

黄土丘陵沟壑区人工草地减沙水代价分析

严丽¹, 蒋碧¹, 庄需印¹, 王飞²

(1. 衢州市水利水电勘测设计有限公司, 浙江 衢州 324000;

2. 西北农林科技大学 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以裸坡农地为对照,根据黄土丘陵沟壑区三大副区人工草地径流小区多年的观测资料,系统分析了黄土丘陵沟壑区人工草地减沙水代价(R_{rs})特征及其与各影响因素之间的关系。结果表明:人工草地在不同地区其平均 R_{rs} 存在差异,且变化幅度较大,整体上丘陵沟壑第二副区大于第一副区和第三副区;不同牧草轮作下条播草木樨的 R_{rs} 最大,较自然草坡高 25%,其 R_{rs} 表现为:条播草木樨>撒播苜蓿>草木樨>苜蓿>自然草坡;草田带状间轮作的 R_{rs} 表现为:草木樨/农作物>苜蓿/农作物,且草田带状间轮作的 R_{rs} 明显高于牧草轮作;人工草地 R_{rs} 与汛期降水量、侵蚀模数呈较好的指数反比关系,与最大 30 min 降雨强度(I_{30})呈线性反比关系。

关键词:黄土丘陵沟壑区;人工草地;减沙水代价;径流;泥沙

中图分类号:P333.4;S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0062-05

Cost for Runoff and Sediment Control of Artificial Grassland at the Plot Scale in the Loess Hill and Gully Region

YAN Li¹, JIANG Bi¹, ZHUANG Xuyin¹, WANG Fei²

(1. Quzhou Design Co., Ltd. of Water Conservancy & Hydropower, Quzhou,

Zhejiang 324000, China; 2. Institute of Soil, Water Conservation, Northwest A & F

University, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The study was conducted to compare cost for water and sediment control (R_{rs}) of different artificial grasses based on perennially monitoring data of loess hill and gully region and the bare slope set as control. And then the characteristics of R_{rs} of artificial grass and the relations among various influence factors were systematically analyzed. The results showed that the average R_{rs} of the artificial grass were different in different regions and had large differences, the average R_{rs} of the artificial grass of the second sub-region of hill and gully area of the Loess Plateau is greater than the first and the third sub-regions; for different forage managements, R_{rs} of sweet clover rotation is 25% greater than that of the natural grass slope. The R_{rs} of forages decreased in the order: drilling *Melilotus suaveolwna* > broadcasting *Medicago sativa* > *Melilotus suaveolwna* > *Medicago sativa* > slope with natural grass. The R_{rs} of grass rotation decreased in the order: *Melilotus suaveolwna* > *Medicago sativa* and it was bigger than that of forage rotation; the R_{rs} of artificial grass and precipitation, soil erosion modulus presented the inverse exponential correlations, R_{rs} of grass measures and I_{30} showed the good inversely linear relationship.

Keywords: loess hill and gully region; artificial grass; cost of water and sediment control; runoff; sediment

水土保持在减少侵蚀的同时对流域径流的影响及其方向是水土流失治理中一个亟待回答的问题。在很长一段时期内,水土保持的效益更多考虑的是保护土地资源,对水资源的影响往往被忽略。20 世纪 80 年代以前只考虑到水土保持有利于雨水资源的充

分利用,而很少考虑水土保持措施对水资源的影响^[1]。然而随着水土保持措施的蓄水拦沙效果开始显现,黄河上中游和下游用水矛盾也越来越突出。同时,为了减轻下游河道淤积,每年的耗用水量较多,这都使得可开采利用的径流资源量相对减少,从而进一

步加剧了水资源供需矛盾^[2-3]。因此,有关黄土高原区域水土保持对黄河流域地表水资源、水环境的影响倍受重视^[3-4],王飞^[5]、曹文洪^[6]提出了在黄土高原应采取具有节水性能的水土保持措施。

