

黄土丘陵区柠条种植带状结构对坡面土壤水分的影响

杜雨佳, 赵勇钢, 刘小芳, 张星星, 任泽莹, 贾佳瑜

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘 要:为了探明柠条种植对坡面土壤水分的影响,选择黄土丘陵区等高线带状种植 15 a, 25 a 和 35 a 柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)坡地,以撂荒草地为对照,分析了不同种植年限、坡位以及灌草部位(柠条带间、带前、带内和带后)下 0—100 cm 土层水分变化。结果表明:(1)与撂荒草地相比,柠条种植 15, 25, 35 a 后,土壤含水量分别降低了 7.76%, 44.30%, 48.42%。不同坡位的土壤含水量表现为坡顶最高,坡中和坡下次之并显著高于坡上。(2)研究区灌草部位土壤含水量在带间、带前和带内无显著差异($p > 0.05$),但均显著高于带后($p < 0.05$)。灌草部位显著差异主要出现在坡上、坡中、坡下。(3)冗余分析(RDA)结果表明:柠条种植年限对坡面尺度土壤含水量影响最大,海拔和坡度次之。变异分割分析(VPA)检测结果显示:年限、海拔、坡度对土壤含水量的解释量分别为 4.8%, 3.6%, 2.3%, 各环境因子综合效应的解释量为 65.2%。总体来看,黄土丘陵区长时间柠条种植已显著降低了坡面土壤水分含量及其异质性,年限是坡面尺度土壤含水量的主控因素,而柠条带状结构种植也对小尺度土壤水分产生了明显的影响。

关键词:黄土丘陵区; 种植年限; 柠条条带; 土壤水分

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0052-08

Effects of Strip *Caragana korshinskii* Plantation on Soil Moisture at Hillslope Scale in the Loess Hilly Region

DU Yujia, ZHAO Yonggang, LIU Xiaofang, ZHANG Xingxing, REN Zeying, JIA Jiayu

(College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: To further understand the effect of *Caragana korshinskii* plantation on soil moisture at hillslope scale in the loess hill region, the soil moisture contents were analyzed at three selected slope positions and four shrub-grass band positions (inter-band, front-band, inner-band and behind-band) under four transects: 15-, 25-, and 35-years old *Caragana korshinskii* plantations and native grassland as control. The results showed that: (1) compared with barren grassland, the soil moisture content of *Caragana korshinskii* reduced by 7.76%, 44.30% and 48.42% after 15-, 25-, and 35-years old, respectively; the soil moisture content at different slope positions was the highest on the top-slope, and the soil moisture contents of the mid-slope and lower-slope were significantly higher than that of the upper-slope; (2) there was no significant difference in soil moisture content among the inter-, front- and inner-band ($p > 0.05$), but it was significantly higher than that of behind-band ($p < 0.05$); significant differences of shrub-grass band mainly occurred in upper-, mid-, and lower-slope; (3) the redundant analysis showed that the plantation ages of *Caragana korshinskii* had the greatest effect on soil moisture content at hillslope scale, followed by altitude and slope gradient; variation partitioning analyses showed that the explanation variance of soil moisture by age, altitude and slope gradient was 4.8%, 3.6%, 2.3%, respectively, and the integrated explanation variance of all environmental factors reached to 65.2%. In general, long-time plantation of *Caragana korshinskii* in the loess hilly region significantly reduced the soil moisture content and heterogeneity along slope and depth. The plantation age and altitude were the main controlling factors at hillslope scale, while shrub-grass band also had significant impacts on soil moisture at small-scale.

收稿日期:2020-01-23

修回日期:2020-02-28

资助项目:国家自然科学基金(41401242);山西省自然科学基金(201601D021103);山西师范大学科技创新项目(2020XSY045)

第一作者:杜雨佳(1994—),女,山西太原人,硕士研究生,研究方向为水土资源高效利用。E-mail:1075975081@qq.com

通信作者:赵勇钢(1980—),男,湖南永州人,博士,副教授,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:zhaoyg@sxnu.edu.cn

Keywords: loess hilly region; plantation age; shrub-grass band; soil moisture

黄土高原地区水资源匮乏、水土流失严重、生态系统极度脆弱,是我国退耕还林(草)生态工程实施的重点区域。在植被建设途径中,通过人工林种植林草以加速植被恢复进程已成为重要措施^[1-2]。许多研究表明,人工植被恢复对于减轻水土流失、提高土壤质量、改善生态环境起到了积极的作用^[3]。其中,柠条(*Caragana korshinskii*)由于其根系发达,抗逆性强,具有很强的防风固沙及保持水土的能力,是干旱半干旱地区广泛种植的主要灌木树种之一。但一些研究表明,人工柠条长期种植可能造成土壤水分亏缺,土层干燥化并上移下延,这反过来也限制柠条的生长^[4]。张建军等^[5]研究了黄土高原不同林地对土壤水分的影响,指出人工林对土壤水分消耗较大,会形成“干化层”。郭忠升等^[6]发现5 a生柠条林的干层厚度达到柠条利用水分的警戒线。李小芳等^[7]通过EPIC模型对黄土丘陵区柠条土壤水分进行了模拟,发现柠条生长10 a后,根系下伸,土壤水分亏缺,水分生产力下降。

