

雨水滤清净水系统的设计与试验验证

王显文¹, 高建恩^{1,2,3}, 张梦杰², 李兴华¹, 高哲⁴

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 陕西化建工程有限责任公司, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对黄土高原发展坡地高效农业面临的缺水及水源水质差而传统微型沉沙池效率低, 清淤困难等问题, 基于调控降雨径流, 高效利用水土资源的理念, 根据生物与物理净化的不同特点, 设计出一套生态环保型高效滤清净水系统并进行了试验验证。结果表明, 能源牧草柳枝稷作为植被过滤带与滤清池组合系统, 对泥沙和总磷最大拦截效果分别达到 98.62% 和 93.6%, 对化学需氧量(COD)的最大拦截效果达到 56%, 说明柳枝稷植被过滤带对泥沙和污染物的拦截效果明显。并在此基础上再铺设不同粒径砂石的滤清池, 只需拦截植被过滤带下来的柴草, 使布置大幅简化, 造价大幅降低。该系统可广泛应用于黄土高原坡地高效农业水源净化系统。

关键词: 植被过滤带; 滤清池; 水土流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0197-04

中图分类号: X171.4, X52

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.053

Design and Experimental Verification of Rainwater Filtration System

WANG Xian-wen¹, GAO Jian-en^{1,2,3}, ZHANG Meng-jie², LI Xing-hua¹, JIA Li-zhi³, GAO Zhe⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and

Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 4. Shaanxi Petroleum Chemical Engineering and Construction Co. Ltd. Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The slope land efficient agriculture developments are facing with the problems such as water shortage and poor water quality in the Loess Plateau region. Based on the concept of rainfall runoff regulation and water and soil resources efficient utilization, an ecological environmental protection and efficient water filter system was designed through taking account of different characteristics of biological and physical purification, and was verified using experiment measured data. Results showed that the maximum total phosphorus and sediment interception effect of the filter system which used energy grass (*Panicum virgatum*) as vegetation filtering belt combined with filtration pool system reached 93.6% and 98.62% respectively, and the biggest interception effect of COD (chemical oxygen demand) reached 56%. *Panicum virgatum* filtering belt in the system had an obvious interception effect for sediment and pollutant. The sand filtration pool with different particle size combination had higher interception efficiency for straw under the vegetation zone, and it made the system greatly simplified, and reduced the cost significantly. The system was able to be used for high-efficient agricultural water resource purification in the Loess Plateau.

Keywords: vegetation filtering strip; filtration pool; soil and water loss

随着退耕还林还草工程的实施, 耕地资源紧张, 干旱与水土流失并存的问题^[1-2], 特别是由于降雨侵蚀引起的径流含沙量高且带有面源污染物, 传统微

收稿日期: 2013-11-21

修回日期: 2013-12-02

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成示范”(2011BAD31B05); 陕西省科技统筹创新工程项目(2013KTDZ03-03-01); 国家自然科学基金项目(41371276; 51309194); 中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程专项(水土保持工程)(A315021304)

作者简介: 王显文(1988—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业水土工程水土资源高效利用。E-mail: wxw883920@163.com。

通信作者: 高建恩(1962—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源利用与流域治理方面的研究。E-mail: gaojianen@126.com。

