

公路边坡不同护坡措施表层土壤水分动态变化规律

陈志强, 王瑄, 鲍永雪

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要:为了确定公路边坡不同护坡措施保水效果,以沈抚高速沿线的草皮防护(CP)、挂网喷播(GW)、六角空心砖防护(LJ)和菱形防护(LX)四种典型边坡防护措施为研究对象,利用土壤水分测量仪观测不同护坡措施的表层土壤含水量,分析不同护坡措施下土壤含水量的时空演变特征。结果表明:不同护坡措施土壤含水量均表现为坡下>坡中>坡上;土壤含水量均值在13日,14日均表现为 $CP>GW>LJ>LX$,而在15日,16日均表现为 $CP>LJ>GW>LX$;在同种护坡措施下,土壤含水量变异程度在各坡位均表现为随时间变化呈逐渐增大的规律;在同一坡面情况下,六角空心砖防护坡面表层土壤水分变异系数(CV)表现为坡上>坡下>坡中,其余三种护坡措施CV均表现为坡上>坡中>坡下;护坡措施土壤含水量变异程度随时间变化表现为 $LX(12.5\%)>GW(10.6\%)>CP(9.2\%)>LJ(8.5\%)$,菱形植草与其余三种措施间差异显著($p<0.05$),挂网植草与六角空心砖防护差异显著($p<0.05$),草皮防护与这两种措施均未达到显著水平;六角空心砖配合紫穗槐灌木和小火炬草本植被的护坡形式保水效果较好。

关键词:边坡防护措施;土壤含水量;保水效果;时空演变特征

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0077-07

Dynamic Variations of Surface Soil Moisture Contents Under Different Slope Protection Measures in Highway

CHEN Zhiqiang, WANG Xuan, BAO Yongxue

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Four typical kinds of slope protection measures, including turf (CP), hanging net (GW), hexagon hollow brick (LJ) and rhombus (LX), along the Shenfu Highway, had been taken into account in order to determine the water conservation effects of those measures in highway slopes, and the soil moisture contents of those measures were determined using soil moisture measuring instrument, so as to analyze the spatiotemporal characteristics of surface soil moisture contents in different slope protection procedures. The results showed that in all protection slopes, soil water contents followed the order: lower slope>middle slope>upper slope; On the 13th day and 14th day, the mean soil water contents followed the order: $CP>GW>LJ>LX$, while on the 15th day and 16th day, it followed the order: $CP>LJ>GW>LX$; under the same protection measure, the variation degrees of soil water contents in each slope position increased gradually over time; under the same slope, the variable coefficient (CV) of surface soil moisture content in hexagon hollow brick slope followed the order: upper slope>lower slope>middle slope, while other slopes followed the order: upper slope>middle slope>lower slope; in all protection slopes, the variation degrees of soil water contents followed the order over time: $LX(12.5\%)>GW(10.6\%)>CP(9.2\%)>LJ(8.5\%)$, in which the rhombus had a significant difference with other three measures ($p<0.05$), and hanging net had a significant difference with hexagon hollow brick ($p<0.05$), while the difference between turf and these two measures were insignificant; cooperation of hexagon hollow brick with *Amorpha fruticosa* L. and *Kniphofia uvaria* had better water conservation effect.

Keywords: side slope protection measure; soil moisture content; water conservation effect; spatiotemporal characteristics

公路边坡防护在公路建设中具有举足轻重的作用,研究各项护坡措施的防护效果具有重要的意义。邓辅唐等^[1]通过研究思小高速公路边坡不同植被类型各个层次的蓄水保土功能,对比元磨高速和玉元高速公路护坡措施的水土保持效果,提出在高速公路边坡生态恢复中应该采用乔灌草相结合的护坡形式。卓慕宁等^[2]研究了京珠高速公路粤境南段终点路段边坡生态防护技术的水土保持效应,得出采用建植草本植被的生态护坡技术能短期内完全覆盖坡面,中雨暴雨情况下,边坡径流系数在 15.97% 以下,土壤流失量极小。骆汉等^[3]采用人工模拟降雨的方式对三种不同覆盖物防护的公路边坡水土保持效果进行了描述,得出草帘子覆盖下的坡面径流量、径流系数和坡面产沙量均明显小于裸坡,水土保持效果较好。周显广^[4]以陕北半干旱地区某高速公路典型边坡防护为研究对象,分析各护坡措施的交通功能、生态收益、经济收益和社会收益,得出半干旱区公路边坡防护的效益以土工格式植草和客土喷播边坡绿化为最优的结论。杨振^[5]对哈绥高速亚布力段公路沿线水土保持措施的植被和土壤物理性质进行了研究,得出水土保持措施对公路边坡防治水土流失和降低边坡径流量径流含沙量上效果显著,各措施防护效果比较是:土工格室植草>三维植被网>散播植草>六角空心