人工种草措施在减少土壤侵蚀的同时必然消耗水资源,减少进入河流的径流量^[6-9],但减少的程度是多少尚无定论。有研究表明林草地具有良好的吸水、蓄水与透水能力,一般吸水量为自身重量的2~2.5倍^[10-11],刘元保^[12]、冯浩^[13]等运用人工降雨的方式研究了人工草地、荒草地在黄土性土壤陡坡地上的水土保持效益,这些研究均表明草地的减水减沙效应很明显,且削减径流作用明显弱于减沙作用。然而,长期以来人们都是分开考虑人工草地对径流和泥沙的影响程度,故王飞^[14-15]提出了水土保持措施减沙水代价方法可以更直观地表明人工种草措施对径流和泥沙同步影响的差异。研究人工草地的减沙水代价特征及其区域分异规律,可以增加对黄土丘陵沟壑区人工草地调控径流泥沙能力的认识,为黄土高原水土保持措施类型和区域配置提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 分析资料

用于分析的部分资料为地球系统科学数据共享平台黄土高原区域数据共享运行服务中心的共享资料,根据黄河水利委员会等机构的野外实测资料整理。选取黄土高原绥德辛店沟(1954—1960年)、西峰南小河沟杨家沟(1954—1963年)、天水大柳树沟(1945—1957年)、延安大砭沟(1958—1967年)、绥德韭园沟(1955—1964年)、绥德王茂沟(1961—1964年)、绥德想她沟和小石沟(1960—1961年)、山西离石王家沟(1957—1968年)、黄龙寺沟(1960—1967年)、彬县鸣玉池沟(1960—1964年)以及商县草庙沟(1960—1964年)部分场次人工草地径流小区的基本情况资料,包括径流场汛期径流泥沙资料、逐次径流泥沙测验资料以及降雨量摘录等多年观测资料作为样本资料,系统分析不同牧草轮作、草田轮作的减沙水代价,汛期降雨量、降雨强度和汛期泥沙量与人工草地减沙水代价之间的关系以及人工草地减沙水代价的区域分异规律。径流小区坡度为20°~35°,坡长为10~30 m,小区面积为100~800 m²,小区种植的牧草主要是草木樨(*Medicago sativa*)和苜蓿(*Medicago sativa*),草田带状间作主要是草木樨/玉米(*Zea mays*)、草木樨/糜子(*Panicum miliaceum*)、草木樨/马铃薯(*Solanum tuberosum*)、苜蓿/玉米(*Sativa mays*)、苜蓿/谷子(*Setaria millet*)、苜蓿/扁豆(*Dolichos lablab*),草

地的盖度变化范围为0~100%。主要的播种方式有条播、撒播、草田间作和草田轮作。

1.2 分析方法

(1) 减沙水代价的概念。水土保持措施在减少坡面泥沙的同时,也会减少坡面径流量并影响径流过程,由于不同措施减少径流和泥沙的机理不同,减少单位泥沙时减少的径流量会有所不同。为此,研究者提出水土保持措施减沙水代价概念^[14],用于研究不同措施对径流和泥沙同步影响的差异性。水保措施减沙水代价,是指某项水保措施在减少单位坡面或河道泥沙时减少的径流量。评价指标是减流减沙比(Ratio of detained Runoff and Sediment, R_{rs}),定义为水利、水保措施减少的径流量与减少的泥沙量之比,用下式计算:

$$R_{rs} = R_d / S_d \quad (1)$$

式中: R_{rs} ——减流减沙比(m³/t); R_d , S_d ——某种水利、水保措施减少的径流量(m³)、泥沙量(t)。从定义可以看出, R_{rs} 为揭示水土保持措施对坡面径流和泥沙影响同步性差异的指标, R_{rs} 越大,措施减少单位泥沙时减少的径流量越多,不同措施减少相同径流量时,减少的泥沙量越小。如果考虑河流的水沙组合和黄河流域水资源现状, R_{rs} 小的水土保持措施在减少相同泥沙时对径流量的影响越小,也就是说,在黄河泥沙减少的同时,对径流量与河道水资源的影响就小些,将更有利于水资源在流域内部的再分配。

(2) 分析方法。对于单项措施,减水减沙效益是水土保持措施相对于坡耕地或裸露地减少的径流量和产沙量,而降雨对黄土高原坡面的土壤侵蚀有重要影响。故本文选择0°~30°裸露的农地径流小区(8年248次平均产流量产沙量)作为对照,计算不同降雨条件和年侵蚀模数下人工种草措施相对于裸露地的减水减沙量,按照公式(1)计算,从而得到人工种草措施在各影响因素的交互影响下的减沙水代价并进行相关分析,寻求与其影响因素的关系及种草措施减沙水代价的区域规律。