坡面是黄土高原地区土壤侵蚀泥沙的重要来源地,也是植被建设的主要地貌单元。坡面尺度的土壤水分受气候、植被、土壤、地形等因素的综合影响^[8-10]。梁海斌等^[9]研究了3个不同林龄柠条地土壤水分变化,得出随林龄增加土壤水分存在显著差异,且土壤干层范围不断扩大。降水在坡面的再分配使不同坡位土壤含水量不同^[11]。黄艳丽等^[12]对黄土高原小流域不同坡面土壤水分进行研究,得出坡脚土壤含水率高于坡腰,坡腰高于坡肩。董起广等^[13]对延安市黄土坡面土壤水分研究得出,随坡位下降土壤水分含量升高,下坡位比上坡位高5.33%。此外,柠条在坡面多为等高线带状种植(也称植物篱模式),相邻柠条带多以荒草地间隔,构成了灌草复合系统。袁久芹^[14]、Fan^[15]等提出带状种植柠条对防治水土流失有显著效果,通过拦截地表径流、改变土壤结构,使植被快速适应干旱环境,是防止土地退化,提高土壤生产力的理想模式。这种植被配置格局使坡面的光照、热量、降水、径流、土壤属性等资源因子发生空间再分配,进而影响土壤水分分布。如党汉瑾等^[16]通过对黄土丘陵区26 a生柠条植物篱各部位土壤水分研究,发现植物篱带前和带内土壤含水率较高,带后则较低。吕文强等^[17]发现柠条植物篱土壤水分有效性随距植被带距离增大而提高。目前,种植年限、土层深度、地形等对柠条种植后土壤水分分布的影响,柠条等高线带状种植模式减少土壤侵蚀等,均已

有较多研究。但将各影响因子与柠条的带状种植相结合解析坡面尺度土壤水分空间异质性的研究还较少,且环境因子与土壤水分关系的定量表达还有待进一步探究。因此,本研究以黄土丘陵区不同种植年限等高线带状种植的柠条坡地为研究对象,分析不同种植年限、坡位以及灌草部位对0—100 cm土壤水分的影响,旨在探明坡面土壤水分的空间分布情况及影响因素,以期干旱半干旱地区植被建设和土壤水资源调控提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市河川乡中国科学院水土保持研究所上黄生态试验站(106°26′—106°30′E, 35°59′—36°03′N)。海拔高度1 534~1 824 m,地貌类型属典型黄土高原丘陵区,土壤多为黄土母质发育的黄绵土,土壤贫瘠,且遭受侵蚀。多年平均降水量为419.1 mm,年内降水分配不均,7—9月降雨量可占到年降雨量的70%以上。多年平均气温6.9℃,属温带半干旱气候区,无霜期152 d。研究区天然植被以多年生草本为主,代表性植物有长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia vestita*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等,人工植被以柠条、山杏(*Armeniaca sibirica*)等为主,其中人工柠条林栽植面积最大^[18]。

1.2 试验设计与样品测定

经实地调查选择研究区内柠条种植15 a(2004年),25 a(1994年),35 a(1984年)沿坡地的样带各一条,并以相邻撂荒40 a以上荒草坡地作为对照。坡面柠条种植为等高线带状种植模式,伴有约3°反坡台整地,平均阶面宽0.5~1 m,相邻柠条带间为2~3 m的自然荒草坡面。将各样地沿坡面由上至下依次分为5个坡位(坡顶、坡肩、坡上、坡中、坡下),坡肩距坡顶约15 m,坡肩至坡下相邻坡位间相距40~60 m。各坡位水平设置3个10 m×10 m样方,样方间距约10 m且样方内均包含完整柠条灌草部位。分别在各样方内选取4个采样点,为柠条带间中点(距柠条茎干1~1.5 m)、柠条带前(距柠条茎干0.5~0.8 m)、柠条带内(距柠条茎干0.1 m)、柠条带后(距柠条茎干0.5~0.8 m)。采样点示意图见图1。同时测量样方内每株柠条高度,进行植被调查并收集地上鲜生物量和干生物量,测定每个样点经纬度、海拔、坡度、坡向等环境因子^[19](表1)。

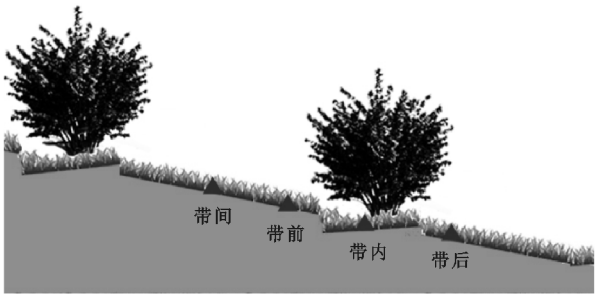


图 1 采样点位示意图

于 2019 年 7 月 29 日—31 日进行土壤样品采集,取样前 7 d 和取样期间采样区并无降雨发生。各采样点取样深度均为 100 cm,用土钻按照 0—10,