泥沙池效率低,清理困难,过滤水质差,而发展高效农业灌溉用水水质要求较高,因此降雨径流所产生的污染水流进行拦截净化是生产急需。研究^[3-5]表明,植被过滤带可以有效拦截径流中的污染物。国内外对植被过滤带拦截污染物的机理、影响因素等的研究表明,其可对径流中的氮磷等面源污染的净化方面发挥着重要作用。主要通过物理、化学和生物过程使进入水体的悬浮物、氮磷、除草剂等污染物质减少。而国内对植被过滤带在黄土高原水土资源高效利用方面的研究主要是通过放水试验对其拦截净化效果进行研究,而采用人工降雨试验对其进行的模拟研究较少。柳枝稷(*Panicum virgatum*)生命力极强,能够生长于干旱,排水不良的土壤,抗寒性能也较好,其还可用于提炼乙醇燃料,成为替代能源^[6],美国能源部和农业部也将其作为纤维素乙醇转化模式植物^[7]。研究柳枝稷能否适合黄土高原丘陵沟壑区种植以及作为植被过滤带能否对含沙污水产生净化效果,为黄土高原水土资源高效利用提供一种有效的方法。本研究基于降雨径流调控和水土资源高效利用的理念,设计了能源牧草植被滤清池系统,并在不同降雨强度情况下验证其对降雨径流污染物的拦截效果,以期为黄土高原发展水土保持型高效农业提供一种净化灌溉水源的方法。

1 系统设计

针对黄土高原水土流失与干旱缺水并存的问题,设计一种能充分利用当地水土资源,又有经济价值的植被过滤滤清系统,对降雨径流冲刷的高含沙污染水流拦截净化。过滤系统包括了植被过滤带和滤清池两部分,植被过滤带种植柳枝稷,滤清池内铺设不同粒径的砂石,选定砂石粒径分别为: >20 mm, $10\sim 20$ mm, $5\sim 10$ mm, <5 mm 等 4 种,每层厚度 20 cm,其中粒径最小的铺设在滤清池的最下层,依次往上铺设,共计 4 层。植被过滤带布置在滤清池前面,流经植被过滤带拦截净化后的水流进入滤清池。通过对污染水流的二次过滤,同时滤清池还可以有效拦截较大尺寸的柴草。经过滤后水流进入水窖,经过长期沉淀,如果水质达标,可为人畜饮用,也可作为滴灌灌溉用水,从而解决黄土高原地区高效农业的干旱缺水问题。该系统利用植被过滤带具有良好的拦截径流泥沙和污染物的性能,沉降、过滤、稀释、下渗和吸收地表径流中的污染物^[8]。经过植被过滤带净化的水流中含沙量少,污染物含量也相对较低,但依然存在着一定的污染物,且随着季节变化,柳枝稷过滤带内枯叶会进入径流,需对其进行拦截。因此,设计铺设不

同粒径的砂石滤清池主要利用砂石的阻拦吸附作用对水流中的小颗粒泥沙和污染物进行吸附拦截,同时拦截大尺寸柴草及植被凋落产物。

2 试验方案及方法

2.1 试验方案

试验场地位于西北农林科技大学节水博览园内。采用陕北黄土(取自安塞县)种植两条植被过滤带,种植抗寒,抗旱,耐水性能较好的柳枝稷。柳枝稷过滤带出口布置滤清池。柳枝稷过滤带布置在裸坡下,模拟实际产流产沙。在裸坡段表层铺 20 cm 厚的安塞县黄土,坡面不种植任何作物,为 $6\text{ m}\times 1\text{ m}$ 裸坡,坡度 15° ;平坡段种植 $5\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的柳枝稷过滤带,播种量为 $1.5\text{ g}/\text{m}^2$ 。试验初期柳枝稷植株平均高度 22.9 cm,柳枝稷的平均茎秆覆盖度为 $4\ 357\text{ 株}/\text{m}^2$ 。为保证柳枝稷成活进行不定期灌水。每次试验前换掉裸坡段的土壤并施加尿素和磷酸二氢钾模拟施肥土壤。每次降雨模拟试验完成后放水冲刷植被过滤带和滤清池,使得植被过滤带表层和滤清池滞留污染物被冲走。试验 3 d 进行 1 次,使土壤含水率接近初次试验状态。在柳枝稷过滤带的出口处设置滤清池,在其中由下往上分别铺设 5 mm 以下, $5\sim 10$ mm, $10\sim 20$ mm 以及 20 mm 以上的砂石,每层厚度 20 cm,主要拦截实际中由暴雨径流从植被过滤带带来枯叶和柴草。在过滤带周围布设 3 个高为 8 m 的降雨器,进行模拟降雨试验。