砖植草。对于公路边坡防护效果受到各学者的关注,但主要从边坡土壤侵蚀及冲刷等角度进行考虑,在各种护坡措施下,土壤水分是一项重要的土壤特性指标,对于道路边坡的稳定同样有着十分重要的影响,但有关公路边坡防护条件下土壤水分的空间和时间变异性的文献报道较少^[6],因此,为充分了解边坡绿化植被的防护保水效果,本试验通过对沈抚高速沿线 4 种典型边坡防护措施下土壤水分的变化进行监测,研究各措施下土壤水分的变化规律,并探讨道路边坡土壤水分在各种护坡措施下的空间变异性,以便对各项防护办法的保水效益做出理性评价,旨在为边坡防护办法的完善及推广应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验路段位于辽宁省东部,属于北温带季风性大陆气候,年降雨量 750~850 mm,无霜期 150 d 左右,年平均气温 5~7℃,≥10℃ 积温平均达到了 2 700~3 200℃,属于丘陵地带,土壤类型为发育在黄土性母质上的壤质棕壤土。沈抚高速为东西走向,全长 776 km;路堑挖方段 200 多个,总长约 31 km,路堑段风化程度较低,多为土质边坡和弱风化岩石边坡。沿线典型边坡防护方式的基本概况见表 1。

表 1 调查点概况

防护类型	所在位置	地理位置	坡度范围/(°)	均值/(°)	坡长/m	坡向	植被类型
菱形防护	k8 段	41°50'30"N,123°37'24"E	28~32.5	30.6	6	SE150°	地锦、小火炬
铺设草皮	k8+30 段	41°50'34"N,123°37'30"E	21~26	24.6	12	NW300°	地锦、小火炬
挂网喷播	k10 段	41°51'24"N,123°38'2"E	28~34	31.7	6	NW318°	小火炬、紫穗槐
六角空心砖防护	k10 段	41°51'24"N,123°38'2"E	30~33.5	32	6	SE140°	无芒雀麦、黑麦草、白三叶、早熟禾等

1.2 试验设计

经过对高速沿线各种护坡措施的多次野外考察,在沿线选择 4 种典型措施作为试验样地,见图 1,由于各措施间防护方式存在差异,采用不同的样地划分方式。

1.2.1 菱形网格植草 选择三处防护坡面作为试验样地,每处样地均由两个完整的菱形网格组成,分别位于边坡上部 and 下部,呈对角形式,样地长约 6 m;三处样地均间隔一个菱形网格,宽度约为 3 m。由于每个完整的网格长度为 3 m,把每个试验网格平均划分成三段,分为上部、中部和下部,等间距 20 cm,在上部和下部选择 5 个测点,中部选择 6 个,各网格选择 16 个,共计测点 96 个,以下统称为菱形植草。

1.2.2 草皮防护 选择三处防护坡面作为试验样地,各样地间距 3 m,宽度 1 m,沿边坡纵向从下往上

取 6 m 长坡面,平均划分为坡上、坡中和坡下三个坡位。在各坡位横向每隔 20 cm 选择测点,每个样地选择 15 个,共计测点 45 个。

1.2.3 六角空心砖防护 选择三处防护坡面作为试验地,每个样地坡面横向包括 5 个空心砖,样地间距约为 3 m,宽度约为 1 m,在各样地内沿坡横向选取相邻的五个空心砖,以间距 20 cm 在每个砖内取 1 条 6 m 长的纵向线,在每条线上每隔 3 m 选择一个空心砖,每处样地三个坡位共计空心砖 15 个。在每个空心砖内各选择 1 个测点,三处样地共计测点 45 个,以下统称为六角防护。

1.2.4 挂网喷播 选择三处防护边坡作为试验地,各样地宽 1 m,间距 3 m,平均划分为坡上、坡中和坡下三个坡位,试验坡面长度 6 m。在各坡位横向每隔 20 cm 选择测点,每个样地选择 15 个,共计测点 45 个,以下统称为挂网植草。