2 结果与分析

2.1 不同地区坡面人工草地减沙水代价特征

黄河流域人工种草措施在不同地区其减沙水代价(R_{rs})存在一定的差异,其变化幅度较大,其 R_{rs} 最小值和最大值分别为3.57, 10.13 m³/t,差异为2.84倍(表1)。不同区域坡面人工草地减沙水代价同样存在着区域分异特征。处在黄土丘陵沟壑第一副区的绥德辛店沟、绥德韭园沟、绥德想她沟、绥德王茂沟、山西离石王家沟坡面人工草地减沙水代价的平均值为5.85

m³/t,处在黄土丘陵沟壑第二副区的延安大砭沟、黄龙寺沟人工草地减沙水代价平均值为 9.2 m³/t,在黄土丘陵沟壑第三副区的西峰南小河沟和天水大柳树沟,人工草地减沙水代价平均值为 7.02 m³/t,即在黄土丘陵沟壑第一、二、三副区,坡面水土保持措施在减少 1 t 泥沙量的同时平均减少的径流量分别为 5.85、9.2、

7.02 m³。这说明在黄土丘陵沟壑区人工草地减少相同量泥沙时,黄土丘陵沟壑第二副区人工草地对径流的影响较大,黄土丘陵沟壑第一副区对径流的影响较小。分析认为,这与各项措施对坡面径流量和泥沙量影响的同步程度差异有关,也与采取不同的种植方式、选择不同草类、草地的覆盖度等有密切的关系^[16-17]。

表 1 黄土高原不同区域坡面人工草地减沙水代价

		第三副区			第二副区		第一副区				
项目		西峰南	天水大	彬县鸣	延安	黄龙	绥德	绥德	山西离石	绥德	绥德
		小河沟	柳树沟	玉池沟	大砭沟	寺沟	想她沟	王茂沟	王家沟	辛店沟	韭园沟
人 工 草 地	平均/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	9.24	6.36	5.47	10.12	8.28	4.57	3.57	7.26	10.13	3.7
	标准误差	2.42	1.27	1.26	1.64	1.27	2.13	1.45	1.24	1.27	1.34
	标准偏差	9.04	4.03	4.98	3.54	5.43	8.61	3.43	5.75	5.23	3.20
	方差	81.72	16.22	17.46	22.45	32.12	32.46	24.12	33.08	27.39	10.22
	最小值/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	1.09	0.35	3.77	1.32	-0.96	1.64	0.77	0.05	1.32	-2.27
	最大值/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	35.02	12.29	9.67	19.22	37.99	6.84	7.67	30.81	19.22	9.39
	区域平均/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	7.02		9.2	5.85						

2.2 典型人工草地的减沙水代价

牧草较其他农作物而言,其主要特点是种植密度大,因此地表覆盖度大,而且土壤表层内根系发达,不仅能网络固持土壤,建立起稳固的团粒结构,且腐烂根系提高有机质含量,固定土壤表层,改善土壤理化性能,又提高了土壤的渗透能力、持水能力,增强土壤抵御侵蚀力的能力^[18]。从表 2 可以看出,普通种植草木樨的减沙水代价值为 0.78~13.44 m³/t,平均值为 7.9 m³/t;条播草木樨为 2.01~19.29 m³/t,平均值为 8.61 m³/t;普通种植苜蓿为 0.46~18.63 m³/t,平均值为 7.19 m³/t;撒播苜蓿为 2.58~9.69 m³/t,平均值为 8.59 m³/t;自然草坡为 4.64~8.56 m³/t,平均值为 6.46 m³/t。因此,从减沙水代价大小来看,不同牧草

轮作下条播草木樨的 R_{rs} 最大,较自然草坡高 25%,其 R_{rs} 表现为:条播草木樨>撒播苜蓿>草木樨>苜蓿>自然草坡。草田带状间轮作下,草木樨/农作物的 R_{rs} 介于 2.12~25.15 m³/t,平均值为 14.53 m³/t;苜蓿/农作物为 1.87~23.17 m³/t,平均值为 13.95 m³/t。因此,对于草田带状间轮作而言,草木樨/农作物的 R_{rs} 较苜蓿/农作物高 4%,其 R_{rs} 表现为:草木樨/农作物>苜蓿/农作物,且草田带状间轮作的减沙水代价(R_{rs})明显高于牧草轮作。这是因为牧草与农作物(玉米)轮作,既可以增加地表覆盖度,又发挥了牧草根系和高秆农作物大根系网络固持土壤的作用,增强土壤渗水、蓄水和抵抗径流冲蚀的能力^[11]。因此其减沙水代价较大,在减少单位泥沙时减少的径流量大。

