

紫色土丘陵区农业小流域暴雨事件磷素多尺度流失特征

申东^{1,2}, 唐家良², 章熙峰², 翟龙波², 薛菲², 李新¹

(1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 为了揭示自然小流域尺度降雨、地形、土地利用结构等对泥沙和磷素输出的影响, 根据丘陵区农业小流域自然地貌与土地利用特征, 设计了不同尺度的小流域监测点, 分别为苏荣、截流、大兴、万安, 监测面积分别为 3.0, 34.6, 480.3, 1 236.4 hm^2 , 并选择了降雨侵蚀力(R)分别为 1 411.5, 595.7, 391.4 $\text{MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 的 3 场降雨事件监测小流域内磷素流失过程特征。结果表明: (1) 以居民点集镇和耕地为主的苏荣和截流小流域水文响应速度较快, 暴雨事件中径流峰值出现在降雨峰值后的 5~10 min, 较大尺度大兴和万安小流域泥沙浓度峰值与径流峰值滞后于降雨峰值 0.5~3 h。 (2) 3 场暴雨径流中泥沙与全磷、颗粒态磷均存在较一致的显著相关关系($R > 0.6, P < 0.01$), 泥沙、全磷流失负荷在源头小流域(苏荣、截流)最高, 3 场暴雨苏荣全磷平均流失负荷达到 0.36 kg / hm^2 , 万安小流域泥沙、全磷流失负荷最低, 全磷平均流失负荷为 0.009 kg / hm^2 。 (3) 小流域径流中颗粒态磷占全磷流失量 50% 以上。 (4) 多元回归分析结果表明, 径流量和泥沙含量可用于进行磷素流失通量预测。坡耕地、林地与水田带状组合结构可显著降低小流域泥沙和磷素流失负荷。研究结果为计算丘陵区农业小流域暴雨过程中磷素多尺度流失负荷提供参考。

关键词: 农业小流域; 泥沙; 颗粒态磷; 多尺度对比

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0056-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.010

Characteristics of Phosphorus Loss of Small Agricultural Watershed During Rainstorm Events in Hilly Area of Purple Soil

SHEN Dong^{1,2}, TANG Jialiang², ZHANG Xifeng², ZHAI Longbo², XUE Fei², LI Xin¹

(1. Mianyang Teachers' College, Mianyang, Sichuan 621000; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041)

Abstract: In order to reveal the effect of rainfall, topography, land use pattern and other factors on sediment and phosphorus loss in natural small watershed, four small watersheds with different scales (Surong, Jieliu, Daxing, and Wanan) were chosen according to the natural physiognomy and land use characteristics of small agricultural watershed in Hilly Area, and the monitoring areas were 3.0, 34.6, 480.3 and 1 236.4 hm^2 respectively. Phosphorus loss characteristics of small watershed were monitored in three rainstorm events, and rainfall erosivity (R) of these rainstorms were 1 411.5, 595.7, 391.4 $\text{MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ respectively. The results showed that: (1) The hydrological responses of Surong and Jie Liu, which were mainly residential areas, market towns and cultivated land, were faster, and the runoff peak value of these two watersheds appeared at 5 ~ 10 min after rainfall peak in the rainstorm event, while the sediment concentration peak and runoff peak appeared at 0.5 ~ 3 h behind rainfall peak in Daxing and Wanan. (2) There was a consistent significant correlation between sediment and total phosphorus (TP), particulate phosphorus (PP) ($R > 0.6, P < 0.01$) in three rainstorm events, the sediment and TP loss loads were the highest in the source small watersheds (Surong and Jieliu), the average TP loss load of Surong reached 0.36 kg / hm^2 , and the loss loads of sediment and TP of Wanan were the lowest, and the average TP loss load was 0.009 kg / hm^2 . (3) PP accounted for more than 50% of TP loss in the runoff. (4) The results of multivariate regression analysis showed that runoff and sediment contents could be used to predict phosphorus flux. A combination of sloping cropland, forestland and paddy field could significantly reduce the sediment and phosphorus loss load. The results could provide references for calculating the multi-scale loss of phosphorus in the rainstorm process of small agricultural watershed in Hilly area.

Keywords: small agricultural watershed; sediment; particulate phosphorus; multi-scale comparison

全世界河流每年输送入海的物质总量为 1×10^{10} t, 其中悬浮泥沙量占 62%, 全球每年通过河流向海洋输送的颗粒态磷总量达 9~20 Tg ($1 \text{ Tg} = 1 \times 10^6 \text{ t}$)^[1-3]。Paerl^[4] 研究发现, 美国卡莱罗纳州农业小流域内磷输出量增加, 引起河口近海水域水体富营养化和赤潮。暴雨事件是农业小流域磷素流失的重要时段。黄满湘等^[5] 通过人工降雨试验研究发现, 降雨过程中侵蚀泥沙携带的颗粒态磷是径流磷流失的主要形态。而降雨贡献了径流溶解性磷(DP)负荷的 67%^[6]。王超等^[7] 研究发现降雨—径流过程中悬浮泥沙的流失峰值出现在雨强最大时, 颗粒态磷与溶解性磷(PP/DP)的比值峰值也出现在雨强最大时。高扬等^[8] 研究也发现紫色土坡地主要存在地表径流和壤中流 2 种径流输出模式, 壤中流其径流动态过程受降雨强度和表层作物覆盖度的影响, 大雨强更容易引起土壤磷非点源输出。周明华等^[9] 发现施肥方式显著影响地表径流全磷浓度, 次降雨平均磷素流失负荷呈秸秆—化肥配施<有机肥—化肥配施<有机肥<常规施肥的规律。对于自然集水区(小流域)而言, 土地利用方式、径流和泥沙输移过程均存在显著的时空差异, 但由于监测手段和监测数据相对缺乏, 不同尺度农业小流域磷素流失过程差异特征及其机理仍不清晰。