10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 分 7 层取土,各土层重复 3 次取样,采得土壤样品装入铝盒密封。土样带回实验室后,采用烘干法^[20]测定土壤含水量。

1.3 数据统计分析

采用 SPSS 17.0 软件进行基本统计分析,利用单因素方差分析(ANOVA)检验不同种植年限、坡位及灌草部位下的土壤含水量差异,并用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平为 0.05。采用 OriginPro 9.0 软件进行图形绘制。用冗余分析(RDA)分析环境因子对土壤含水量的影响,用 CANOCO 5.0 软件完成。

表 1 样地基本情况

样地	坐标	海拔/ m	坡向/ (°)	坡度/ (°)	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤机械组成/%			SOC/ (g·kg ⁻¹)
						黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)	
CK	36°00′40.56″N 106°29′01.67″E	1711~1797	SW15	25.5~29.5	1.12	17.05	23.89	59.05	7.97
15 a	36°00′31.04″N 106°29′03.81″E	1714~1810	SW17	23.0~26.0	1.21	17.92	25.24	56.84	8.23
25 a	36°00′91.04″N 106°47′48.63″E	1629~1675	SW22	22.5~28.0	1.18	19.34	27.28	53.37	9.38
35 a	36°00′20.16″N 106°28′21.58″E	1563~1668	SW25	21.0~29.0	1.15	20.19	29.06	50.75	10.38

注:CK 表示荒草地,15 a,25 a,35 a 分别表示柠条种植 15,25,35 a,下同。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量基本统计特征

随着柠条种植年限的增加,土壤含水量平均值逐渐降低,标准差和变异系数表现出相同的趋势,变异性逐渐变小(表 2)。25 a 和 35 a 柠条地土壤含水量显著低于 15 a 柠条地和荒草地($p<0.05$)。从坡位看,土壤含水量表现为坡顶最高,坡中和坡下次之,坡上显著低于其他坡位($p<0.05$);坡肩的标准差和变异系数均为最高。从灌草部位看,土壤含水量平均值表现为带间、带前和带内无显著差异($p>0.05$),但均显著高于带后($p<0.05$),带后的标准差和变异系数均最高,带前则最低。不同种植年限、坡位和空间位置的变异系数均为中等变异($10\%\leq CV\leq 100\%$)。

2.2 不同种植年限柠条坡地土壤水分分布

不同年限人工柠条地坡面土壤水分分布特征如图 2 所示。整体而言,各样地土壤含水量均随土层深度的增加而降低,且 0—40 cm 土层变化较为明显,40—100 cm 土层含水量基本趋于稳定。土壤含水量随种植年限的增加逐渐降低,且荒草地和柠条 15 a 的 0—40 cm 土层含水量显著高于柠条 25 a 和柠条 35 a。各土层含水量均为坡顶最高,坡下、坡中次之,坡肩、坡上最低。且带内各土层含水量普遍最高,带后普遍最低。