表 2 人工草地减沙水代价

项目	牧草轮作					草田带状间轮作	
	草木樨	条播草木樨	苜蓿	撒播苜蓿	自然草坡	草木樨/农作物	苜蓿/农作物
最大值	13.44	19.29	18.63	9.69	8.56	25.15	23.17
最小值	0.78	2.01	0.46	2.58	4.64	2.12	1.87
平均值	7.90	8.61	7.19	8.59	6.46	14.53	13.95

2.3 人工草地减沙水代价与汛期降水量、 I_{30} 、年侵蚀模数的关系

2.3.1 人工牧草减沙水代价与汛期降水量的关系
由图 1 可知,黄土高原坡面人工种草措施减沙水代价与汛期降水量之间呈反比关系,随着降雨量的增加减沙水代价逐渐降低,其拟合公式为:

$$R_{rs}=23.591e^{-0.0034P_x} \tag{2}$$

式中: R_{rs} ——减沙水代价(m³/t); P_x ——汛期降雨量(mm);公式(2)的决定系数为 0.312 8, Sig=0.01。由此表明,在黄土高原坡面人工种草措施下的减沙水代价与汛期降雨量之间的关系较好,二者呈明显的指

数反比关系,而且相关性水平为显著,汛期降雨量越大,种草措施下的减沙水代价就越小。

由上面的分析可以看出,黄土高原坡面人工种草措施下的减沙水代价与汛期降雨量的关系较好,二者呈反比例关系,即随着降雨量的增大,种草措施的减沙水代价减小。这种关系的出现跟牧草的生长特点有关,牧草的种植密度大,覆盖面积广,且牧草地下根系发达,固土能力较强,能够改善土壤的物理性质,更好地提高坡面土壤的抗侵蚀能力,在暴雨和大暴雨中活地被物对减少土壤侵蚀的作用非常显著,而对径流影响不大^[19],因此随着降雨量的增加,人工草地措施

减水量增加较快,而减沙量减少幅度较缓,故人工草地的减沙水代价逐渐减小。

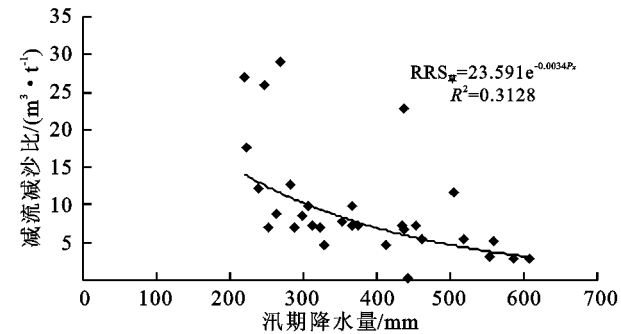


图 1 人工草地减沙水代价与汛期降水量之间的关系

2.3.2 人工牧草减沙水代价与最大 30 min 降雨强度的关系 由图 2 可知,黄土高原坡面人工种草措施减沙水代价与 I_{30} 之间呈线性关系,拟合曲线为

$$R_{rs} = -4.4035I_{30} + 7.8166 \quad (3)$$

式中: R_{rs} ——减沙水代价(m^3/t); I_{30} ——最大 30 min 降雨强度(mm/min);公式(3)的决定系数达到 0.598 7, $\text{Sig}=0.01$,说明二者拟合相关性较好,相关性较强。黄土高原坡面人工种草措施减沙水代价与 I_{30} 之间能够呈现较好的线性关系,且二者表现为反比的关系,随着最大 30 min 降雨强度的增加,种草措施下的减沙水代价减小。这主要是因为地表种草措施在一定程度上能够增加地表的覆盖度,减少地面的直接打击,降低径流冲刷。在雨强较大的时候对地面的打击增加,产生水土流失,产沙量大而产水量小,措施的减沙水代价随着雨强的增加而降低。