图 1 边坡防护措施类型

1.3 测定方法与数据处理

2016 年 4 月 12 日试验区降雨量达到了 24 mm, 从 4 月 13 日至 16 日的四天内, 采用北京澳作生态仪器有限公司生产的土壤水分测量仪 AZS-2, 对各测点 0—10 cm 的土壤容积含水量(%)进行连续测定, 对

雨后各护坡措施下坡面表层土壤水分的分布特征及变异情况进行观测, 对比分析和评价各护坡措施的保水效果。土壤容积含水量是土壤中水分容积与土壤容积的比例, 容积含水量定义为:

$$\theta_v = (V_w / V_s) \times 100\%$$
 (1)

式中: θ_v 为容积含水率; V_w 为土样中水的体积; V_s 为土样的总体积。

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据, 同时使用 IBM SPSS Statistics 21 提供的 One-way ANOVA 进行各种护坡措施下土壤水分含量的差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同护坡措施下的土壤含水量分布特征

2.1.1 土壤含水量在各坡面的分布特征 在观测的四天时间内各种护坡措施下土壤含水量情况见图 2。从图中可以看出, 各种护坡措施下土壤水分含量均表现为从坡上至坡下逐渐增大的变化规律。因为在坡面条件下, 土壤水分受重力作用从坡上向坡下发生位移, 使坡下水分条件较坡中和坡上好, 且土壤养分能随水分移动而逐渐向坡下聚集, 导致下坡位的土壤养分含量较高, 植被状况好于坡上和坡中, 这在一定程度上也起到涵养水源的作用, 因此出现了含水量坡下 > 坡中 > 坡上的水分分异现象, 任婷婷^[7]和张庆^[8]等的研究也同样表明了这种变化规律。

