水　利　学　报

2019年9月　SHUILI　XUEBAO　第50卷　第9期

文章编号:0559-9350(2019)09-1078-08

植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析

杨春霞[1]，姚文艺[1]，肖培青[1]，秦东远[2]

（1. 黄河水利科学研究院 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室，河南 郑州 450003；
2. 华北水利水电大学，河南 郑州 450036）

摘要：利用野外模拟降雨试验，以自然修复草本植被完整覆盖、地表覆盖、高层覆盖和无覆盖有根系等4种不同垂直覆盖结构为研究对象，分析了植被不同垂直结构对坡面产流产沙的影响作用。研究表明：(1)不同垂直覆盖结构条件下的坡面产流产沙特征差异明显，以无覆盖有根系坡面作对照，完整覆盖、地表覆盖及高层覆盖结构减流率分别为91.12%、83.28%和61.55%，减沙率分别为98.71%、96.10%和64.69%，完整覆盖结构对产流产沙过程的抑制作用最强；(2)试验条件下，植被完整覆盖、地表覆盖和高层覆盖可截留降雨1.85、1.01和0.84 mm，场次降雨截留率分别为1.73%、1.09%和0.90%；(3)坡面径流特征与植被覆盖结构有关，试验条件下，与无覆盖有根系坡面相比，完整覆盖、地表覆盖、高层覆盖坡面流速分别降低66.69%、53.47%和19.21%，径流深降低66.70%、51.17%、39.38%。植被垂直结构是影响坡面产流产沙的重要因素，仅用单一的覆盖指标难以充分反映植被对水沙的调控作用。研究成果对于定量评价不同植被覆盖结构的减水减沙作用有参考价值。

关键词：植被覆盖结构；完整覆盖；地表覆盖；无覆盖有根系；野外模拟降雨

中图分类号：S157　**文献标识码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20190003

1　研究背景

退耕还林草措施实施以来，植被覆盖结构及下垫面土壤理化性质发生了显著变化，植被增加降雨入渗、拦蓄径流、降低侵蚀动能、减少土壤侵蚀作用更突出。苗连朋等[1]通过对延河流域的植被分析指出，人工植被和自然恢复植被的减水减沙效益占人类活动贡献的71.91%和39.26%，且自然恢复植被减水减沙比重增大。同时，有关研究初步表明[2-3]，人为干扰少、覆盖结构完整的自然修复植被具有更明显的蓄渗能力和减水减沙作用。黄河流域近期水沙变化趋势与流域水土保持措施实施效果密切相关，流域下垫面植被覆盖条件改善，对坡面产汇流及产输沙过程均有显著影响，给变化条件下的水沙锐减及植被措施减水减沙效益跟踪评价研究提出了新的要求[4-5]。结合新的侵蚀环境条件，辨析植被覆盖变化对水沙关系的影响及其减水减沙机制及植被对侵蚀能力的消减作用等是黄土高原植被建设与管理的基础科学问题。

植被作为重要的水土保持措施对区域产水产沙及水沙关系有重要影响[1,4-6]，以往研究成果多从植被覆盖类型和植被覆盖度大小角度开展研究[1,3,7]，并取得重要研究成果。张琪琳等[8]通过对已有成果进一步分析发现，不同学者得出的土壤侵蚀与植被盖度间函数关系可能与植被类型覆盖结构等不同

收稿日期：2019-01-01；网络首发时间：2019-09-23

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190923.1128.001.html

基金项目：河南省创新型科技人才队伍建设工程(162101510004)；国家自然科学基金项目(41701326，41571276)；水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题(201601)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2019-14)