模型研究成为近年来磷素流失研究的热点^[10-11], Beusen 等^[3] 基于美国 100 个站点数据探讨了泥沙流失与颗粒态磷输移规律, 并通过模型模拟估算河流入海泥沙负荷, 但是这些模型应用于丘陵区复杂农业小流域的效果有待验证。同时通过建立流量—养分浓度的关系模型也可以推断不同类型暴雨期间养分流失情况^[12-13], 农业小流域磷素流失受多种因素影响, 例如降雨强度、汇流面积、地形地貌、土地利用方式、施肥情况等, 由于监测数据缺乏, 目前仍缺乏能有效预测多尺度下农业小流域磷素输出的模型及其验证研究。

川中紫色土丘陵区面积约 $1.05 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 以丘陵广布、溪沟纵横为其显著地理特征, 一直被认为是长江上游侵蚀最严重的区域之一^[14]。农耕地被认为是该区域河流泥沙的主要来源^[15]。降雨携带大量泥沙以及氮、磷养分汇入长江重要支流, 从而造成长江上游水环境污染的巨大压力^[16]。因此本文以紫色土丘陵区典型梯级小流域为研究对象, 基于暴雨过程自动连续采样与水文综合观测, 探讨多尺度下降雨、土地利用方式等因素对磷素流失负荷的影响, 以期为模拟区域尺度上泥沙和磷素迁移通量提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

万安梯级小流域位于四川盆地中北部的盐亭县, 属中亚热带湿润季风气候, 海拔 400~600 m, 年均气温 17.3 ℃, 多年平均降雨量 826 mm, 其中暴雨事件

占年平均降雨量 80% 以上, 且均发生在夏季和秋季^[17-18]。万安小流域内土地利用类型特征在四川盆地典型丘陵区极具代表性(图 1、表 1), 其中苏荣小流域居民地、道路等不透水下垫面占总面积的 53.5%, 生活污水和屠宰场废水是该流域主要污染源; 截流小流域农地占总面积的 55%; 大兴小流域农地占 50.4%, 林地占 41%; 万安小流域农地占 37.1%, 林地占 56.3%, 居民点占 5.4%。林地、坡耕地与水田多为等高带状分布, 其中沟谷多为水田, 多种植单季水稻或稻/麦、稻/油轮作, 坡腰为旱耕地, 普遍种植夏玉米/冬小麦。水稻 6 月上旬撒施基肥, 6 月中下旬追施尿素, 水田每年施肥量约为氮肥 185 kg/hm²、磷肥 90 kg/hm²、钾肥 36 kg/hm²; 旱坡地玉米季 5 月底穴施底肥并播种玉米, 7 月下旬左右追施尿素, 小麦季于 11 月初进行耕翻播种并一次性撒施底肥, 旱坡地每年施肥量约为氮肥 280 kg/hm²、磷肥 180 kg/hm²、钾肥 72 kg/hm²。此外, 大兴小流域下游支沟广庭村养猪户相对较多, 但当地猪粪大部分用于旱坡地培肥, 少部分随水进入流域水体; 而另一支沟养鸡场年产约 10 000 只肉鸡, 但其鸡粪均已被收集起来制作有机肥, 因此对水体污染贡献极小。

表 1 万安梯级农业小流域土地利用特征

小流域	集水 面积/hm ²	农地 比例/%	林地 比例/%	水域 比例/%	居民点、 道路比例/%
苏荣	3.0	9.0	34.5	3.0	53.5
截流	34.6	55.0	19.0	21.0	5.0
大兴	480.3	50.4	41.0	2.1	6.5
万安	1236.4	37.1	56.3	1.2	5.4

由图 1 可知, 各小流域出口位于各级支沟汇流处, 各级流域出口均建有标准水文观测站。苏荣、截流、大兴、万安出口水文站高程分别为 430, 417, 400, 391 m。小流域海拔落差较大, 出口处地形较平坦, 小流域最高点为海拔 636 m, 海拔最低为 381 m。主沟道全长 6.5 km, 主沟道比降 0.006, 属于典型山区河流。

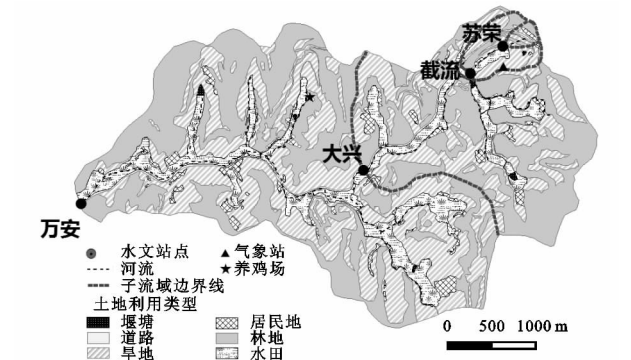


图 1 万安梯级小流域土地利用现状

1.2 样品采集与分析

观测试验于分别于 2015 年 6 月 23 日、8 月 7 日、8 月 16 日在四川省绵阳市盐亭县万安梯级农业小流域进行, 分析 3 次暴雨事件降雨量、降雨强度、径