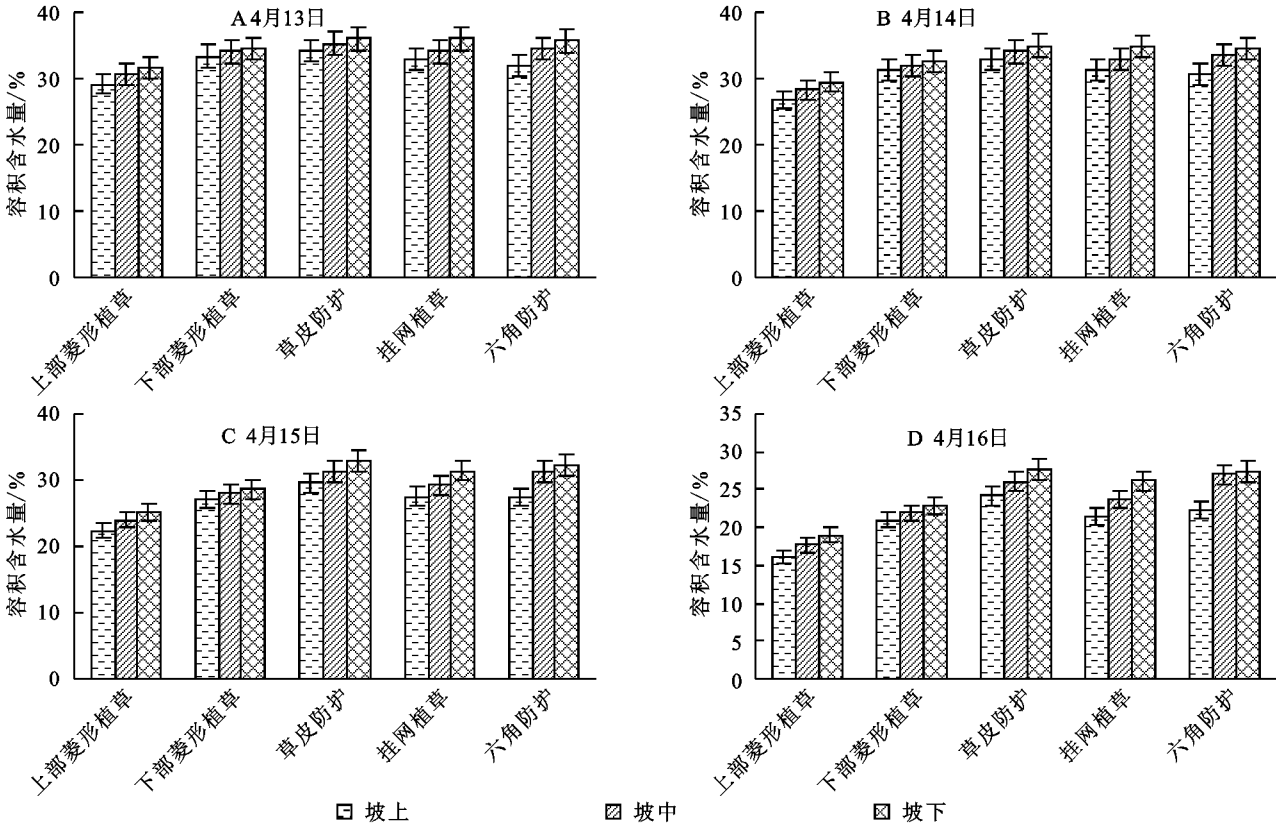


图 2 不同边坡防护措施下土壤含水量观测结果

2.1.2 土壤含水量在各措施间的分布特征 各护坡措施下土壤含水量间的差异显著性检验结果见表2。从表中可以看出,土壤含水量均值大小在13日,14日均表现为 $CP>GW>LJ>LX$,而在15日,16日均表现为 $CP>LJ>GW>LX$;在13日,14日的测量中,坡面含水量在菱形植草与其余三种护坡措施间差异显著($p<0.05$),而其余三种措施间差异不显著。因为草皮防护的坡面位于整个边坡坡面中下部(边坡坡长12 m,样地坡长6 m),降水在坡面再分配作用及较缓的坡度(平均坡度 24.6°)较利于减少土壤水分的径流损失而增加入渗量,在降雨过后形成了较好的水分条件,植被生长良好,且样地坡向为西北,据 Garten 等^[9]的研究表明,西北坡向收到的太阳辐射能较东南坡向小,更利于坡面水分保持,因此草皮防护的坡面水分含量最高;挂网植草和菱

形植草坡向东南,但挂网植草采用的草种类型丰富,达10余种(无芒雀麦、黑麦草、白三叶、早熟禾等),而菱形植草则类型单一(地锦、小火炬),已出现植被萎蔫、发黄和长势衰弱现象,相比菱形植草挂网植草所形成的边坡植物群落更为稳定,长势良好,因而对降水的涵养与保持能力更强;六角防护坡向西北,但受空心砖的限制,坡面植被盖度较挂网植草和草皮防护低,且相比其他三种防护措施,部分降水沿砖流失,坡面土壤水分入渗量少,因此土壤含水量较低,但六角防护坡面的空心部分覆有坡中部紫穗槐灌木的枯枝落叶层,据徐娟^[10]和吴钦孝^[11]等研究表明,枯枝落叶层在截留降雨、拦蓄地表径流、减少水分蒸发和增加土壤入渗等方面有一定作用,因此土壤含水量较菱形植草高,总体上表现为草皮防护 $>$ 挂网植草 $>$ 六角防护 $>$ 菱形植草。

表2 各护坡措施下边坡土壤含水量%

测定时间	菱形防护	铺设草皮	挂网喷播	六角空心砖防护
第一次 2016-4-13	32.2±1.25b	35.2±0.70a	34.3±0.38a	34.0±0.12a
第二次 2016-4-14	30.1±1.44b	33.9±0.73a	33.0±0.38a	32.9±0.12a
第三次 2016-4-15	25.9±1.60c	31.2±0.65a	29.4±0.39b	30.4±0.15ab
第四次 2016-4-16	19.7±1.80c	26.0±0.67a	23.7±0.39b	25.6±0.17ab

注:数值为平均值±标准误,同一行小写字母不同表示在 $p=0.05$ 水平下差异显著。

在15日、16日的测量中,坡面含水量在菱形植草与其余三种措施间差异显著($p<0.05$),草皮防护与挂网植草间也达显著水平($p<0.05$),而六角防护与草皮防护和挂网植草间均未达到显著水平。由于草皮防护所处的微地形更利于保持水分,因此坡面土壤水分含量仍属最高;六角防护采用复合形式,而紫穗槐灌木主要吸收深层水,对表层土壤水分基本不消耗,康艳萍^[12]和卢鑫^[13]等的研究表明,紫穗槐灌木根系发达,具耐干旱、寒冷、保持水土等作用,在护坡技术中得到广泛应用。此外,加上枯枝落叶层的覆盖,可在一定程度上减少坡面土壤水分耗散,保水效果良好;挂网植草和菱形植草坡向东南,辐射能强,土壤水分蒸发量大,受植被种类、成活率及盖度的综合影响,土壤水分状况在两种措施间差异显著($p<0.05$),也正是上述因素,使得挂网植草坡面水分含量减少至小于六角防护,形成与草皮防护间显著差异($p<0.05$)以及与六角防护间不显著差异,土壤含水量表现为草皮防护 $>$ 六角防护 $>$ 挂网植草 $>$ 菱形植草。