作者简介：杨春霞(1977-)，高级工程师，主要从事土壤侵蚀及水土保持应用技术研究。E-mail：yangchx312@126.com

通讯作者：姚文艺(1957-)，教授级高级工程师，主要从事土壤侵蚀与水土保持、河流泥沙等研究。
E-mail：wyyao@yrihr.com.cn

有关。植被不同部位的水土保持作用机理及贡献率不同，有学者将植被的作用分为地上部分和地下部分进行阐述[9-13]，例如于国强等[10]通过野外标准小区不同植被类型地上植被处理研究了植被水土保持作用与植被覆盖特点的关系。张晓艳等[9]研究指出地上部分的作用主要表现为降低侵蚀功率、降雨侵蚀力、水动力学特性，地表植被冠层拦截降雨径流，地下部分主要从改善土壤入渗、增强土壤抗剪指标，各层作用依次叠加，产流及径流动能依次消减；同时发现植被覆盖特点不同，临界覆盖度的大小表现不同。然而，植被垂直结构对水沙过程影响的研究尚处于起步阶段，关于同一植被不同覆盖层次结构对降雨及侵蚀产沙的调控作用尚有待进一步研究。因此，本研究根据野外自然修复草本植被人工模拟降雨及植被截留试验，研究植被垂直覆盖层对径流泥沙的影响及调控机理，以期为植被修复实践及植被侵蚀动力学发展提供支撑。

2 试验设计与方法

2.1 试验小区及下垫面条件 研究区位于甘肃省天水市罗玉沟试验场，地理坐标为东经105°42′55″、北纬34°36′45″，地处渭河南岸籍河支流的罗玉沟小流域。该流域属于黄土丘陵沟壑区第三副区，区内坡度较缓，小于15°的坡面占总面积的48.4%，大于25°的坡面占23.6%。2016年5月在原始坡面新建10个径流小区，小区设计尺寸为10 m×2 m，四周用瓷砖密封，建设过程中尽量不破坏原坡面植被。经调查，试验小区土壤为低液限黄土，土壤容重为1.24 ~ 1.28 g/cm^3，土壤颗粒以0.075 ~ 0.005 mm粒径居多，占69.5%，大于0.075 mm的颗粒仅占1.2%，小于0.005 mm的颗粒占29.3%。坡面植被群落组成主要有小冠花(Coronilla varia)、龙须草(Juncus effusus)和少量青蒿(Artemisia carvifolia)等；植被覆盖及地上生物量受水分条件影响较明显，试验数据采集于2017年7—8月，试验时各径流小区已自然生长为包括近地表覆盖、地上覆盖完整且高低错落的群落结构，龙须草匍匐茎叶近地表生长、植株拔节高度约40 cm，抽穗高度80 ~ 100 cm，小冠花藤状茎穿插其中，株高40 cm左右，间杂稀疏蒿草，株高100 ~ 120 cm。地表以上立体覆盖完整，总体覆盖度达85%左右。为研究植被垂直覆盖结构对径流泥沙的调控作用，选择10个小区中植被群落结构和覆盖度最为相似的4个小区分别设置4种植被垂直覆盖结构。其中，完整覆盖指包括地上植株层、近地表层和根系层的原状植被；高层覆盖指清除近地表层5 cm范围内茎叶、枯枝层后由地上植株层和根系层组成的植被结构；地表覆盖是指剪除地表5 cm以上植株层，只保留根系层和近地表层；无覆盖有根系层指清除地表以上所有覆盖、不扰动地表及以下根系层，各覆盖组地下根系情况相近。植被覆盖结构示意见图1。