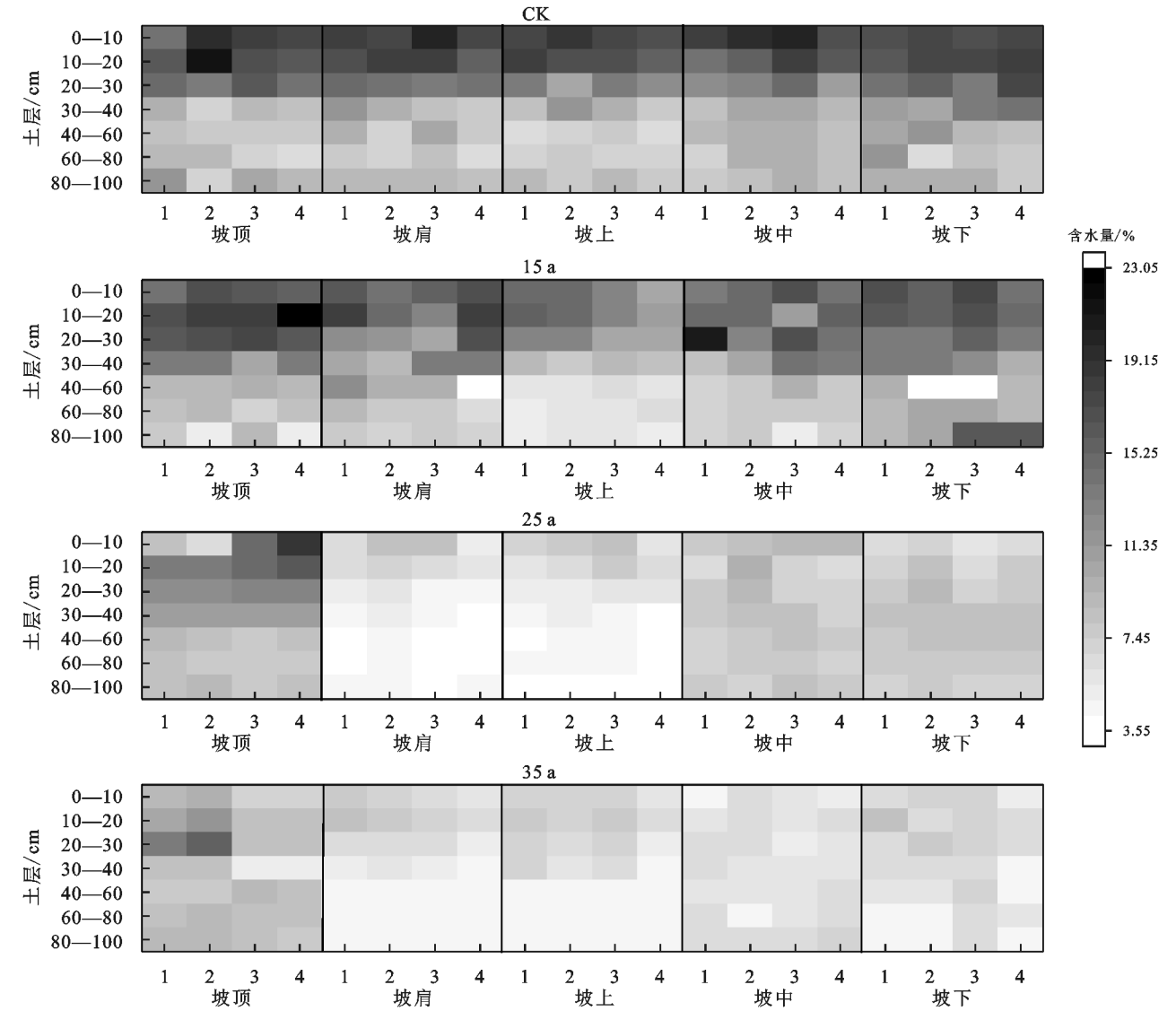
表 2 土壤含水量基本统计特征

研究 对象	样地	平均值/ %	最小值/ %	最大值/ %	标准差	变异 系数/%
种植年限	CK	12.37a	7.02	21.26	4.21	34.04
	15 a	11.41b	3.99	23.01	3.88	34.01
	25 a	6.89c	3.60	15.19	2.25	32.66
	35 a	6.38c	4.23	14.61	1.59	24.92
	坡顶	11.33a	7.06	23.01	3.65	32.22
坡位	坡肩	7.67c	3.60	21.26	3.98	51.89
	坡上	7.18d	3.63	19.83	3.39	47.21
	坡中	8.84b	4.74	20.62	3.56	40.27
	坡下	9.14b	4.71	17.51	3.40	37.20
灌草部位	带间	8.45a	4.06	20.62	3.66	43.31
	带前	8.29a	3.63	17.93	3.36	40.53
	带内	8.67a	3.60	18.12	3.68	42.45
	带后	7.87b	3.95	23.01	3.70	47.01

注:不同小写字母表示不同样地、坡位或灌草部位间差异显著($p<0.05$)。

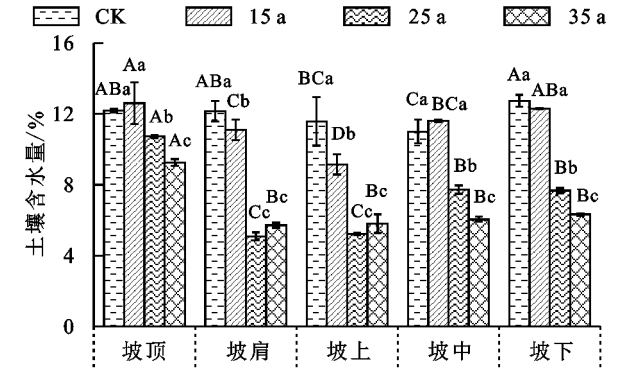
种植年限、坡位对土壤含水量有显著影响(图 3)。土壤含水量在各坡位均表现出随种植年限的增长而降低的趋势;荒草地和柠条种植 15 a 样地在坡顶、坡中和坡下无显著差异($p>0.05$),但在坡肩和坡上有显著差异($p<0.05$),且在各坡位均显著高于柠条种植 25 a 和 35 a 样地;柠条种植 25 a 和 35 a 样地与荒草地和柠条种植 15 a 样地呈相反规律。同一样地不同坡位土壤含水量表现为荒草地为坡下最高,坡顶、