流量、径流中泥沙和磷素浓度等,计算泥沙和磷素的流失负荷。降雨事件发生前对降雨感应设备、自动采样器和水位计进行检查,确保降雨发生时每 10 min 采集一次降雨和水位数据以及径流水样。

降雨数据利用小流域内综合气象站雨量传感器(Vaisala 公司,芬兰)进行监测,同时利用虹吸式雨量计(上海气象仪器厂,中国)数据进行校准。2 种传感器均可每 10 min 自动记录降雨量。各水文观测堰口水位数据均分别由 1 台 Odyssey 水位计(Dataflow system 有限公司,新西兰)和 1 台浮子式水位计(重庆华正水仪器器厂)采集,根据率定公式计算流量数据。监测点均安装有自动采样器,当降雨雨强超过 10 mm/h,雨量感应装置触发 ISCO 自动泥沙采样器(Teledyne ISCO, Inc, USA)采集暴雨过程径流水样,降雨前期每 10~20 min 采集一个样品,退水期每 60 min 采集一个样品。采集结束后及时运送至实验室进行前处理(过滤及消解),水样中磷素按物理态可分为溶解态和颗粒态,采用 0.45 μm 微孔滤膜进行分离,处理后的样品保存在 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱内,并在 48 h 内分析完毕。其中全磷(TP)经消解、溶解性磷(DP)经 0.45 μm 滤膜过滤后,用钼蓝比色法测定(GB11893-89),颗粒态磷(PP)采用 TP-DP 差减法计算^[19]。采用重量法监测泥沙含量。

1.3 数据处理与统计分析

降雨侵蚀力是降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,降雨侵蚀力因子(Rainfall erosivity,简称 R)计算公式为:

$$R_{\text{次}} = E \cdot I_{30} \quad (1)$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r) \quad (2)$$

$$e_r = 0.29[1 - 0.72\exp(-0.082i_r)] \quad (3)$$

式中: $R_{\text{次}}$ 是次降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$]; E 是一次降雨的总动能 (MJ); I_{30} 表示最大 30 min 降雨强度 (mm/h); $r = 1, 2, \dots, n$ 表示时段; P_r 为第 r 时段雨量 (mm); e_r 是每一时段单位降雨动能 [$\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$]; i_r 是第 r 时段雨强 (mm/h)。

本研究选取了 2015 年 3 场典型降雨事件,代表区域内不同降雨侵蚀力条件(表 2)下水土流失及污染物质运移过程。基于基流分割原理,确定每场降水产生的径流起止时间,通过公式(4)和公式(5)计算出单场降雨过程中的径流量、泥沙流失量和磷流失负荷。

$$Q = \int_{t_0}^{t_e} q_t dt \quad (4)$$

$$L = \int_{t_0}^{t_e} c_t q_t dt \quad (5)$$

式中: Q 为降雨过程河道总流量 (m^3); q_t 为 t 时刻径流速率 (m^3/s); t_0 和 t_e 分别指径流产生和结束时间; L 为 t_0 到 t_e 时间段内泥沙或磷流失通量 (mg); c_t 为 t 时刻径流中泥沙(或磷)浓度 (mg/L)。采用 ArcGIS 10.0 进行小流域 DEM 建立及土地利用类型提取,数据制图采用 Origin 9.0,差异性与回归方程采用 IBM

SPSS 10.0 分析。

2 结果与分析

2.1 径流、泥沙响应特征

根据降雨侵蚀力计算结果,2015 年 3 场暴雨事件分别代表了区域内较为典型的 3 类暴雨(表 2),按降雨时间顺序,分别代表长历时中强度暴雨 R 值 1 411.5 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 、短历时高强度暴雨 R 值 595.7 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 、长历时低强度暴雨 R 值 391.4 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,3 场暴雨前 7 d 降雨量分别为 9.6, 7.2, 0.0 mm 同属于降雨前期土壤干旱的初始条件。暴雨事件降雨范围广,降雨强度大,4 个监测点监测到 3 次暴雨事件的降雨强度 (mm/h) 几乎相同,因此 4 个监测点降雨强度以苏荣为基准。

3 场暴雨事件(图 2)中,苏荣和截流小流域径流过程线与降雨过程线同步,径流过程呈现出急涨急跌的趋势。随着流域面积增加,大兴、万安小流域径流峰值与降雨峰值呈现出明显滞后的趋势,3 场暴雨事件中大兴径流峰值响应时间滞后 0.6~2 h,万安径流峰值响应时间滞后 3~5 h。6 月 23 日及 8 月 16 日降雨量大于 8 月 7 日(表 2),但 8 月 7 日事件中 30 min 最大雨强较大,因此在小尺度苏荣和截流小流域 3 场降雨事件径流峰值差异不大,但在大兴、万安较大流域出口径流峰值则表现为 6 月 23 日事件 > 8 月 16 日事件 > 8 月 7 日事件。

暴雨事件中,苏荣和截流小流域泥沙浓度曲线与径流过程线基本同步(图 2),8 月 7 日降雨事件苏荣、截流小流域泥沙数据缺失),这是因为占苏荣小流域 50% 以上的土地利用方式为不透水地面,且截流小流域农地面积比例较高、沟道坡降较大,上游一处开挖面积达 500 m^2 工地产生的含沙径流能快速汇入苏荣与截流小流域出口。大兴和万安小流域距离上游场镇较远,泥沙在河道中逐渐沉积,并随径流经历约较长的汇流过程,因此泥沙浓度峰值要比降雨峰值延迟 2~3 h(图 2),甚至部分泥沙峰值滞后于径流峰值。6 月 23 日大暴雨后期万安小流域泥沙浓度并未随着径流过程线波动而起伏,这有可能是因为上游源头小流域前期冲刷效应比较显著,降雨停止后退水阶段泥沙浓度逐渐稳定。