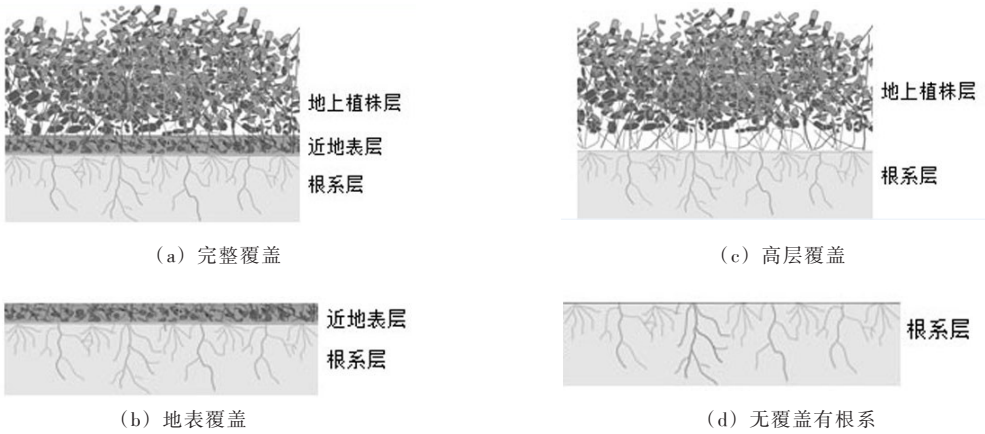

图1 植被垂直覆盖结构示意图

2.2 试验装置 降雨设备为下喷式可移动自动控制降雨系统，该系统核心部分由控制系统、采集系统、供水系统和智能终端组成，其中控制系统包括降雨喷头、压力管道、水泵等，通过主控器和自带WIFI信号调节降雨喷头、水泵开度及管道压力，可实现15 ~ 200 mm/h的雨强连续变化。其中，大、中、小3种型号的喷头可单独或自由组合，喷头喷洒范围相互叠加，降雨均匀度大于75%；采集

系统由自计雨量计、压力传感器、风速仪组成，可实时采集并显示雨量、雨强、风速及压力等参数；供水系统由蓄水池、水泵及供水管道组成；智能终端用于人机交互，通过系统自建的WIFI信号与控制系统连接，借助系统自带的软件在移动设备上记录并保存降雨过程数据，并实时控制或查看整个降雨过程。整个降雨系统通过支架支撑，外挂聚酯纤维挡风网以防自然界风的影响，通过缆绳可调整防风网和压力管道高度，试验时喷头距地面高度约为4 m。降雨器有效模拟范围为3 m×12 m，模拟降雨在雨强、雨滴落速、雨滴大小等方面与天然降雨有80%以上的相似度。试验装置见示意图2。

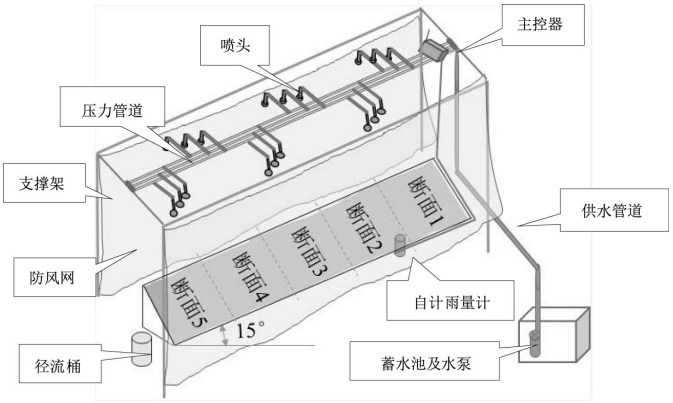

图2　试验装置示意图

2.3　试验设计及参数采集　参考黄土高原侵蚀性降雨标准和试验区大概率暴雨事件，以及目前常用的模拟雨强，试验设计雨强90 mm/h，降雨总历时为坡面产流后再继续降雨1 h。由于不同覆盖结构坡面产流时间差异，各试验组次最终雨量、雨强等参数以自计雨量计和降雨总历时为准推算。根据土壤含水量动态监测结果，以保证不同覆盖结构坡面试验时土壤含水量无明显差异，并于试验前用ML2X便携式土壤水分仪测量土壤前期含水量，试验组次见表1。

表1　试验组次

编号	植被覆盖结构	降水量/mm	平均雨强/(mm·h^{-1})	前期含水量/%	备注
a	完整覆盖	107	89.12	23.36	原状植被，包括地上植株层、近地表层和根系层
b	地表覆盖	92.4	86.63	23.40	剪除地表5cm以上植株层，包括近地表层和根系层
c	高层覆盖	92.8	85.66	19.83	清除近地表层5cm范围内茎叶，包括地上植株层和根系层
d	无覆盖有根系	93.2	89.47	25.47	清除地表及以上所有覆盖，仅包括根系层

降雨器开启即开始计时，至小区出流口有径流流出的时间间隔为产流历时。产流开始即用径流桶接取径流泥沙样，采集间隔为每5 min一轮；采取称重、体积测量和自然风干法分析产流量和产沙量。将坡面从上至下分成5个观测断面(图2)，断面间距为2 m。试验过程中，每5 min内用染色法测量各断面径流流速，用直尺法辅助测量径流宽深各2个组次，每个断面至少测量两次并取其算数平均值。