试验通过控制降雨器喷头孔径大小来控制雨强,采用喷头垫片孔径分别为 12, 11, 10, 9, 8 和 6 mm,由于降雨受风速等影响,因此对喷头孔径和降雨强度关系进行率定,率定后的降雨强度详见表 1。

表 1 率定降雨强度结果

降雨器喷头孔径/mm	12	11	10	9	8	6
降雨强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	139	125	115	73	54	48

2.2 数据采集及测定方法

于 2013 年 8—9 月进行了 14 场降雨试验。降雨对裸坡和植被过滤带进行冲刷,在裸坡段形成高含沙,高污染物浓度水流。取样采用注射器,在过滤带每隔 1 m 取水样,沿程共取 7 个水样。在出口开始出流时第 1 次取样,隔 30 min 第 2 次取样。取样后当天测定泥沙含量、总磷、化学需氧量(COD)。

泥沙含量测定采用烘干法,对所取水样用电子天平称重后,放于烘箱中 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 情况下烘干 8 h;总磷(TP)浓度采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法;化学

需氧量浓度采用美国哈希公司生产的 DR2800 便携式水质分析仪进行测定。

2.3 柳枝稷过滤系统拦截效果的评价指标

柳枝稷过滤带通过对降雨径流的拦截,增加径流及其水中溶解物在土壤中的入渗。通过茂盛的植被降低径流流速,加速泥沙、总氮和总磷等污染物沉降。另外,植物本身具有吸收氮磷等污染物以促进其生长的性能,反硝化作用和吸收是植被过滤带减小 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的主要机理^[9]。为了评价植被过滤带和滤清池对降雨径流中污染物的拦截效果,采用拦截率对其进行评价,计算公式为:

$$R = \frac{C_{\lambda} - C_{\text{出}}}{C_{\lambda}} \times 100\%$$

式中: R ——污染物拦截率; C_{λ} ——入流口污染物浓度; $C_{\text{出}}$ ——出流口污染物浓度。

3 结果与分析

3.1 植被过滤带对降雨径流中污染物的拦截效果

在降雨过程中,土壤中的氮、磷随着雨滴击打而被水流所携带。降雨径流携带了农田中颗粒态和水溶态的养分,带走的氮磷富集在江河湖泊内引发藻类的异常生长,引发水体的富营养化。因此而引起水体富营养化起关键作用的元素是氮和磷^[10-11],不仅使土壤肥力和化肥的利用效率降低,而且成为水体富营养化的非点源污染源,引起水质恶化问题^[12]。因此研究植被过滤带对氮磷等营养物的拦截有其必要性。在降雨过程中,由于降雨侵蚀力作用,植被过滤带前裸坡受到雨滴的击打,使土团分散,土壤颗粒溅到空中,并使得地表薄层水流产生紊动,产生较大的冲刷,水流的挟沙能力增加^[2],土壤表层颗粒被降雨径流携带,从而产生含沙浓度较高水流。而植被过滤带段由于种植密度较大,植被能够有效消减雨滴动能、减缓土壤侵蚀^[10],植被段柳枝稷根系能够有效改善土壤结构,从而增加土壤抗冲性能,因此,降雨径流对该段土壤侵蚀较少。通过对所取水样运用烘干法测量其泥沙浓度。柳枝稷植被过滤带对污染物的拦截效果如图 1 所示。由图 1 可以看出,植被过滤带对泥沙的拦截效果非常显著。在降雨强度为 139, 125, 115, 73, 54 和 48 mm/h 条件下,柳枝稷过滤带对泥沙的拦截效果分别为 98.62%, 99.41%, 98.89%, 97.60%, 96.60% 和 93.82%, 其拦截效果非常显著。这与肖波等^[13]人的研究成果相近,这主要是由于柳枝稷过滤带增加了地表阻力,减小径流流速,从而增加了泥沙的沉降,泥沙在柳枝稷过滤带的沿程沉降,达到了过滤带拦截泥沙的效果。图 1 表明,柳枝稷过滤带对