2.2 不同护坡措施下土壤含水量变化特征

2.2.1 土壤含水量在各坡面的变化特征 在四天观测期内边坡土壤水分日变化量及总变化情况见图3,由图可知,在各种护坡措施下土壤水分的变异程度在同一坡位随时间变化均呈现逐渐增大的规律;在同一坡面除六角防护外,其余三种护坡措施下变异程度表

现为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下,六角防护变异程度则表现为坡上 $>$ 坡下 $>$ 坡中。考虑到随着降雨事件的结束,一方面坡面植被生长、蒸腾作用消耗大量水分,另一方面坡面水分渗入深层、直接蒸发,使土壤水分降低程度越来越明显;另外,植被具有促进水分入渗的功能,较好的植被状况能保持更多的水分,持水性能好,反之,土壤水分缺少植被保持,易于直接蒸发造成损耗;受复合防护形式的影响,六角防护与其他措施的土壤水分变异程度并不一致。

变异系数CV在坡面尺度下可以反映土壤水分的变异程度,反映土壤含水量在空间上的分布特征。

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}$, x 为土壤含水量测定值; \bar{x} 为土壤含水量的平均值; n 为样本数,当 \bar{x} 一定时, CV 值越大,土壤含水量变化越剧烈; CV 值越小,土壤含水量越稳定^[14],同时根据变异程度的大小可以分为三个分级: $CV \leq 0.1$ 属于弱变异, $0.1 < CV < 1$ 属于中等变异, $CV \geq 1$ 属于强变异^[15]。表3为各项护坡措施的边坡土壤含水量在不同坡位的水分特征值。由表3可知,除六角防护坡面坡中部位表层土壤水分属弱变异外,四种护坡措施各坡位均属中等变异,且变异程度表现为从坡上至坡下随土壤含水量增大而趋于减弱。根据前文中的说明,受枯枝落叶层、

灌木植被及坡向等的综合影响,在六角防护坡面,以坡中部位土壤水分变异系数最低,即坡上>坡下>坡中,这与图 3 的分析结果一致。在各项护坡坡面沿坡长方向,求出每个试验地所测坡位的平均土壤含水量与变异系数,并作相关分析。结果表明,沿坡长方向从坡上至坡下,土壤含水量变异程度随土壤水分均值的增加而减小,除六角防护坡面未达显著水平外($R=-0.684$, $\text{Sig.}=0.061$),其余各项护坡措施坡

面均达到显著水平(菱形植草: $R=-0.626$, $\text{Sig.}=0.007$;草皮防护: $R=-0.714$, $\text{Sig.}=0.047$;挂网植草: $R=-0.833$, $\text{Sig.}=0.002$),由此也说明坡面土壤水分的变异程度从坡上至坡下呈逐渐减小的趋势。其原因主要是在坡面尺度下,从坡下至坡上,风速、温度、植被状况及土壤特性等多种因素对不同位置上土壤水分的分布差异性影响逐渐变得显著,该研究结论与胡伟等^[16]所得结论一致。