结合植被结构处理，分别采集地表层5 cm范围内枯枝及茎叶层、5 cm以上植株层进行生物量称量和持水量试验。根据已有研究的做法[14]，泡水时间取10 h，取出用滤网控水至不滴水时称量生物持水量，称重所用天平精度为0.01g。采集样方大小为30 cm×30 cm，每个坡面采集不少于10个样方点，用于推算单位面积上生物持水量。

2.4　数据处理方法　染色法测定的各断面径流流速为坡面流表层最大流速，计算时用实测流速乘以修正系数作为径流平均流速。修正系数大小受流态、径流深、阻力大小等影响[15]，本研究综合下垫面条件、坡面流态分布情况，修正系数取0.75[16-17]。

坡面流水深较薄，为弥补直尺测量的误差，同时采取径流推算方式(式1)获取坡面流水深参数[17]：

$$h=\frac{q}{U}=\frac{Q}{UBt} \tag{1}$$

式中：q为单宽流量，ml/(cm·min)；Q为t时段内的径流量，ml；t为径流取样间隔时间，min；U为断面平均流速，cm/min；B为过水断面宽度，cm。

3 结果与分析

3.1 不同垂直覆盖结构下的坡面产流产沙特征 降雨产流后的一个小时降雨过程中，不同垂直覆盖结构的坡面总产流量、总产沙量差别明显，均表现为完整覆盖 < 地表覆盖 < 高层覆盖 < 无覆盖有根系。以无覆盖有根系组作为对照，完整覆盖结构减流减沙率分别为91.12%和98.71%，地表覆盖结构减流减沙率分别为83.28%和96.10%，高层覆盖结构的减流减沙率分别为61.55%和64.69%，可见植被覆盖层不同，其减水减沙作用是不同的。由于不同覆盖结构坡面产流时间不同，用单位降雨产流和单位降雨产沙表征不同覆盖结构坡面场次产流产沙能力，由表2可见，依然是完整覆盖结构的单位降雨产流量和单位降雨产沙量最低，其次为地表覆盖结构，而高层覆盖结构的单位降雨产流、产沙量明显增加，无覆盖有根系结构的单位降雨产流产沙量最高，也直观反映出不同植被覆盖结构对降雨产流产沙调控作用不同。

借用植被作用系数的概念，以无覆盖有根系结构的单位降雨产流量、单位降雨产沙量与其他各覆盖结构组次的比值作为该覆盖结构的植被覆盖作用系数，分析表明(表2)，完整覆盖植被对坡面产流、产沙的作用系数最高，分别为12.93和89.17；地表覆盖对坡面产流、产沙的作用系数次之，分别为5.93和25.44；高层覆盖对坡面产流、产沙的作用系数最低，分别为2.59和2.82，也表明不同覆盖结构对产流产沙的调控作用差别较大，完整覆盖草被结构对坡面产流产沙的调控作用最明显，同时也印证了植被的减流效益弱于其减沙效益[6,18]。

表2 不同覆盖结构坡面产流产沙特征

编号	植被覆盖结构	产流				产沙			
		总产流/L	减流率/%	单位降雨产流/(L·mm^{-1})	产流作用系数	总产沙/g	减沙率/%	单位降雨产沙/(g·mm^{-1})	产沙作用系数
a	完整覆盖	89.25	91.12	0.83	12.93	36.8	98.71	0.34	89.17
b	地表覆盖	168.07	83.28	1.82	5.93	111.4	96.10	1.21	25.44
c	高层覆盖	386.59	61.55	4.17	2.59	1009.2	64.69	10.88	2.82
d	无覆盖有根系	1005.35		10.79		2858.3		30.67	

一般来说，累计产流量和累计产沙量均随降雨量的增加而呈增加趋势，但在不同植被结构下，累计产流、累计产沙随降雨量增加而增加的趋势是不同的，无覆盖有根系坡面的产流产沙量增加幅度最大，其次为植被高层覆盖坡面，地表覆盖和完整覆盖坡面的产流产沙过程增加趋势较以上两种覆盖结构明显变缓，其中完整覆盖坡面结构对坡面的产流产沙过程的影响更突出(图3)。