坡肩次之,坡中最低。其他样地均为坡顶最高,坡中、坡下次之,坡肩、坡上最低。



注:横轴编号 1 表示带间,2 表示带前,3 表示带内,4 表示带后。

图 2 不同种植年限柠条坡地土壤水分垂直分布特征

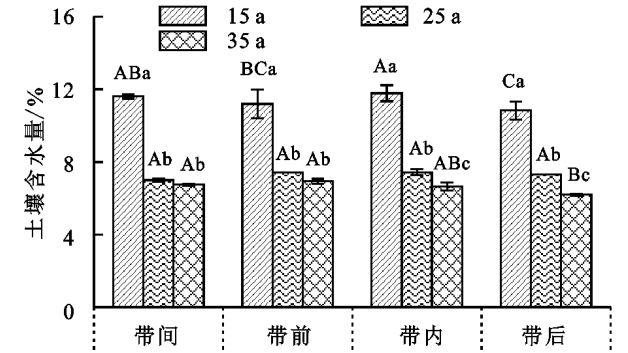


注:不同大写字母表示同一样地不同坡位差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一坡位不同样地差异显著($p < 0.05$),相同字母表示无显著差异。

图 3 不同样地坡位土壤含水量变化

不同种植年限柠条条带结构对土壤水分影响如图 4 所示。种植 15 a 样地内水分最高,带后最低;种植 25 a 样地各位置无显著差异;种植 35 a 样地带

后显著低于其他位置。各位置含水量均随种植年限增加而减少,各样地带间、带前和带内差异不显著,但均显著高于带后($p < 0.05$)。



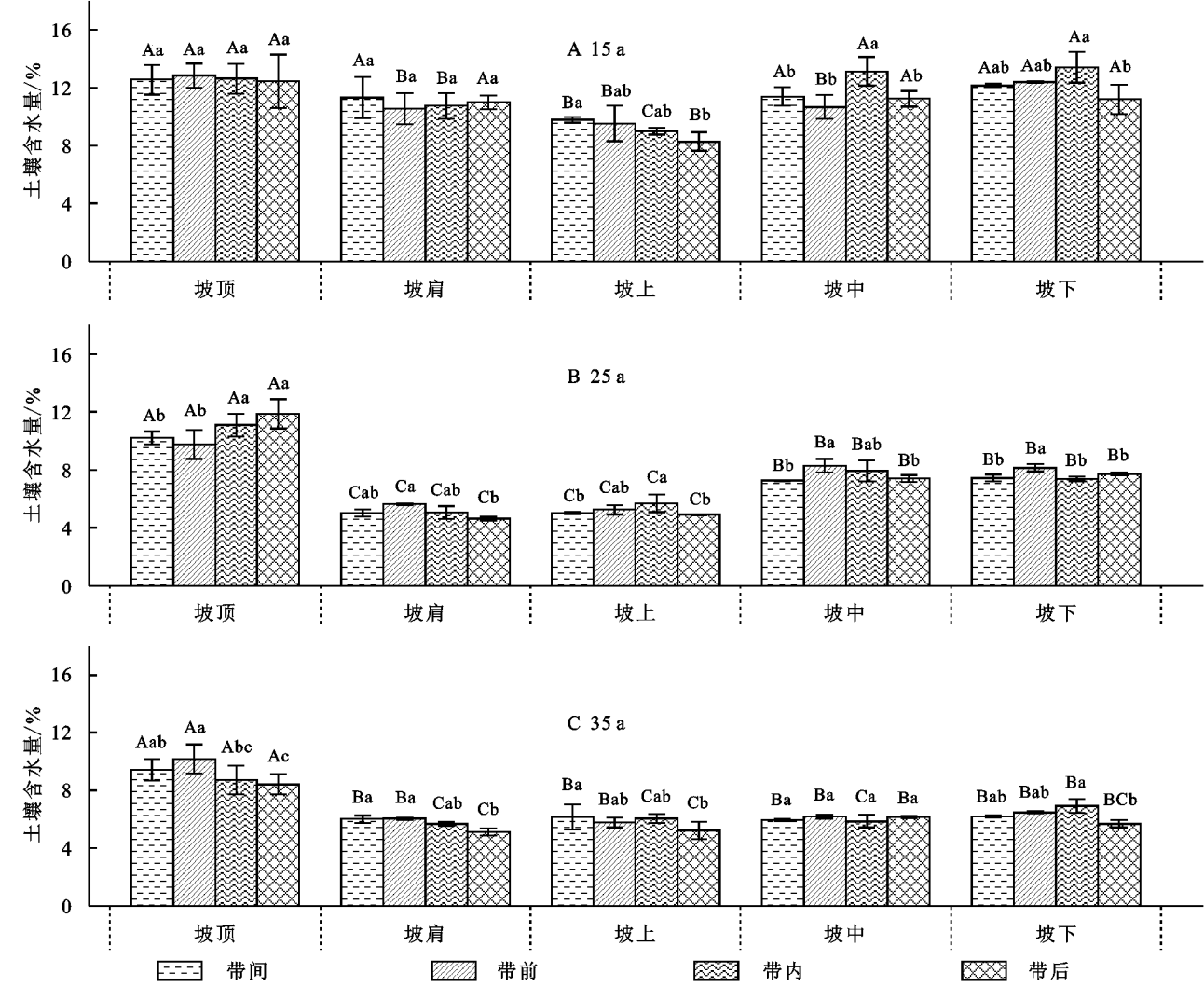
注:不同大写字母表示同一样地不同灌草部位间差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一灌草部位不同样地间差异显著($p < 0.05$)。