总磷的拦截效果也很明显,在 6 种雨强条件下,过滤带对总磷的拦截效果分别达到 93.6%, 93%, 91.9%, 92.5%, 87.5% 和 88.6%, 这与李怀恩等^[14]研究植被过滤带对地表径流中污染物的拦截效果结果一致,表明柳枝稷植被过滤带可以有效拦截降雨径流中的总磷。这是由于植被过滤带能够拦截径流中的沉积物,降雨径流中的磷伴随着沉积物被拦截,滞留在过滤带的总磷有些被植物所吸收,有些被土壤吸附^[8]。泥沙是影响地表径流中总磷质量浓度的重要因素之一,水流中总磷含量与泥沙含量可以用线性关系模拟,泥沙的沉降伴随着径流中吸附态的有机磷和无机磷沉降。图 1 显示,柳枝稷过滤带对 COD 的拦截效果不稳定,对其拦截率其中最大值为 56.07%, 最小值为 15.14%, 柳枝稷过滤带对 COD 具有拦截效果,但效果不明显。降雨强度不同 COD 质量浓度影响并不大。柳枝稷过滤带的拦截效果是因为降雨径流中的有机物主要是由于降雨对表层土壤击打侵蚀携带而来的,拦截泥沙和阻滞水流是过滤带减小径流中 COD 的重要途径^[14]。综上所述,柳枝稷植被过滤带对降雨径流中泥沙、总磷和 COD 具有拦截效果,并且拦截效果明显。因此植被过滤带是有效拦截降雨径流中污染物有效措施,其运行成本低,经营管理简单以及效益明显等特点,是黄土高原地区防治水土流失和解决干旱缺水的有效生物措施。

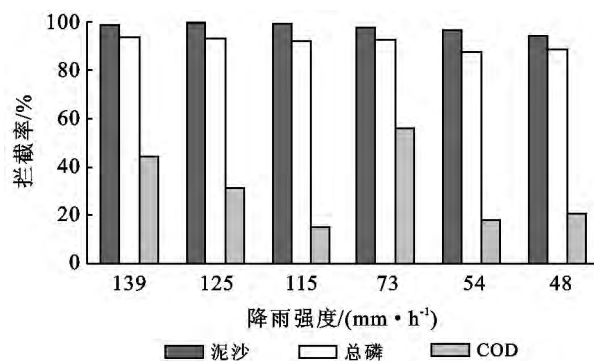


图 1 植被过滤带对污染物的拦截效果

3.2 滤清池的净化效果

本试验滤清池布设在植被过滤带的出水口,收集由柳枝稷植被过滤带拦截净化后水流。由于滤清池中铺设不同粒径的砂石,上层粒径较大,而下层粒径小,用以拦截水流中的小颗粒泥沙和吸附态的污染物,试验前期,对已经筛分好的砂石进行淘洗,使其表面干净,从而不会导致砂石本身对水流的污染。在滤清池进水口和出水口分别取水样,并对其进行测试分析,得出其对污染物的拦截效果(表 2)。由表 2 可知,滤清池对泥沙的拦截效果一般,在 139 mm/h 降

雨强度情况下,滤清池出口浓度和入口浓度相比减小,对其拦截效果达到 41.81%,而在其他降雨强度下,对泥沙质量浓度没有拦截效果,其泥沙质量浓度反而增加。由于在 139 mm/h 降雨强度时,其入口泥沙浓度较大,第一次试验,滤清池内砂石本身对小颗粒泥沙具有吸附作用,使其质量浓度减小,达到一定的拦截净化效果。而经过一场试验后,池内砂石已被污染,其拦截效果也相应降低。因此对泥沙拦截效果微弱。表 2 数据显示,对总磷具有拦截效果,对总磷