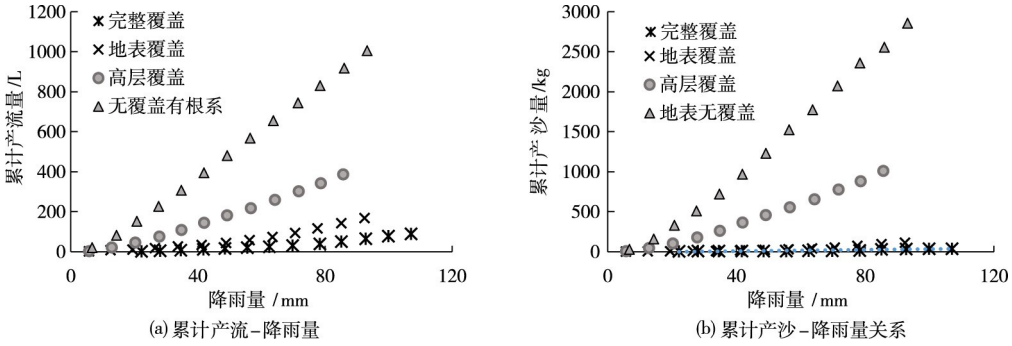

图3 不同覆盖结构对坡面产流产沙过程的影响

为识别不同覆盖结构坡面产流产沙过程的差异性，采取Excel中“F-检验双样本方差分析”的方法研究不同覆盖结构坡面产流产沙过程的差异显著性，结果见表3。对于产流过程而言，完整覆盖与无覆盖有根系、地表覆盖与无覆盖有根系间差异极显著，完整覆盖与地表覆盖、完整覆盖与高层覆盖之间均有显著差异，地表覆盖和高层覆盖、高层覆盖和无覆盖有根系两组间无显著差异；对于产沙过程而言，完整覆盖和地表覆盖之间呈显著差异，其他覆盖结构间产沙均表现出呈极显著差异。不同覆盖结构间产流产沙过程差异性的不同表现也说明植被垂直覆盖结构对产流产沙过程的影响作用不同。结合图3中4种覆盖结构累计产流产沙量与降雨量的关系分析可知，完整覆盖及地表覆盖结构对坡面产流产沙过程调控作用是比较明显的。

表3　4类覆盖结构坡面产流产沙过程差异性检验结果

组次编号	产流过程				产沙过程			
	a完整覆盖	b地表覆盖	c高层覆盖	d无覆盖有根系	a完整覆盖	b地表覆盖	c高层覆盖	d无覆盖有根系
a完整覆盖								
b地表覆盖	0.015*				0.028*			
c高层覆盖	0.001*	0.107			2.412×10^{-9}**	1.849×10^{-6}**		
d无覆盖有根系	5.099×10^{-6}**	0.004**	0.075		1.603×10^{-13}**	1.562×10^{-10}**	0.006**	

备注：1.表中数据为“F-检验 双样本方差分析”结果中$P(F\leqslant f)$摘录；2.标**为极显著，标*为显著，未标的为不显著。

3.2　不同植被覆盖结构的截留作用　植被地表和地上植株覆盖具有截留降雨的作用，可以降低有效降雨量和坡面产流量，从而对降雨产流过程具有调控作用。根据植被持水量试验和样方生物量调查结果，同时结合已有研究成果[19]，鉴于降雨试验和天然降雨条件下植被一般不具备长时间浸水条件，降雨条件下的植被持水量约为浸水试验条件下的85%，因此采取0.85作为调整系数，推算不同植被覆盖结构持水量(表4)。

表4　不同植被覆盖结构持水量分析

覆盖类型	地上植株覆盖		地表覆盖		总持水量/(ml·m^{-2})	截留降雨/mm	截留量/L	降雨初损率/%
	生物量/(g·m^{-2})	持水量/(ml·m^{-2})	生物量/(g·m^{-2})	持水量/(ml·m^{-2})				
完整覆盖	1356.67	986.7	830.37	1187.4	2174.18	1.85	36.96	1.73
地表覆盖			830.37	1187.4	1187.4	1.01	20.19	1.09
高层覆盖	1356.67	986.7			986.7	0.84	16.77	0.90
无覆盖有根系								