表 2 典型降雨事件基本特征

指标	2015-06-23	2015-08-07	2015-08-16
降雨量/mm	106.7	52.7	116.8
降雨历时/h	29.8	24.8	35.4
平均雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	3.6	2.3	3.3
30 min 最大雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	15.0	25.1	7.8
前 7 d 降雨量/mm	9.6	7.2	0.0
降雨侵蚀力/($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	1411.5	595.7	391.4

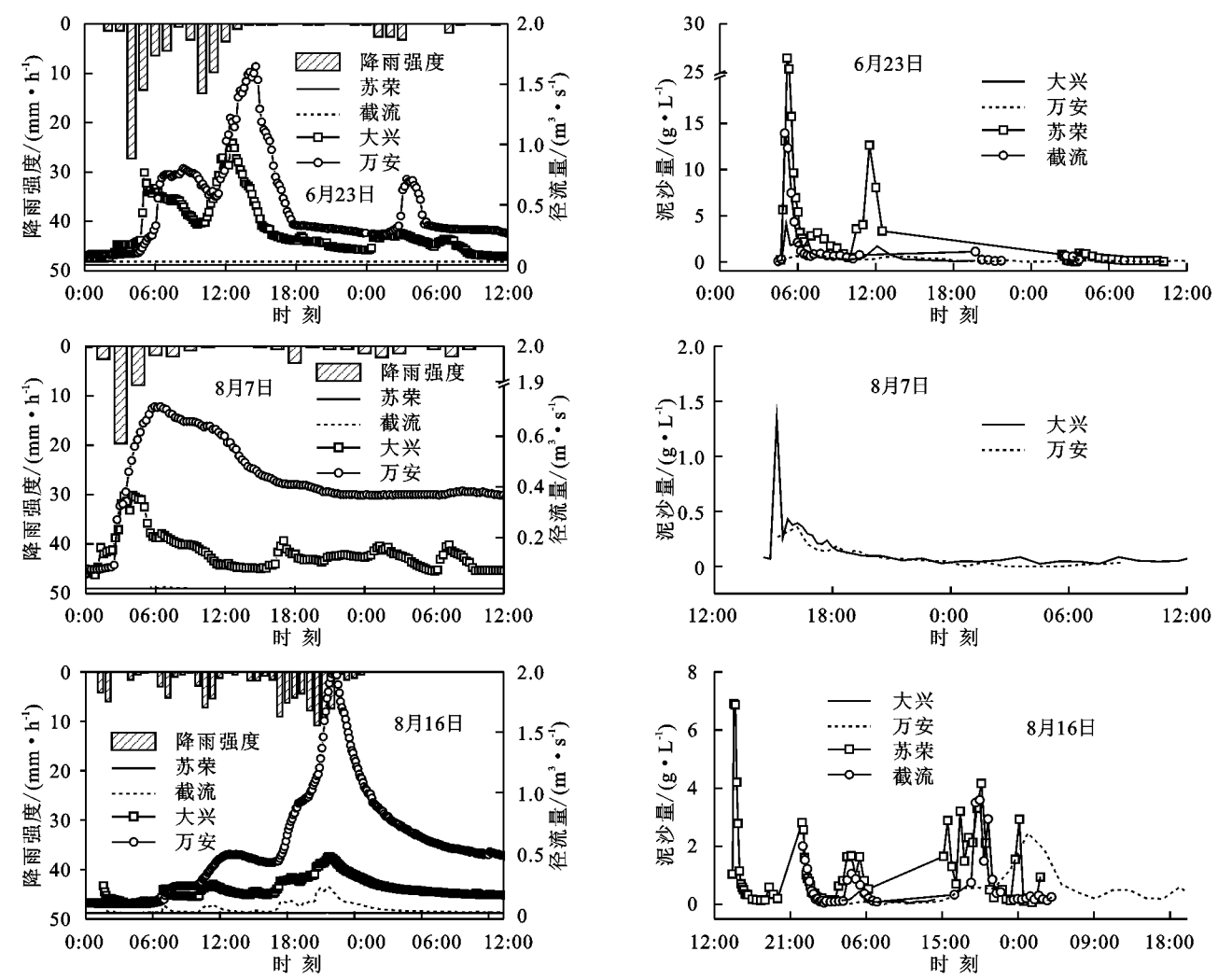


图 2 3 场降雨径流量、泥沙量

2.2 暴雨过程中磷动态运移特征

6 月 23 日降雨事件是 3 场降雨事件中侵蚀力最大的一场暴雨(表 2),苏荣小流域径流中全磷浓度最高值出现在第 2 次降雨峰值后,为 4.36 mg/L(图 3),颗粒态磷浓度达到最高值 3.90 mg/L,截流小流域全磷和颗粒态磷浓度峰值出现在第 1 个降雨峰值后,分别为 5.84 mg/L 和 5.22 mg/L,苏荣和截流小流域在此降雨过程中磷素流失主要以颗粒态磷为主。在以林地为主的大兴和万安小流域径流中全磷浓度明显降低,溶解性磷比例增加。

