):2245-2251.

[14] 牛海,李和平,赵萌莉等.毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):157-163.

[15] 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.

[16] 查轩,唐克丽,张科利,等.植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,1992,6(2):52-58.

[17] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.草类根系对土壤抗冲性的强化效应[J].土壤学报,1992,29(3):302-309.

[18] 王茜,王卫,吕昌河.基于 GIS 和 RS 的土地利用与土壤侵蚀关系研究:以冀北地区为例[J].中国水土保持科学,2006,4(6):37-41.

(上接第 151 页)

[28] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学:D 辑,2007,37(6):804-812.

[29] 韩冰,王效科,逯非,等.中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):612-619.

[30] 李克让.土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M].北京:气象出版社,2000.

[31] 王修兰.二氧化碳、气候变化与农业[M].北京:气象出版社,1996.

[32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1):217-232.

[33] 逯非,王效科,韩冰,等.中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J].应用生态学报,2008,19(10):2239-2250.

[34] 罗良国,近藤始彦,伊藤纯雄.日本长期不同施肥稻田 N₂O 和 CH₄ 排放特征及其环境影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3200-3206.

[35] 叶浩,濮励杰.苏州市土地利用变化对生态系统固碳能力影响研究[J].中国土地科学,2010,24(3):60-64.

[36] 李胜利,金鑫,范学珊,等.反刍动物生产与碳减排措施[J].动物营养学报,2010,22(1):2-9.

[37] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].南京:南京大学,2010.

[38] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等.江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J].资源科学,2010,32(4):768-775.

[39] 周婷婷,毛春梅.我国土地利用与碳排放的关系研究[J].安徽农业科学,2012,40(2):1175-1177,1242.

[40] 李建平,张柏,张树清.吉林省西部草地的时空变化及其驱动因素分析[J].自然资源学报,2005,20(6):830-835.

[41] 夏自兰,王继军.基于水土保持下的纸坊沟流域农业产业—资源系统耦合效应评价[J].自然资源学报,2011,26(10):1647-1657.

[42] 李惠茹.陕北县南沟流域景观格局及动态研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.

[43] 陈广生,田汉勤.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J].植物生态学报,2007,31(2):189-204.

[44] 王桂波,南灵.陕西省耕地利用碳源/汇时空差异分析[J].中国农学通报,2012,28(2):245-249.