在试验条件下，完整覆盖结构截留量为36.96 L，相当于截留降雨1.85 mm；地表覆盖结构截流量20.19 L，相当于截留降雨1.01 mm；高层覆盖结构截留量为16.77 L，相当于截留降雨0.84 mm。用截留降雨量占总雨量的比率作为截留降雨率，则完整覆盖、地表覆盖和高层覆盖3种覆盖结构坡面的场次截留降雨率分别为1.73%、1.09%和0.90%。初步研究表明，试验区的自然修复草被次降雨截留量比一般林冠层的截留量3～10 mm偏少[20-21]，比冬小麦开花灌浆期的冠层截留量0.6～0.65 mm略高[22]，与呼伦贝尔草场休牧期的截留量0.96 mm相当[21]，植被截留作用的强弱受植被类型、地上和地表生物量、前期含水率等多种因素影响，因此研究不同植被结构的截留作用对预测降雨产流具有重要意义。

3.3　植被结构对径流水力特征的影响　径流流速和径流深是表征径流水动力学特性的主要参数。径流功率和单位水流功率都是流速V和径流深h的函数[23]，因而，不同植被结构下坡面径流水力特性的差异，可以反应植被覆盖结构对产流产沙的动力调控作用。

从坡面产流开始，将每次观测到的不同断面的坡面径流流速进行平均，不同覆盖结构坡面的径流流速依次为完整覆盖最低，为0.10 m/s；其次为地表覆盖坡面，为0.15 m/s；高层覆盖坡面第三，

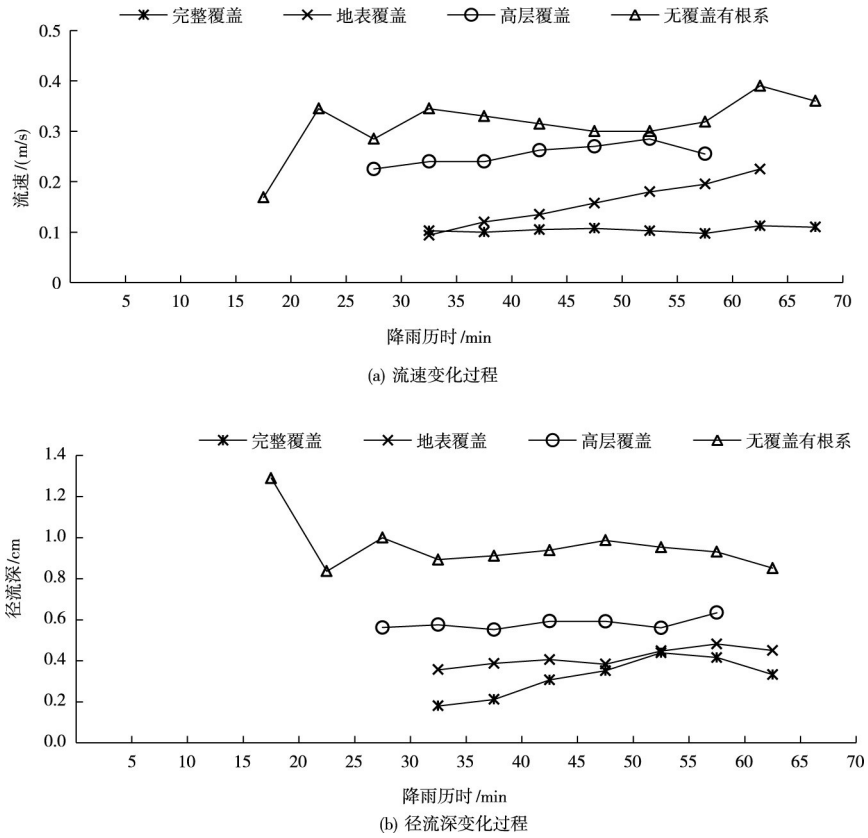

图4　不同覆盖结构坡面径流过程

为0.25 m/s；无覆盖有根系坡面最大，为0.31 m/s(图4)。产流初期，坡面径流量较小，坡面流速不容易测到，所以除无覆盖有根系坡面外，其他覆盖结构坡面产流初期无流速数据点。