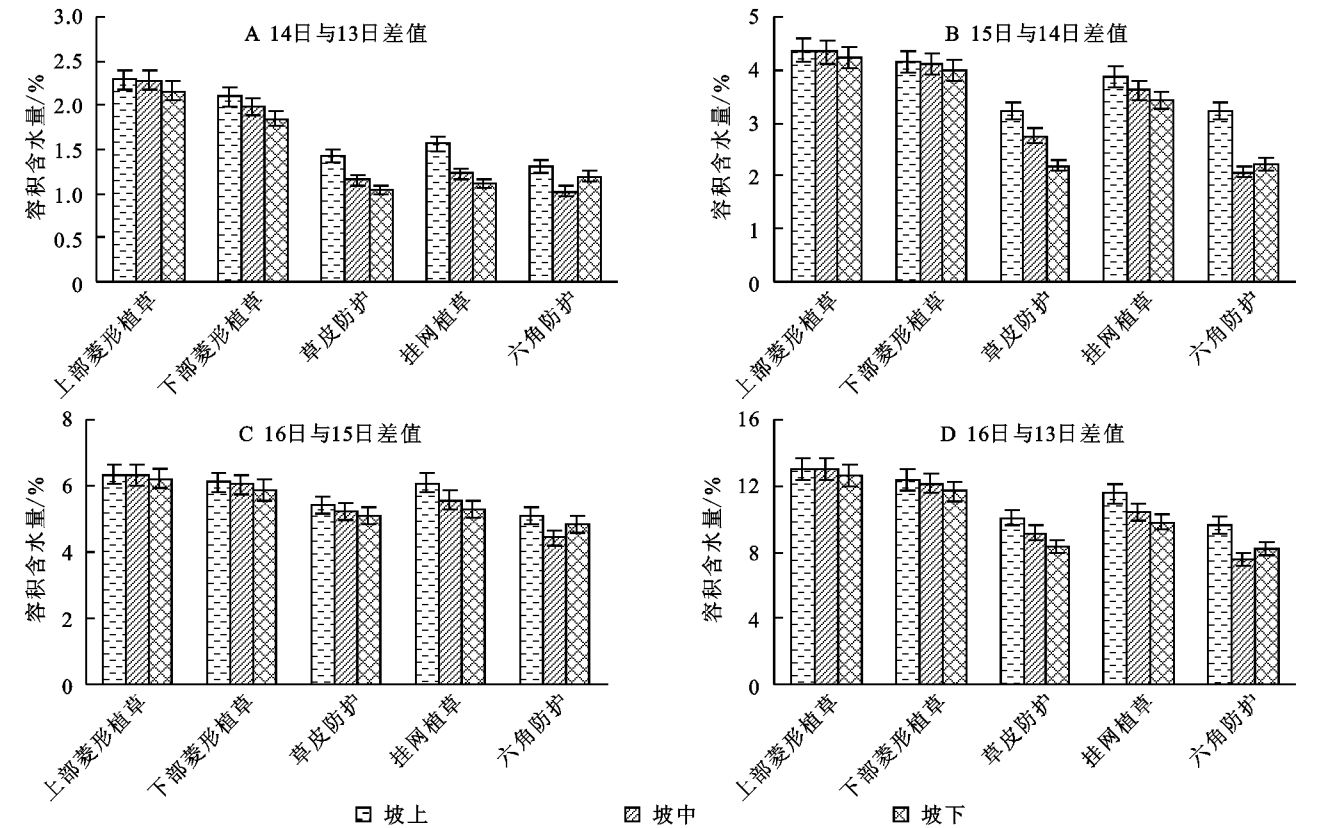


图 3 不同措施下坡面土壤水分日变化差值情况

表 3 各项护坡措施不同坡位水分统计特征值

措施种类	坡位	样本数	均值	标准差	标准误	变异系数/%	极小值	极大值	均值的 95%置信区间	
菱形防护	坡上	12	28.3	4.700	1.357	16.60	20.7	33.9	25.33~31.31	
	坡中	12	30.3	4.136	1.194	13.67	23.9	34.7	27.62~32.88	
	坡下	12	32.1	4.032	1.164	12.56	25.7	36.7	29.54~34.67	
铺设草皮	上部 下部	坡上	12	23.6	5.811	1.678	24.65	12.4	31.5	19.88~27.26
		坡中	12	25.2	5.490	1.585	21.82	15.0	32.4	21.67~28.65
		坡下	12	26.3	5.161	1.490	19.61	17.3	32.7	23.04~29.59
		坡上	12	28.2	5.064	1.462	17.98	19.7	34.6	24.95~31.39
		坡中	12	29.0	4.908	1.417	16.93	21.3	34.8	25.86~32.10
		坡下	12	29.7	4.752	1.372	16.02	21.9	35.1	26.64~32.68
		坡上	12	30.2	4.072	1.175	13.49	23.8	35.0	27.59~32.77
挂网喷播	坡中	12	31.7	3.765	1.087	11.90	25.0	35.8	29.26~34.04	
	坡下	12	32.9	3.424	0.989	10.41	26.7	36.5	30.71~35.06	
	六角空心 砖防护	坡上	12	28.1	3.889	1.123	13.86	22.0	32.3	25.59~30.53
坡中		12	31.6	3.032	0.875	9.60	26.6	34.8	29.65~33.51	
坡下		12	32.5	3.294	0.951	10.15	27.3	35.8	30.36~34.54	