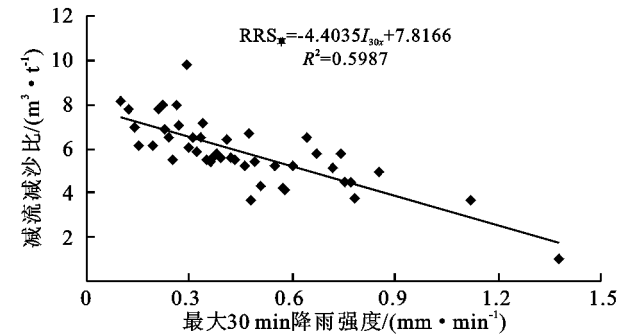


图 2 人工草地减沙水代价与 I_{30} 的关系

2.3.3 人工牧草减沙水代价与年侵蚀模数的关系 由图 3 可知,种草措施减沙水代价与年侵蚀模数呈指数关系,且呈反比关系,其拟合方程为:

$$R_{rs} = 12.265e^{-1E-05W_s} \quad (4)$$

式中: R_{rs} ——人工种草措施减流减沙比(m^3/t); W_s ——年侵蚀模数[$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$];公式(4)的决定系数达到 0.366 5, $\text{Sig}=0.02$,说明二者拟合相关性较好。说明随年侵蚀模数的增加人工种草措施的减沙水代价逐渐减小,当年侵蚀模数无限增大时,人工种草措施减沙水代价趋于稳定。

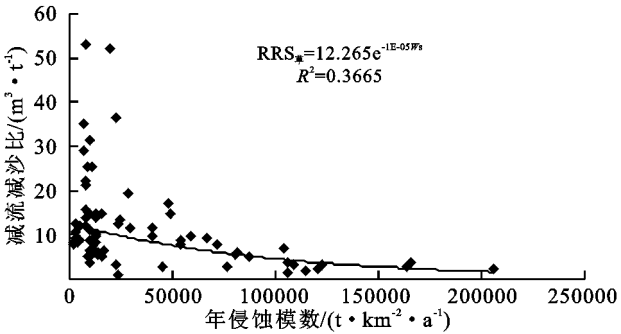


图 3 人工草地减沙水代价与年侵蚀模数的关系

3 结论

坡面人工种草措施对坡面径流和泥沙的调控机制不同,在减少 1 t 泥沙时对水资源的影响程度也不同;因此,在不同降雨强度和汛期降雨量条件下水土保持措施减沙水代价不同,同一措施在年侵蚀模数不同时减沙水代价也存在差异。减沙水代价概念可以有效衡量不同措施减少等量泥沙时对径流影响的程度。故本文通过对黄土丘陵沟壑区人工草地减沙水代价特征的分析,探讨了黄土丘陵沟壑区人工草地减沙水代价特征及其与各影响因素之间的关系,揭示其区域分异规律并得出以下结论:

(1) 在黄土丘陵沟壑区人工草地在不同地区的减沙水代价(R_{rs})存在一定的差异,其变化幅度较大, R_{rs} 最小值和最大值分别为 3.57、10.13 m^3/t ,差异为 2.84 倍;黄土丘陵沟壑第一、二、三副区人工草地的平均 R_{rs} 分别为 5.85、9.2、7.02 m^3/t ,总体来看,人工草地在黄土丘陵沟壑第二副区减少相同泥沙量时对径流的影响较大,在黄土丘陵第一副区减少泥沙时对径流的影响较小。这与选取不同草类、不同种植和播种方式、草地的覆盖有密切的关系。

(2) 坡面人工草地减沙水代价与汛期降雨量关系密切,呈较好的指数反比关系,水土保持措施减沙水代价随着汛期降雨的增大而呈减小趋势;人工草地减沙水代价受最大 30 min 降雨强度(I_{30})影响较大,这与王万忠^[20]、蔡强国^[21]发现的黄土高原坡面次降雨流失量与次降雨量相关性差,与 I_{30} 存在很好的相关关系的结论基本一致。随着降雨强度增加,人工草地减沙水代价与 I_{30} 之间能够呈现较好的线性反比关系,随着 I_{30} 的增加,人工草地减沙水代价减小;人工草地减沙水代价与年侵蚀模数相关性较好,随年侵蚀模数的增加人工造林措施的减沙水代价减小,当年侵蚀模数无限增大时,林草措施减沙水代价趋于稳定。