坡面径流流速过程线也明确显示，无覆盖有根系坡面径流流速过程线最高，其次为高层覆盖坡面，这两种坡面由于没有地表覆盖，对径流的阻滞作用较弱。同样降雨条件下，与无覆盖有根系坡面相比，完整覆盖、地表覆盖、高层覆盖坡面分别降低流速66.69%、53.47%和19.21%，降低径流深66.70%、51.17%、39.38%。与高层覆盖坡面相比，完整覆盖、地表覆盖分别可降低流速58.77%和42.41%，降低径流深45.06%、19.44%。而就地表覆盖坡面而言，完整覆盖坡面的流速和径流深也分别降低了28.42%和31.80%。说明不同覆盖结构对坡面径流的抑制作用不同，完整的草被覆盖坡面对径流流速的调控作用更明显，其次是地表覆盖结构，这也和易婷等[24]通过野外放水冲刷试验研究得出的退耕草地根系、生物结皮、植物茎秆及其枯落物层的依次叠加作用使水流流速依次递减的结论相吻合。

通过对不同覆盖结构坡面流速流深差异显著性分析表明，完整覆盖结构相对于地表覆盖结构坡面，流速流深差异性极其显著，地表覆盖相对于无覆盖有根系坡面差异明显，高层覆盖相对于无覆盖有根系坡面差异明显，高层覆盖相对于无覆盖有根系坡面差异明显。说明不同植被覆盖结构坡面流速流深差异显著，植被覆盖通过削减坡面流速流深对降雨产流、侵蚀产沙及水沙关系进行调控。

3　结论

以野外自然修复草被坡面为研究对象，通过人工降雨试验和不同覆盖层次垂直结构下的坡面产流产沙特征进行了分析，得出以下结论：

(1)植被覆盖垂直结构不同，坡面产流产沙特征和植被减水减沙作用差别明显。同为自然修复草被，以无覆盖有根系坡面作对照，完整覆盖、地表覆盖及高层覆盖结构减流率分别为91.12%、

83.28%和61.55%，减沙率分别为98.71%、96.10%和64.69%。覆盖结构越完整，植被的减水减沙作用越明显，地表覆盖作用比高层覆盖大。

(2)植被垂直结构中不同层次均有截留降雨和减缓径流的作用，完整覆盖结构对降雨径流的截留作用更突出。

(3)不同植被覆盖垂直结构能显著降低径流流速和流深，进而降低坡面侵蚀动能，起到减水减沙作用。不同植被覆盖层对径流流速和流深的抑制作用从大到小分别为完整覆盖 > 地表覆盖 > 高层覆盖，植被覆盖结构越完整，对下垫面径流的抑制作用明显。

植被垂直覆盖各层次间调控产流和产沙的机理及作用大小不同，研究不同覆盖结构对降雨、径流及产沙的调控作用，对于鉴别评价不同植被及植被结构的减水减沙作用的研究具有重要作用，对植被恢复重建及管护等生产实践工作也有理论指导意义。

参 考 文 献：

[1] 苗连朋，温仲明，张莉．植被变化与水沙响应关系研究—以延河流域为例[J]．干旱区资源与环境，2015，29(5)：75-81．

[2] 李鹏，崔文斌，郑良勇，等．草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]．中国水土保持科学，2006，4(1)：55-59．

[3] 杨春霞，李永丽，李莉，等．自然修复草被对坡面径流的阻滞作用研究[J]．人民黄河，2014，36(8)：94-96．

[4] 胡春宏，张晓明．论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]．水利学报，2018，49(9)：1028-1039．

[5] 姚文艺，冉大川，陈江南．黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]．水科学进展，2013，24(5)：607-616．

[6] 綦俊谕，蔡强国，蔡乐，等．岔巴沟、大理河与无定河水土保持减水减沙作用的尺度效应[J]．地理科学进展，2011，30(1)：95-102．

[7] 朱冰冰，李占斌，李鹏，等．草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]．土壤学报，2010，47(3)：401-407．

[8] 张琪琳，王占礼，王栋栋，等．黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]．地球科学进展，2017，32(10)：1093-1101．

[9] 张晓艳，周正朝．黄土高原地区草地植被调控水蚀机理的研究进展[J]．草业科学，2015，32(1)：64-70．

[10] 于国强，李占斌，李鹏，等．不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]．水科学进展，2010，21(5)：593-599．