的最大拦截效果达到 45.96%,随着降雨场次的增加,其拦截效果明显降低,主要是由于污染物对滤清池中砂石的污染,使得污染物吸附在砂石表面,再次试验时,水流会携带砂石表面的污染物,从而降低了其拦截效果。表 2 显示,滤清池对 COD 没有拦截效果,COD 浓度反而增加,由此说明砂石本身表面吸附的有机质被水流所携带,从而造成了其浓度增加。滤清池对植被凋零物具有良好的拦截效果,其可以有效拦截柴草。

表 2 滤清池对径流中的污染物拦截效果

降雨强度/(mm·h ⁻¹)		139	125	115	73	54	48
泥沙浓度/(g·L ⁻¹)	入口	1.42	0.51	0.62	0.78	0.54	0.70
	出口	0.82	0.51	0.72	0.64	0.77	0.56
拦截率/%		41.81	-0.94	-17.46	17.53	-44.14	20.13
总磷浓度/(mg·L ⁻¹)	入口	2.06	2.19	2.30	1.21	1.60	1.42
	出口	1.11	2.10	2.42	1.14	1.09	1.04
拦截率/%		45.96	4.05	-5.26	6.15	32.14	26.99
COD/(g·L ⁻¹)	入口	13.80	13.50	15.70	7.60	13.10	11.10
	出口	14.10	15.60	16.10	6.60	12.30	11.50
拦截率/%		-2.17	-15.56	-2.55	13.16	6.11	-3.60

3.3 滤清系统对污染物的拦截效果

整个植被过滤沉沙系统对污染物具有较好的拦截效果,主要是由于柳枝稷植被过滤带对泥沙、总磷和 COD 的拦截。植被过滤带增加了地表阻力,降低降雨径流流速,加速污染物沉降。研究^[15]表明,植被拦截污染物是多种原因造成的,比如植被茎秆可以阻滞水流流速,拦截径流,减小径流流速造成了径流中大颗粒泥沙的沉降。在王晓青等^[16]研究中显示泥沙和总磷质量浓度呈现线性关系,泥沙是影响地表径流中的总磷质量浓度的重要因素之一,因此柳枝稷过滤带对泥沙和总磷的拦截效果明显是有必然联系的。柳枝稷过滤带对 COD 具有一定拦截效果,其原因是阻滞水流,使得径流流速变小,有机质随沉积物沉降。而滤清池对污染物拦截效果不明显,其对柳枝稷过滤带留下的采草具有良好的拦截效果,在第 1 次试验过程中,泥沙和污染物被吸附在滤清池内砂石表面,随着降雨场次的增加,滤清池内污染物被吸附,其含量显著增加,水流经过池内其污染物被再次携带,从而导致其拦截效果降低。

4 结论

(1) 柳枝稷在黄土高原生长状况良好,柳枝稷植被过滤带可有效拦截降雨径流中的污染物,其对泥沙和总磷的拦截效果非常明显,可有效降低其质量浓

度。在不同的降雨强度下对泥沙的最大拦截率达到 98.62%,而平均拦截率达到 97.49%,对总磷的最大拦截率达到 93.57%,平均拦截率达到 91.18%,对 COD 的拦截效果相对较差,其最大拦截率为 56.07%,而平均只有 30.9%。

(2) 铺设不同粒径砂石的滤清池,只需拦截植被过滤带下来的柴草,系统布设可大大简化,造价可大幅降低。该系统可广泛用于黄土高原丘陵沟壑区坡地高效农业水源净化系统。

(3) 经验证整个植被过滤系统对泥沙、总磷等污染物的拦截效果明显,主要是由于柳枝稷植被过滤带增加地表阻力,降低径流流速引起的。而滤清池对植被过滤带流出的柴草具有明显的拦截效果,对污染物的拦截效果较弱。在以后的研究中需改进滤清池的布设以及池内材料设置。

致谢:感谢张星辰、娄现勇、白先发和贾立志在试验过程中给予的帮助,在此仅表谢意。

[参 考 文 献]

- [1] Liao Jianhua, 李丹勋, 王兴奎, 等. 黄土高原侵蚀产沙与高含沙水流空间分异对比分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 100-111.
- [2] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论[M]. 河南郑州: 黄河水利出版社, 2006.