8 月 7 日暴雨事件历时短、强度大,由于瞬时雨强较大,集镇污水和农地地表累积的磷素迅速随雨水汇入沟渠,进而使得以居民点和农地为主的苏荣和截流源头小流域中全磷和颗粒态磷浓度急剧升高(图 3),其中以居民点污水来水为主的苏荣小流域全磷和颗粒态磷浓度最高,分别是 10.11,9.80 mg/L,截流小流域全磷和颗粒态磷浓度最高值为 9.61,9.19 mg/L。全磷、颗粒态磷浓度峰值在径流消退后迅速下降并趋于稳定,呈现初期强烈冲刷的特征。随着林地面积比例增大,大兴、万安小流域全磷和颗粒态磷浓度峰值明显低于苏荣和截流小

流域。本次降雨事件中,颗粒态磷和全磷动态特征较为一致,前期主要以颗粒态形式为主,退水阶段以溶解性磷为主,且浓度变化相对稳定。

8 月 16 日降雨事件中,降雨强度比前两场略小,以集镇为主的苏荣小流域的全磷,颗粒态磷浓度峰值分别为 3.03,2.75 mg/L(图 3),截流小流域全磷、颗粒态磷浓度峰值分别为 3.82,3.49 mg/L,而大兴小流域全磷、颗粒态磷浓度峰值与 8 月 7 日降雨事件中的浓度峰值相差不大,分别为 1.36,0.26 mg/L,万安小流域出口全磷和颗粒态磷浓度峰值分别为 2.66,2.43 mg/L,略高于 8 月 7 日降雨事件中峰值。结果说明以林地为主的较大尺度小流域磷素流失受瞬时雨强影响越来越小。

本研究中各小流域在 3 场降雨事件过程颗粒态磷占主要成分的时间比例大多低于 30%(表 3),其比例随流域面积增大而增加。大兴、万安小流域在降雨历时较长的 8 月 16 日降雨过程中以颗粒态磷为主要迁移形态持续了较长时间。基于图 2~图 3 中的径流、泥沙与磷素浓度曲线,4 个小流域 3 场暴雨事件中的全磷、颗粒态磷与驱动因子变量进行多元回归分