图 4 不同年限灌草部位土壤含水量差异

灌草部位对土壤含水量空间分布的影响见图 5。

从柠条条带各灌草部位的坡位差异看,各年限样地的灌草部位均表现为坡顶最高,坡肩、坡上最低,其中种植 15 a 样地(图 5A)和种植 25 a 样地(图 5B)各部位的坡位差异显著($p<0.05$),35 a 样地(图 5C)仅在带

内和带后位置坡位差异显著($p<0.05$)。从柠条条带各坡位的灌草部位差异看,各年限样地均表现为坡顶、坡肩各部位差异不显著,坡上、坡中、坡下均表现为带后显著低于其他部位($p<0.05$)。



注:不同大写字母表示同一灌草部位不同坡位差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示同一坡位不同灌草部位差异显著($p<0.05$),相同字母代表无显著差异。

图 5 各样地不同灌草部位坡位土壤含水量变化

2.3 土壤含水量影响因子

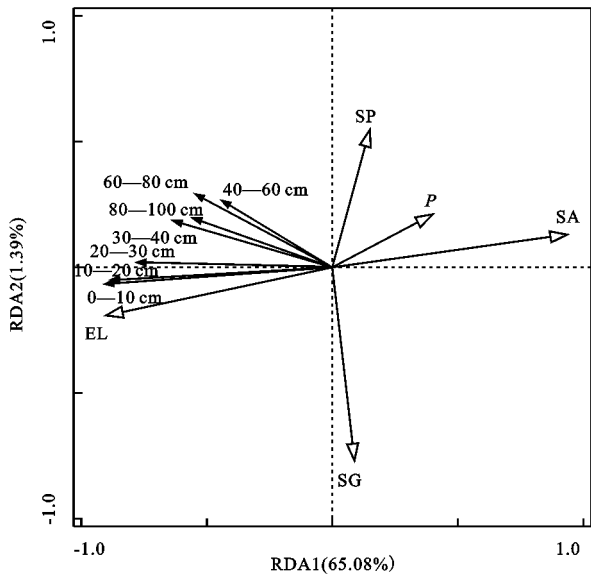
以 RDA 排序图表示各环境因子对土壤含水量的影响程度(图 6)。通过对柠条种植年限、海拔、坡度、坡位、灌草部位 5 个环境因子和土壤含水量进行冗余分析,柠条种植年限对土壤含水量影响程度最大,海拔和坡度的影响程度次之,坡位和灌草部位的影响程度最小。此外,海拔与土壤含水量呈正相关,且相关性随土层增加而减小。年限、灌草部位与土壤含水量呈负相关,相关性随土层增加而减小。坡度与土壤含水量呈负相关,坡位对 0—30 cm 土层土壤含水量有负向相关性,30—100 cm 土层土壤含水量有正向相关性,但影响较小。变异分割分析(Variation Partitioning Analyses, VPA)检测结果显示,年限、海

拔、坡度对土壤含水量的解释量分别为 4.8%,3.6%,2.3%,坡位为 0.3%,而灌草部位对其的解释量不足 0.1%,各环境因子的交互作用对土壤含水量变异的综合效应的解释量为 65.2%。

3 讨论

本研究结果表明,随着柠条种植年限的增加(尤其在 15 a 后),土壤含水量及其变异性均逐渐减少,说明柠条种植 15 a 后对 0—100 cm 土层含水量整体消耗增加。这与已有的研究结果相似,李小芳等^[7]通过对黄土丘陵区柠条土壤水分研究发现柠条生长 10 a 后,随其根系的下伸,土壤水分亏缺加剧,水分生产力下降。自然生长的草本植物根系分布较浅且水分利用程度

小,与自然恢复的撂荒草地相比,人工植被根系较草本植物分布深,随种植年限增长,根系越为发达,耗水能力增强导致土壤水分逐渐减少。植被恢复过程中高耗水人工植被的引入会改变土壤水分空间结构,降低其空间异质性^[21-22]。邵明安等^[23]对黄土高原人工柠条林的根系分布研究也表明,大部分根系主要分布在地表 0—150 cm 土层范围内,毛根主要分布在 0—20 cm 土层范围内。毕建琦等^[24]指出 0—60 cm 土层集中了 60% 的根系生物量,与本研究结果相似。



注:实心箭头代表土层,空心箭头代表影响因子;EL(Elevation)表示海拔,SG(Slope gradient)表示坡度,SA(Stand age)表示柠条种植年限,SP(Slope position)表示坡位,P(Position)表示灌草部位。