注:各项护坡措施相同坡位样本数表示在某种特定措施下每个试验样地同一坡位的平均土壤含水量的总数。

由表 4 可知,随着雨后干旱天数增加,护坡措施坡面土壤水分减少量逐渐增大,雨后干旱天数间水分减少量均达到显著(Sig. <0.05)或极显著水平(Sig. <0.01),表明雨后干旱天数对边坡土壤水分的影响极显著,这与图 3 的分析结果一致。

表 4 各护坡措施下边坡土壤含水量差值的均值比较 %

差值	菱形植草	铺设草皮	挂网植草	六角空心砖防护
14 日与 13 日	2.1±0.23dD	1.2±0.17dD	1.3±0.20dD	1.2±0.13dD
15 日与 14 日	4.2±0.20cC	2.7±0.46cC	3.6±0.20cC	2.5±0.55cC
16 日与 15 日	6.2±0.26bB	5.2±0.19bB	5.7±0.36bB	4.8±0.29bB
16 日与 13 日	12.5±0.67aA	9.2±0.78aA	10.6±0.75aA	8.5±0.93aA

注:平均值±标准误,同一列小写字母不同表示在 $p=0.05$ 水平下差异显著;(3)同一列大写字母不同表示在 $p=0.01$ 水平下差异显著,下表同。

由表 5 可知,各护坡措施下土壤含水量差值变化规律表现为随时间变化而逐渐增大,这与表 4 的分析结论一致。对于变异程度而言,均表现出了菱形植草>挂网植草>草皮防护>六角防护的规律,其中 14 日与 13 日相比,菱形植草与其余三种措施间差异显著($p<0.05$),而其余三种措施间差异不显著;15 日与 14 日相比,菱形植草与挂网植草间及草皮防护与六角防护间差异不显著,但都与另外两种措施间存在显著差异($p<0.05$);16 日与 15 日相比,同样表现出了菱形植草与挂网植草间及草皮防护与六角防护间的差异不显著,但草皮防护与挂网植草不显著而与菱形植草显著($p<0.05$),六角防护则与这两种措施都显著($p<0.05$)。主要是因为菱形植草坡面植被状况不佳,以及较强太阳辐射能,使坡面水分耗散量一直处于较高水平,而其余三种护坡措施均具有较好的植被盖度,水分不易损失;随着雨后干旱天数增加,太阳辐射能的摄入引起水分直接蒸发,同时植被吸水蒸腾消耗较多水分,因此挂网植草防护坡面水分与菱形植草差异出现不显著状况;对于六角防护与草皮防护而言,辐射能较挂网植草少,同时草种类型较少,植被生长需水量相对偏少,因此两措施间差异不显著,而与挂网植草间存在显著差异;到了雨后干旱第四天,挂网植草与草皮防护差异不显著,原因是挂网植草坡面坡度较大,平均 32° ,坡面保持的水分不多,于是植被生长吸水、水分下渗和蒸发耗水等过程受到一定限制,水分损失量增加减缓,而对于草皮防护来说,整个边坡的中下部水分条件较好,含水量充足,植被吸水量、水分下渗、蒸发量逐渐增大,因此耗水量较大;考虑到六角砖对坡面降水入渗具有一定限制作用,植被可利用的水分较少,加上坡面较好的防护模式,水分损失量始终处于最低水平。总体看来,坡面土壤水分变异程度从大到小依次为 $LX(12.5\%)>GW(10.$

2.2.2 土壤含水量在各措施间的变化特征 为充分比较 4 种护坡措施坡面土壤水分在观测期的变异程度大小,以评价各项措施的保水效果,将各坡面的土壤含水量相邻两天的差值进行比较,并做差异显著性分析,结果见表 5。

6%)>CP(9.2%)>LJ(8.5%),其中菱形植草与其余三种措施间以及挂网植草与六角防护间均差异显著($p<0.05$),草皮防护与这两种措施均未达到显著水平,说明六角空心砖配合紫穗槐灌木和小火炬草本植被的护坡形式在四种措施中保水效果最好。

表 5 各护坡措施间边坡土壤含水量差值比较 %

差值	菱形植草	铺设草皮	挂网植草	六角空心砖防护
14 日与 13 日	2.1±0.19a	1.2±0.20b	1.3±0.23b	1.2±0.14b
15 日与 14 日	4.2±0.17a	2.7±0.52b	3.6±0.23a	2.5±0.63b
16 日与 15 日	6.2±0.21a	5.2±0.18bc	5.7±0.41ab	4.8±0.33c
16 日与 13 日	12.5±0.56a	9.2±0.88bc	10.6±0.87b	8.5±1.07c