析结果表明,苏荣、截流及大兴小流域全磷、颗粒态磷浓度与径流、泥沙呈现出极显著相关($P<0.01$)(表

4)。仅 6 月 23 日降雨事件中万安小流域磷素浓度与径流量、泥沙含量间没有显著相关($P>0.05$)。

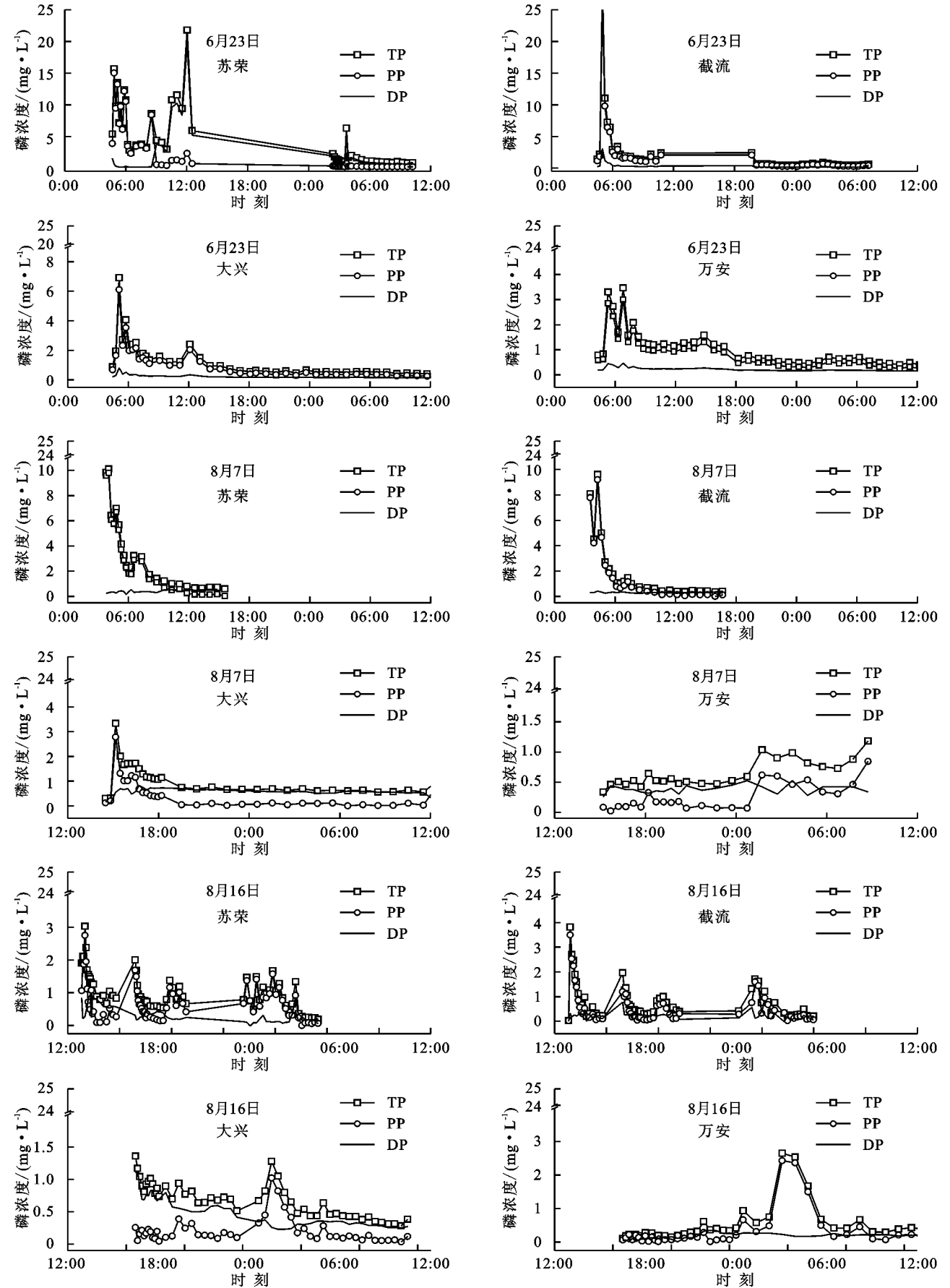


图 3 3 场降雨磷素浓度

表 3 降雨过程 PP 浓度>DP 浓度历时比例

日期 (年-月-日)	降雨 历时/h	小流域	PP>DP 历时/h	PP>DP 占降雨 历时比例/%
2015-06-23	29.8	苏荣	3.85	12.92
		截流	3.20	10.74
		大兴	4.50	15.10
		万安	5.33	17.89
		苏荣	3.25	13.15
2015-8-7	24.8	截流	4.25	17.14
		大兴	6.11	24.19
		万安	7.05	28.23
		苏荣	5.60	15.82
		截流	10.30	29.10
2015-8-16	35.4	大兴	20.01	56.50
		万安	25.50	72.03

2.3 小流域典型暴雨事件泥沙与磷素流失负荷

3 场降雨过程中泥沙流失负荷在源头苏荣小流域最高,其次是截流小流域,随着小流域面积增大,林地比例升高和沟道变缓,大兴、万安小流域出口处的泥沙负荷

最低(表 5)。本研究中源头小流域平均全磷流失负荷略低于前期研究中所监测的居民点次降雨平均流失负荷(0.40 kg/hm²)^[19],随着小流域面积增大,全磷流失负荷明显减小;且颗粒态磷占全磷流失负荷的 33.3%~90.0%,其比例随流域尺度增大而减小。

3 场降雨事件中不同梯级小流域内磷素流失负荷的多元回归分析结果表明,全磷负荷与径流量和泥沙负荷呈极显著相关,颗粒态磷与径流量和泥沙负荷呈显著性相关,其关系式分别可表示为:

$$TPL = (-5.7 \times 10^{-7})DIS + 0.001SSL + 0.025$$
$$R^2 = 0.818 \quad P < 0.01$$

$$PPL = (-9.0 \times 10^{-7})DIS + 0.001SSL + 0.025$$
$$R^2 = 0.756 \quad P < 0.05$$

式中:TPL 为全磷负荷;PPL 为颗粒态磷负荷;DIS 为径流量;SSL 为泥沙负荷。

表 4 全磷、颗粒态磷与径流量、泥沙多因素线性回归分析

日期(年-月-日)	流域	回归关系式	R ²	P
2015-06-23	苏荣	PP=2684.661DIS+0.042SS-0.586	0.490	<0.01
		TP=4749.553DIS+0.014SS-0.831	0.460	<0.01
	截流	PP=0.676DIS+0.029SS+0.020	0.823	<0.01
		TP=6.690DIS+0.283SS-0.028	0.823	<0.01
	大兴	PP= -0.014DIS+0.027SS+0.042	0.854	<0.01
		TP= -0.139DIS+0.265SS+0.191	0.854	<0.01
	万安	PP=0.214DIS+(7.8×10 ⁻⁵)SS+0.028	0.076	<0.01
		TP=2.116DIS+0.001SS+0.053	0.076	>0.05
	大兴	PP=3.306DIS+0.439SS-0.194	0.435	<0.01
		TP=3.667DIS+0.493SS+0.258	0.439	<0.01
2015-08-07	万安	PP= -1.115DIS-0.483SS+0.457	0.247	<0.01
		TP= -1.396DIS-0.455SS+0.876	0.301	<0.01
	苏荣	PP= -516.339DIS+0.252SS+0.581	0.547	<0.01
		TP= -1460.958DIS+0.228SS+1.337	0.473	<0.01
2015-08-16	截流	PP= -2.061DIS+0.459SS+0.176	0.820	<0.01
		TP= -3.928DIS+0.535SS+0.426	0.761	<0.01
	大兴	PP= -0.175DIS+0.621SS+0.118	0.375	<0.01
		TP= -2.160DIS+1.079SS+0.973	0.559	<0.01
	万安	PP=0.524DIS+0.871SS-0.101	0.800	<0.01
		TP=0.590DIS+0.839SS+0.117	0.797	<0.01

注:DIS 表示径流量(m³/s);SS 表示泥沙浓度(g/L)。

表 5 3 场暴雨事件中各小流域径流量、泥沙、磷素流失负荷

日期(年-月-日)	流域	流域 面积/hm ²	径流负荷/ (m·hm ⁻²)	泥沙流失负荷/ (kg·hm ⁻²)	TP 流失负荷/ (kg·hm ⁻²)	PP 流失负荷/ (kg·hm ⁻²)	PP 和 TP 比/%
2015-06-23	苏荣	3.0	275.78	523.44	0.57	0.440	77.2
	截流	34.6	107.11	73.45	0.12	0.100	83.3
	大兴	480.0	32.13	47.98	0.05	0.020	40.0
	万安	1236.0	24.69	1.84	0.01	0.003	33.3
2015-08-07	苏荣	3.0	101.78	—	0.40	0.360	90.0
	截流	34.6	34.26	—	0.03	0.002	66.7
	大兴	480.0	21.39	4.87	0.02	0.010	50.0
	万安	1236.0	21.47	0.81	0.01	0.003	42.9
2015-08-16	苏荣	3.0	273.44	160.44	0.12	0.090	75.0
	截流	34.6	106.94	106.76	0.08	0.060	75.0
	大兴	480.0	37.55	12.44	0.05	0.020	40.0
	万安	1236.0	27.88	21.17	0.01	0.003	33.3