(3) 对比分析了黄土丘陵沟壑区坡面典型的人工草地减沙水代价,结果表明各单项措施的 R_{rs} 表现较为复杂:不同牧草轮作下条播草木樨的 R_{rs} 最大,较自

然草坡高 25%, 其 R_{rs} 表现为: 条播草木樨 > 撒播苜蓿 > 草木樨 > 苜蓿 > 自然草坡; 对于草田带状间轮作而言, 草木樨/农作物的 R_{rs} 较苜蓿/农作物高 4%, 其 R_{rs} 表现为: 草木樨/农作物 > 苜蓿/农作物, 且草田带状间轮作的 R_{rs} 明显高于牧草轮作。

参考文献:

- [1] 李子君, 周培祥, 毛丽华. 我国水土保持措施对水资源影响研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 49-57.
- [2] 杨平. 水土保持在促进黄河水资源高效利用的作用[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 108-111.
- [3] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 41-45.
- [4] 景可, 申元村. 黄土高原水土保持对未来地表水资源影响研究[J]. 中国水土保持, 2002, 238(1): 12-14.
- [5] 王飞. 人类活动对区域水土流失影响的定量评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [6] 曹文洪. 黄土高原地区提倡节水型水土保持[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 41-44.
- [7] 穆兴民, 李锐. 论水土保持在解决中国问题中的战略地位[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 1-5.
- [8] 穆兴民, 王飞, 李锐. 水土保持是解决黄河问题的根本[N]. 中国水利报: 现代水利评论版, 2005-11-5(3).
- [9] 徐学选, 陈霖巍, 穆兴民, 等. 黄河中游水土保持措施对径流的影响[J]. 人民黄河, 2000, 22(7): 36-37.

- [10] 侯喜禄, 杜呈祥. 不同植被类型小区的径流泥沙观测分析[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-38.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1996.
- [12] 刘元保, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 25-29.
- [13] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 等. 草地坡面径流调控放水试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 6(19): 23-25.
- [14] 王飞, 李锐, 穆兴民, 等. 渭河流域水土保持措施减沙水代价分异特征与水沙调节模拟[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 12-17.
- [15] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 河口镇到龙门区间水土保持措施减沙水代价分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 28-32.
- [16] 焦菊英, 王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 176-184.
- [17] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究, 2006, 4(2): 10-16.
- [18] 王协康, 方铎. 植被措施控制水土流失机理及其效益研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 32(2): 13-16.
- [19] 罗伟祥, 白立强, 宋西德, 等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报, 1990, 2(1): 30-34.
- [20] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报, 1983, 3(4): 7-13.
- [21] 蔡强国. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 432-439.



(上接第 61 页)

参考文献:

- [1] 刘秀梅, 冯兆滨, 张树清, 等. 纳米—亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中 C, N, P 含量与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 57-63.
- [2] 李绍家, 刘凤书, 杨海云, 等. 紫胶改性的研究[J]. 林业科学研究, 1989, 2(3): 277-280.
- [3] 邱惠中. 纳米材料及其在航天领域中的应用[J]. 宇航材料工艺, 1996(2): 7-10.
- [4] 陈军辉, 尹华强, 刘勇军, 等. 纳米碳材料及在环境保护中的应用前景[J]. 化工环保, 2004, 24(Z1): 120-122.
- [5] 周建敏, 牛显春, 农兰平. 纳米 TiO_2 光催化处理城市生活废水的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 35-36.
- [6] 肖亚兵, 钱沙华, 黄淦泉, 等. 纳米二氧化钛对砷(Ⅲ)和砷(V)吸附性能的研究[J]. 分析科学学报, 2003, 19(2): 172-174.
- [7] Zheng Lei, Hong Fashui, Lu Shipeng, et al. Effect of nano- TiO_2 on strength of naturally aged seeds and

growth of spinach [J]. Biological Trace Element Research, 2005, 104(1): 83-91.

- [8] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米增效肥料对冬小麦产量及品质影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15578-15580.
- [9] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米生物技术在水稻、玉米、大豆增产效益上的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15814-15816.
- [10] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [11] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [12] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 484-494.
- [13] 王亚平, 潘小费, 岑况, 等. 汞和镉在土壤中的吸附和运移研究进展[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 277-282.
- [14] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9): 1361-1403.