3 结 论

(1) 在各项护坡措施下,坡面土壤含水量均表现为坡下>坡中>坡上的规律,土壤水分在坡面的分异规律明显,有利于指导边坡防护的植被种类选择及后期抚育管理。

(2) 在 13 日、14 日的测量中,坡面土壤含水量在菱形植草与其余三种措施间差异显著($p<0.05$),而其余三种措施间差异不显著,其大小顺序均为 $CP>GW>LJ>LX$;在 15 日、16 日的测量中,土壤含水量在菱形植草与其余三种护坡措施间差异仍然显著($p<0.05$),草皮防护与挂网植草间也达显著水平($p<0.05$),而六角防护与草皮防护和挂网植草间均未达到显著水平,其大小顺序均为 $CP>LJ>GW>LX$,这是受边坡坡向、坡度等地形因子以及护坡植被的类型、盖度等植被因子综合作用的结果。

(3) 在同一坡面情况下,六角空心砖防护坡面 CV 表现为坡上>坡下>坡中,其余三种护坡措施 CV 均表现为坡上>坡中>坡下;各种护坡措施土壤含水量变异程度随时间变化表现为 $LX(12.5\%)>GW(10.6\%)>CP(9.2\%)>LJ(8.5\%)$,其中菱形植

草与其余三种措施间以及挂网植草与六角防护间均差异显著($p<0.05$),草皮防护与这两种措施均未达到显著水平;六角空心砖配合紫穗槐灌木和小火炬草本植被的护坡形式保水效果较好。

参考文献:

[1] 邓辅唐,吕小玲,喻正富,等.高速公路边坡植物群落的水土保持效应[J].中国水土保持,2007(5):43-46.

[2] 卓慕宁,李定强,郑煜基.高速公路生态护坡技术的水土保持效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):164-167.

[3] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等.公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J].农业工程学报,2013,29(5):63-70.

[4] 周显广.公路边坡坡面防护效益研究[D].西安:长安大学,2011.

[5] 杨振.黑龙江公路路堑边坡水土保持措施效果研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2008.

[6] 答竹君,艾应伟,宋婷,等.道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析[J].水土保持通报,2011,31(1):72-75.

[7] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126.

[8] 张庆,牛建明,韩芳,等.不同坡位植被分异及土壤效应:

以内蒙古短花针茅草原为例[J].植物生态学报,2011,35(11):1167-1181.

[9] Garten C T, Huston M A, Thoms C A. Topographic variation of soil nitrogen dynamics at Walker Branch Watershed, Tennessee[J]. Forest Science, 1994,40(3):497-512.

[10] 徐娟,余新晓,席彩云.北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(3):189-193.

[11] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].水土保持学报,1998,4(2):23-28.

[12] 康艳萍,曲森.浅议公路土质边坡植树(紫穗槐)防护技术[J].黑龙江交通科技,2007,30(9):58-58.

[13] 卢鑫,周向睿,杜明新,等.不同年龄紫穗槐对沙化土壤的改良效应[J].草业科学,2013,30(07):994-1001.

[14] 李军健,吕刚,黄建国.紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征[J].西南农业大学学报,2006,28(1):161-164.

[15] 张摇川.喀斯特坡面表层土壤含水量,容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.

[16] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J].水科学进展,2006,17(1):74-81.



(上接第 76 页)

[11] Ao C, Yang P, Ren S, et al. Efficacy of granular polyacrylamide on runoff, erosion and nitrogen loss at loess slope under rainfall simulation [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(6):1-10.

[12] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.

[13] 张佳琪,王红,代肖,等.坡度对片麻岩坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):1-5.

[14] 张佳琪,王红,代肖,等.坡度对片麻岩坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):1-5.

[15] 徐国策,李鹏,成玉婷,等.模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流磷素流失特征[J].水土保持学报,2013,27(6):6-10.

[16] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地土壤地下侵蚀

模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(6):7-13.

[17] 任秀文,李开明,刘爱萍,等.模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J].中国环境科学,2013,33(2):119-124.

[18] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J].山地学报,2010,28(4):415-421.

[19] 水建国,柴锡周,张如良.红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):33-36.

[20] 马广玉,李嘉薇,方青青,等.模拟降雨条件下典型土壤的可蚀性与养分流失特征[J].生态学杂志,2015,34(8):2267-2273.

[21] 郭新送,宋付朋,高杨,等.模拟降雨对 3 种类型土壤氮,磷素空间分布及其颗粒组成的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):41-45.