3 讨论

3.1 暴雨过程径流、泥沙迁移过程的空间尺度变化特征

本研究中较小尺度的源头小流域(苏荣、截流)径流峰值易受瞬时雨强影响,较大流域径流峰值则主要受降雨量影响,这与汇流面积大小及其下垫面透水性有关,苏荣小流域内集镇区及道路区降雨初损率低,产流迅速。3场降雨事件过程中苏荣、截流小流域泥沙平均浓度分别为 2.09, 0.99 g/L, 大兴、万安小流域径流中泥沙平均浓度为 0.40, 0.34 g/L, 呈现出从源头到出口逐渐递减的趋势(图 2)。暴雨事件中源头小流域苏荣、截流泥沙流失负荷高于大兴、万安小流域(表 5), 主要是因为苏荣小流域城镇建设活动导致泥沙大量流失, 同时截流小流域农地比重较高(表 1), 也导致较多泥沙输出。苏荣、截流小流域海拔较高, 沟渠比降大, 径流中泥沙不易沉积; 而大兴、万安小流域有较高林地比例, 泥沙来源相对较少, 且沟道比降较小, 上游来水流经沟谷、水田等湿地景观时, 泥沙更容易被截留, 使得泥沙流失负荷降低。此外, 研究区内林地、坡耕地、水田带状相间, 水田位于沟谷, 这种带状组合结构加强了不同坡面径流和泥沙的拦截作用, 也是下游更大尺度小流域泥沙流失负荷逐渐降低的重要原因。

3.2 暴雨过程磷素迁移形态及尺度差异分析

本研究小流域暴雨过程中磷素迁移特征在不同时空尺度有明显差异。暴雨过程中磷素流失主要以吸附在泥沙上的颗粒态磷为主(图 3), 颗粒态磷占磷素流失负荷均在 60% 以上(表 5), PP 浓度 > DP 浓度时间在降雨历时中比例随流域面积增大而增加(表 3)。虽然源头小流域径流以颗粒态磷为主的磷素迁移历时短, 但其来源主要为集镇生活污水, 浓度和流失负荷均明显高于较大尺度小流域, 且源头小流域颗粒态磷浓度随径流急剧变化, 而较大尺度小流域林地比例增加, 居民点、耕地比例减少, 径流携带的颗粒态磷浓度及单位流失负荷比例均降低。前期研究结果表明, 源头小流域主要为集镇区, 其磷素输出负荷较高^[20-22]。本研究结果也与奶水河流域颗粒态磷负荷空间分布规律相似^[23]。部分降雨场次(8月16日)万安出口磷素负荷略高于大兴出口, 可能是来自于下游支沟更多的养殖污染在雨季后期累积冲刷的贡献。

多种因素控制着丘陵区农业小流域径流中的泥沙和磷输出。如降雨侵蚀力、地形、农业施肥、植被覆盖度、土地利用结构在时空尺度上均存在差异^[21]。降雨侵蚀力是影响磷素迁移的重要因素, 2015年6月23日、8月7日、8月16日降雨侵蚀力分别为 1 411.5, 391.4, 595.7 MJ·mm/(hm²·h), 磷素流失负荷与降雨侵蚀力呈现出正相关关系(表 4)。农业小流域化肥施

用是造成农业面源污染的重要因素。本研究小流域农地面积占总面积的 37.1%, 在部分小流域中甚至占到 55% 以上, 而旱地和水田施肥方式多为撒施, 导致磷素向水体迁移风向增大。6月23日降雨前正是小流域旱地和水稻施肥后的第一场暴雨, 各小流域径流磷素浓度明显高于其他两场事件, 因此施肥后首场大暴雨对径流水体磷通量贡献不容忽视^[23]。本研究中植被覆盖度变化并没有呈现对 3 场雨季暴雨过程中泥沙和磷素浓度特征的明显影响, 这也一定程度上降低了复杂农业小流域磷素流失预测的难度^[23]。

泥沙与磷素迁移密切相关, 在动水条件下, 磷素以颗粒态磷形式吸附在泥沙表面, 暴雨因子是磷素流失的主要驱动力, 静水条件下, 磷素存在水底会通过解吸方式释放到水体中, 磷素污染指标主要是溶解性磷, 这种吸附—解吸过程在雨季与非雨季磷素迁移方面均发挥重要作用^[24]。总体而言, 较小尺度小流域(苏荣、截流、大兴)径流全磷、颗粒态磷浓度与径流、泥沙均呈现出极显著相关($P < 0.01$), 根据这些相关关系, 可建立相应区域的多元线性回归模型, 从而预测特定区域和暴雨条件下的磷素流失风险。本研究系统揭示了小流域多尺度下暴雨过程磷素迁移动态规律及其径流和泥沙影响过程, 为该区域农业小流域多尺度磷素迁移负荷计算和预测奠定了科学基础。