[11] 张光辉．退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]．中国水土保持科学，2017，15(4)：143-154．

[12] 肖培青，李艳霞，苏广旭，等．植被坡面产流特征及其侵蚀动力研究进展[J]．人民黄河，2016(10)：115-118．

[13] 朱智勇，解建仓，李占斌，等．坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]．水土保持学报，2011，25(5)：1-7．

[14] 召青，张卫强，殷祚云，等．四种人工林枯落物持水特性[J]．广西林业科技，2012，28(4)：5-10．

[15] 赵春红，高建恩，王飞，等．阻力形式对坡面流流速修正系数的影响[J]．农业机械学报，2013，44(10)：130-135．

[16] 肖培青，姚文艺，申震洲，等．苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]．水利学报，2011，42(2)：232-237．

[17] 潘成忠，上官周平．牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]．水利学报，2005，36(3)：371-377．

[18] 肖培青，姚文艺，王昌高．灌木减流减沙效应及其水力学机理试验研究[J]．泥沙研究，2012(10)：33-37．

[19] 周祥，赵一鹤，张洪江，等．云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J]．生态环境学报，2011，20(2)：248-252．

[20] 刘文杰，张一平，刘玉洪，等．热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究[J]．生态学报，2003，23(11)：2379-2386．

[21] 樊才睿，李畅游，贾克力，等．不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留[J]．生态学报，2015，35

(14): 4716-4724.
[22] 王庆改，康跃虎，刘海军. 冬小麦冠层截留及其消散过程[J]. 干旱地区农业研究，2005，23(1): 3-8.
[23] 苏远逸，李鹏，李占斌，等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. 水土保持学报，2017，31(5): 32-39.
[24] 易婷，张光辉，王兵，等. 退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J]. 山地学报，2015，33(4): 434-440.

Effects of vegetation cover structure on runoff and sediment yield and its regulation mechanism

YANG Chunxia[1], YAO Wenyi[1], XIAO Peiqing[1], QIN Dongyuan[2]

(1. *Institute of Yellow River Hydraulic Research, Key Laboratory of Yellow River Sediment Research of Ministry of Water Resources, Zhengzhou* 450003, *China*;
2. *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou* 450036, *China*)

Abstract: Using simulated rainfall experiment in the field, the effects of different vertical structures of natural remediation grass vegetation on sediment yield on slope were analyzed, including undisturbed vegetation cover, surface cover, vegetation cover above the surface and with root layer only without covers above. The experiment results showed that: (1) The characteristics were obviously different of runoff and sediment yield from different coverage structures on slope. Taking the slope with root layer only without covers above as a contrast, the runoff reduction rates of undisturbed vegetation cover, surface cover and vegetation cover above the surface were 91.12%, 83.28% and 61.55%, and the sediment reduction rates were 98.71%, 96.10% and 64.69%, respectively. The undisturbed vegetation cover has the stronger inhibitory effect on runoff and sediment yield. (2) Under 90 mm/h rainfall simulation conditions, 3 kinds of vegetation cover structure including undisturbed vegetation cover, surface cover and vegetation cover above the surface could intercept rainfall of 1.85 mm, 1.01 mm and 0.84 mm respectively, and the interception rates were 1.73%, 1.09% and 0.90% in one simulated rainfall. (3) The characteristics of slope runoff were related to the structure of vegetation cover. Under the experimental conditions, compared with the slope with root layer only without covers above, the flow velocities on the slopes with undisturbed vegetation cover, surface cover and vegetation cover above the surface were decreased by 66.69%, 53.47% and 19.21%, respectively, and the runoff depths were decreased by 66.70%, 51.17% and 39.38%, respectively. Vertical structure of vegetation is an important factor to analyze the influence of vegetation on runoff and sediment yield on slopes. It is difficult to fully reflect the regulating effect of vegetation on water and sediment only using a single coverage index. The results provide conditions for quantifying the different vegetation cover structure of runoff and sediment reduction.

Keywords: vegetation cover structure; undisturbed vegetation cover; surface cover; with roots but no cover; simulated rainfall in the field

（责任编辑：祁　伟）