图 6 环境因子与土壤含水量 RDA 排序

坡面不同坡位的土壤含水量差异也是土壤水分空间异质性的一个重要部分。本研究发现,土壤含水量表现为坡顶最高,坡中和坡下次之,坡上显著低于其他坡位,这一结果与前人研究结果并不完全一致。苏子龙^[25]和葛翠萍^[26]等的研究表明,黑土区坡面土壤含水量沿坡长增加方向呈先降低后升高的趋势,且坡中含水量最低,坡脚含水量最高。而在其他地区,单一土地利用结构坡面土壤水分随坡长增加而增加^[27-29]。本研究坡顶水分含量最高,可能由于坡顶地势较为平缓,降水入渗量较大。但坡肩、坡上、坡中含水量均低于坡下是相似的,主要由于重力作用使水分向低处坡下汇集,加之高坡位所受太阳辐射较强导致水分蒸发量大于低坡位^[30]。

在本研究中,无论在各样地还是不同坡位,灌草部位对土壤水分分布产生了显著影响,带后位置的土壤水分含量均为最低。党汉瑾等^[16]研究表明,降雨后柠条植物篱 100 cm 土层内水分含量整体为带内>带前>带间>带后,水分向带内汇聚的趋势明显。吕文强等^[17]研究表明,柠条植物篱系统只有带间土壤

水分不亏缺,带后、带前、带内均为亏缺。本研究也显示,柠条条带各空间位置显著差异主要出现在坡上、坡中、坡下,各空间位置含水量均为 0—40 cm 土层变化范围较大且带间较其他位置偏高,40—100 cm 基本趋于稳定且带内较其他位置偏高。各样地、各坡位、各土层带后位置水分均亏缺,且柠条种植 35 a 样地 0—40 cm 土层亏缺严重,坡肩、坡下亏缺严重。有研究认为,随土层增加,地形因子对土壤水分作用减小^[31],因此 40—100 cm 水分含量基本趋于稳定。土壤浅层含水量主要为降水补给,由于样品采集坡面柠条种植为反坡台地形,可蓄积水分,且柠条根系分布较深,自身对降水及地表径流有一定拦蓄作用,故 40—100 cm 带内较其他位置偏高。可能由于柠条根系沿坡面向下伸长,根系耗水能力较强,且由于柠条拦蓄作用,水分未能及时补给,使带后土壤水分含量降低。

环境因子对坡面土壤水分的影响较复杂,各因素间通常具有一定的关系^[32]。已有研究表明,土壤水分的空间异质性是坡地尺度(海拔^[33]和坡位^[34])、立地尺度(坡度^[35])、土地利用^[32]等环境因子共同作用的结果^[36]。本研究通过对柠条种植年限、海拔、坡度、坡位、灌草部位 5 个环境因子和土壤含水量进行冗余分析,发现种植年限、海拔、坡度对土壤含水量的影响程度较大,这与已有研究相似^[34],而灌草部位对其的影响程度最小,究其原因,可能在于其与其他环境因子相比尺度过小,掩盖了其差异性。此外,相邻柠条条带间距也可能影响土壤含水量。许德生^[37]在对内蒙古阴山北麓 5, 10, 16 m 带间距柠条林土壤水分的研究中表明,柠条条带间距对土壤含水量垂直(土层)方向和水平(距柠条带)方向均有显著影响,其变化与柠条的根系质量分布有关,认为 10 m 带间距更有利于柠条的生长。由于本研究样地相邻柠条条带间距较为统一(2~3 m),对土壤含水量的影响可能主要与柠条根系分布和耗水有关。但关于不同柠条条带间距是否对灌草部位土壤水分分布产生影响,以及坡面柠条种植相关的适宜带间距等问题在未来工作中可以进一步研究。

本研究测定的土层深度为 0—100 cm,该深度土壤水分变化既有柠条吸收利用水分导致含水量降低的负效应,也有柠条带拦蓄水分促进径流入渗的正效应,该深度还不足以说明柠条种植导致土壤出现干层的具体特征,在柠条植物篱系统下深层土壤水分特征有待进一步研究。此外,以往研究还发现人工植被对土壤水分的过度消耗导致土壤水分亏缺,是引起林地退化的原因之一^[38]。因此,在半干旱黄土区进行植被恢复时应充分结合立地条件考虑条带性人工植被的选择问题,依据土壤水分的植被承载力考虑其长期适宜区域

降水量的问题,提高土壤水分入渗率,有效减少坡面土壤侵蚀,以更好地维持植被恢复的可持续性。

4 结论

(1) 黄土丘陵区柠条种植年限 >15 a 后坡面土壤含水量减少了 44.30%~48.42%,并且降低了 0—100 cm 土层间分布的异质性。坡顶土壤含水量最高,坡中和坡下次之,坡上最低。灌草部位的带间、带前和带内土壤含水量无显著差异($p>0.05$),但显著高于带后($p<0.05$)。

(2) 冗余分析和变异分割分析结果表明,种植年限是坡面尺度土壤含水量的主控因素,海拔和坡度次之,坡位和灌草部位最小,各环境因子交互作用对土壤含水量变异综合效应的解释量为 65.2%。

(3) 柠条种植带状结构对不同种植年限样地和坡位下的空间小尺度土壤水分产生了明显的影响。因此,在半干旱黄土区进行柠条植被建设和土壤水分环境效应评价时应充分考虑其种植结构及其与坡面环境因子的耦合关系。