4 结论

(1) 较小尺度小流域(苏荣和截流)水文响应速度较快, 通常在降雨 5~10 min 后达到峰值, 且泥沙浓度曲线与径流过程线同步, 较大尺度小流域(大兴和万安小流域)泥沙含量峰值与径流峰值滞后于降雨峰值 0.5~3 h。

(2) 泥沙与全磷、颗粒态磷均显著相关($P < 0.01$)。泥沙、全磷流失负荷在源头小流域(苏荣、截流)最高, 3 场暴雨苏荣全磷平均流失负荷达到 0.36 kg/hm², 万安小流域泥沙、全磷流失负荷最低, 全磷平均流失负荷为 0.009 kg/hm²。

(3) 暴雨是泥沙和颗粒态磷流失的主要驱动力, 3 场降雨事件过程颗粒态磷占主要成分的时间比例大多低于 30%, 但颗粒态磷流失量占全磷流失量 50% 以上。

(4) 3 场降雨事件中不同梯级小流域内磷素流失负荷的多元回归分析结果表明, 全磷负荷与径流量和泥沙负荷呈极显著相关($R^2 = 0.818, P < 0.01$), PP 与径流量和泥沙负荷呈显著性相关($R^2 = 0.756, P < 0.05$), 林地、坡耕地与水田带状组合结构可降低小流域泥沙和磷素流失风险。

参考文献:

- [1] 陈野, 李青云, 曹慧群. 河流泥沙吸附磷的研究现状与展望[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 12-16.
- [2] 窦培谦, 王晓燕, 王丽华. 非点源污染中氮磷迁移转化机

- 理研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 93-98.
- [3] Beusen A H W, Dekkers A L M, Bouwman A F, et al. Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): 577-597.
- [4] Paerl H W. Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 26(1): 40-54.
- [5] 黄满湘, 章中, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. *水土保持学报*, 2003, 40(2): 306-310.
- [6] 杨育红, 阎百兴. 降雨—土壤—径流系统中氮磷迁移[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 27-30, 58.
- [7] 王超, 赵培, 高美荣. 紫色土丘陵区典型生态—水文单元径流与氮磷输移特征[J]. *水利学报*, 2013, 44(6): 748-755.
- [8] 高扬, 朱波, 王玉宽, 等. 自然和人工模拟降雨条件下紫色土坡地的磷素迁移[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 34-37.
- [9] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. *水利学报*, 2010, 40(11): 1374-1381.
- [10] 李新艳, 王芳, 杨丽标, 等. 河流输送泥沙和颗粒态生源要素通量研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 558-566.
- [11] 王静, 丁树文, 蔡崇法, 等. AnnAGNPS 模型在丹江库区黑沟河流域的模拟应用与检验[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 907-912.
- [12] 向速林, 陶术平, 王逢武. 赣江下游不同样地降雨径流氮磷污染负荷估算[J]. *生态科学*, 2016, 35(2): 62-65.
- [13] Tang J L, Zhang B, Gao C, et al. Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment[J]. *Catena*, 2008, 72(3): 374-385.
- [14] 欧胜. 川中丘陵区坡耕地土壤侵蚀及治理对策研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [15] 李林育. 四川盆地丘陵区降雨侵蚀与输沙特征[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [16] Tang J L, Wang T, Zhu B, et al. Tempo-spatial analysis of water quality in tributary bays of the Three Gorges Reservoir region (China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21): 16709-16720.
- [17] 王芮, 唐家良, 章熙锋, 等. 亚热带农业小流域暴雨过程硝态氮迁移特征及水文示踪研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(8): 996-1004.
- [18] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1353-1358.
- [19] 沈茜, 唐家良, 朱波. 紫色丘陵区典型小流域非点源磷迁移特征[J]. *山地学报*, 2015, 33(5): 528-537.
- [20] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. *中国水土保持*, 2010(10): 34-36, 71.
- [21] 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土丘陵区农村集镇降雨径流污染特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1823-1831.
- [22] 徐泰平, 朱波, 况福虹, 等. 平衡施肥对紫色土坡耕地磷素径流流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 1055-1059.
- [23] 薛金凤, 夏军, 梁涛, 等. 颗粒态氮磷负荷模型研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 334-337.
- [24] 肖懿, 唐家良, 朱波, 等. 丘陵区紫色土不同土地利用方式下磷的吸附解吸特性[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 40(1): 58-64.

(上接第 55 页)

- [16] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 11-18.
- [17] 李洪丽, 韩兴, 张志丹, 等. 东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 49-52.
- [18] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 1-11.
- [19] 李小华, 曹月娥, 杨建军. 人工模拟降雨条件下伊犁河流域黄土区土壤侵蚀试验分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 36-40.
- [20] 刘培娟, 马文贵, 杨吉华, 等. 鲁中南山区径流小区不同坡度条件下 4 种植被的水土流失规律研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 338-340.
- [21] 朱文杰, 王占礼, 袁殷, 等. 黄河班多水电站工程区荒地坡面产流过程试验研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 7-11.
- [22] 陆阿飞. 三江源区河南县草地植被退化状况及解决措施[J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2014, 44(6): 57-58.
- [23] 倪三川, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 室内模拟降雨条件下黄土植被边坡径流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 22-25.
- [24] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 129-137.
- [25] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 14-18.
- [26] 郭铁瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 135-139.
- [27] 王辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 39-44.
- [28] 王辉, 王全九, 邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 10-13, 18.