(下转第 207 页)

- [4] 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等. 多卫星遥感降雨数据精度评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 343-348.
- [5] 傅云飞, 刘国胜. Precipitation characteristics in mid-latitude East Asia as observed by TRMM PR and TMI [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2003, 81(6): 1353-1369.
- [6] 陈举,施平,王东晓,等. TRMM 卫星降雨雷达观测的南海降雨空间结构和季节变化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 29-35.
- [7] 丁伟钰,陈子通. 利用 TRMM 资料分析 2002 年登陆广东的热带气旋降水分布特征[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 436-444.
- [8] 牛晓蕾,李万彪,朱元竟. TRMM 资料分析热带气旋的降水与水汽、潜热的关系[J]. 热带气象学报, 2006, 22(2): 113-120.
- [9] 傅云飞,宇如聪,崔春光,等. 基于热带测雨卫星探测的东亚降水云结构特征的研究[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(1): 9-20.
- [10] 刘奇,傅云飞. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(1): 111-122.
- [11] 杨传国,余钟波,林朝晖,等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 461-466.
- [12] Nazrul I, Hiroshi U. Comparison of TRMM 3B42 Products with surface rainfall over Bangladesh[J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 48(6): 4112-4115.
- [13] 骆三,苗峻峰,牛涛,等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1081-1090.
- [14] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302-314.
- [15] 任小玢,董治宝,周正朝. 近 50 年来四川盆地降水日数的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 65-70.
- [16] Ebert E E. Satellite vs. model rainfall; which one to use? [C]// Proceedings of the 5th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle Costa Mesa California USA; Global Energy and Water Cycle Experiment & World Climate Research Programme & United States National Oceanic and Atmospheric Administration & Office of Global Programs, 2005.
- [17] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.
- [18] 史岚. 长江流域起伏地形下降水量分布精细化气候估算模型研究[D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [19] 张杰,李栋梁,何金梅,等. 地形对青藏高原丰枯水年雨季降水量空间分布的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 319-326.

(上接第 200 页)

- [3] 钟勇. 美国水土保持中的缓冲带技术[J]. 中国水利, 2004(10): 63-65.
- [4] 张建春,彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 56-63.
- [5] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 河岸植被缓冲带的功能及其设计与管理[J]. 林业科学, 2010, 46(2): 128-133.
- [6] Hoogwijk M, Faaij A, van den Broek R, et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy[J]. Bio-mass and Bioenergy, 2003, 25(2): 113-119.
- [7] 杜菲,杨富裕, Casler M D, 等. 美国能源草柳枝稷的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(3): 20334-20339.
- [8] 王良民,王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [9] 陶梅,萨仁娜. 植被过滤带防治农业面源污染研究进展[J]. 山西农业科学, 2012, 40(1): 91-94.
- [10] 赵春红,高建恩,徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 113-121.
- [11] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
- [12] 梁新强,田光明,李华,等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 59-63.
- [13] 肖波,萨仁娜,陶梅,等. 草本植被过滤带对径流中泥沙和除草剂的去除效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 136-144.
- [14] 李怀恩,邓娜,杨寅群,等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 81-86.
- [15] 游珍,李占斌. 坡面植被对径流的减流减沙作用机理及试验研究[J]. 泥沙研究, 2011(3): 59-62.
- [16] 王晓青,吕平毓. 地表水泥沙与总磷测定值的相关性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(1): 45-47.