参考文献:

- [1] Yu B W, Liu G H, Liu Q S, et al. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2018, 165: 125-132.
- [2] Liu B X, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 176-184.
- [3] Liu Y, Miao H T, Huang Z, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 417: 137-143.
- [4] 徐炳成, 山仑. 半干旱黄土丘陵区沙棘和柠条水分利用与适应性特征比较 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (11): 2025-2028.
- [5] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳, 等. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31 (23): 7056-7066.
- [6] 郭忠升, 李耀林. 植物生长与土壤水关系调控起始期 [J]. *生态学报*, 2009, 29 (10): 5721-5729.
- [7] 李小芳, 李军, 王学春, 等. 半干旱黄土丘陵区柠条林水分生产力和土壤干燥化效应模拟研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25 (3): 113-119.
- [8] 梁伟, 白翠霞, 孙保平, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分有效性及蓄水性能: 以陕西省吴旗县柴沟流域为例 [J]. *水土保持通报*, 2006, 26 (4): 38-40.
- [9] 梁海斌, 史建伟, 牛俊杰, 等. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究 [J]. *干旱区资源与环*

境, 2014, 28 (6): 144-147.

- [10] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [11] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hill slope catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240: 243-263.
- [12] 黄艳丽, 李占斌, 苏辉, 等. 人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (15): 108-116.
- [13] 董起广, 张杨, 陈田庆, 等. 黄土高原丘陵沟壑区小流域坡面土壤水分分布特征 [J]. *中国农村水利水电*, 2018 (7): 65-73.
- [14] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比 [J]. *土壤*, 2015, 47 (2): 400-407.
- [15] Fan J, Yan L J, Zhang P, et al. Effects of grass contour hedgerow systems on controlling soil erosion in red soil hilly areas, Southeast China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2015, 30 (2): 107-116.
- [16] 党汉瑾, 党宏忠. 半干旱区柠条植物篱水分再分配格局研究 [J]. *林业科学研究*, 2014, 27 (6): 745-751.
- [17] 吕文强, 王立, 党宏忠, 等. 黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性空间分异特征 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (6): 233-240.
- [18] 张文文. 人工柠条林密度变化对土壤水分及其生长的影响 [D]. 陕西杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2015.
- [19] 杨婷. 坡向对土壤微生物特征与生态化学计量特征的影响研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [21] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 314-321.
- [22] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China [J]. *Catena*, 2010, 81 (1): 24-31.
- [23] 邵明安, 郭忠升, 夏永秋, 等. 黄土高原土壤水分植被承载力研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [24] 毕建琦, 杜峰, 梁宗锁, 等. 黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19 (2): 225-230.
- [25] 苏子龙, 张光辉, 于艳. 典型黑土区农业小流域不同坡向和坡位的土壤水分变化特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11 (6): 39-44.
- [26] 葛翠萍, 赵军, 王秀峰, 等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响 [J]. *水土保持通报*, 2008, 28

(6):16-19.

[27] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2003, 54(1/2):197-213.

[28] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1983,62(1/4):179-200.

[29] Zhu Y J, Shao M A. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008,147(3/4):185-191.

[30] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J].生态环境学报,2003,12(1):52-55.

[31] 莫保儒,王子婷,蔡国军,等.半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J].干旱区地理,2014,37(6):1207-1215.

[32] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J].农业工程学报,2010,26(9):87-93.

[33] 付国珍,摆万奇,姚丽娜.拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子[J].应用生态学报,2015,26(7):2115-2122.

[34] 郭欣欣,付强,卢贺.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.

[35] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.

[36] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.

[37] 许德生.不同带间距柠条林根系和土壤水分特征及其植物多样性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[38] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

(上接第 45 页)

[8] 罗琰,苏德荣,纪宝明,等.辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J].草业学报,2018,27(3):33-43.

[9] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):732-738.

[10] 王合云,李红丽,董智,等.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2015,52(3):706-712.

[11] 夏江宝,陈印平,王贵霞,等.黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征[J].生态学报,2015,35(14):4633-4641.

[12] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,3(15):1-13.

[13] Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2010, 24(3): 238-242.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2013.

[15] 康健,孟宪法,许妍妍,等.不同植被类型对滨海盐碱土壤有机碳库的影响[J].土壤,2012,44(2):260-266.

[16] 董悦,张永清,刘彩影.晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J].生态学报,2018,38(23):8621-8629.

[17] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.

[18] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):1007-1019.

(上接第 51 页)

[17] 谈正鑫,万福绪,张涛.盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(4):184-188.

[18] 剪文灏,李淑春,陈波,等.冀北山区 3 种典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):144-147.

[19] 刘凯,贺康宁,王先棒,等.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2018,40(1):89-97.

[20] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.

[21] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.

[22] 赵阳,余新晓,吴海龙,等.华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2011,25(6):148-152.

[23] 吴迪,辛学兵,赵明扬,等.北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J].林业科学研究,2014,27(3):417-422.