

土石山区不同农作方式下坡面径流氮素流失过程

刘晓君¹, 李占斌^{1,2}, 宋晓强³, 同新奇³, 张铁钢², 龙菲菲²

(1. 中国科学院水利部黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 3. 陕西省水土保持局, 西安 710004)

摘要: 采用人工模拟降雨方法研究裸地(BL)、花生(PL)、50%裸地+50%花生(BP)、50%玉米+50%花生(CP)和秸秆覆盖(SC) 5 种农作方式下, 丹江鹳鹑沟小流域坡面小区径流氮素流失规律。结果表明: 地表径流总量表现为裸地 BL>SC>CP>BP>PL; 随降雨时间延续, 地表径流均呈不同程度增加趋势, 其中 BL 小区增长速度最快, BP 措施下出流时间最长(降雨后第 6 min), 花生立地条件下每 5 min 地表径流变化稳定在 0.30~3.46 L 之间。径流中氮素流失浓度表现为 BP>CP>PL>BL>SC, 随时间呈波动增加趋势, 沿坡面由上至下表现为先减小后增加。受农作方式的影响, 氮素流失在时间、空间上变化规律不同; 总氮、硝态氮流失浓度最大增幅分别可达 45.54% 和 55.79%, 流失量分别在 15.90~110.81 mg/m² 和 15.58~90.33 mg/m² 之间; 径流中氮素浓度的变异性略大于对应的地表径流。农作方式与硝态氮呈正相关, 与总氮相关性不显著。在鹳鹑沟小流域农田养分流失不容忽视, 需进一步采取有效的水土保持措施。秸秆覆盖措施既能有效保持土壤养分, 又可保证入河径流量, 是值得推荐的水保措施。

关键词: 模拟降雨; 农作方式; 氮素流失; 迁移过程

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2015)01-0080-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.01.017

Characteristics of Nitrogen Loss Under Different Farming Practices of Slope in Mountain Areas

LIU Xiaojun¹, LI Zhanbin^{1,2}, SONG Xiaoqiang³, TONG Xinqi³, ZHANG Tiegang², LONG Feifei²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area at XAUT, Xi'an 710048; 3. Shaanxi Provincial Bureau of Soil and Water Conservation, Xi'an 710004)

Abstract: In this study, the loss of nitrogen(N) with different agricultural practices(AP) was studied by field simulated rainfall in Yingwugou watershed, Dan River. Results indicated that the order of amount of surface runoff was that bare land(BL)>straw cover(SC)>50% corn+50% peanut(CP)>50% bare land+50% peanut(BP)>peanut land(PL). The initial runoff-yielding time was different between five kinds of AP and had no significant effects on the volume of surface runoff. With the increase of rainfall time, surface runoff under different coverage increased with different trends. In the beginning, the surface runoff increased stably. At the mid- to late of the rainfall, the fluctuation of surface runoff became bigger. The surface runoff increased under different stocking rates with the rainfall time and the runoff per 5 min ranged from 1.48 L to 20.66 L on bare land which had the highest growth rate. The nitrogen concentration in surface runoff with different AP increased in fluctuation with rainfall time, and followed the order of BP>CP>PL>BL>SC. Analysis of variance revealed significant differences among the five kinds of AP. As a soil and water conservation measures in water source area, straw mulching not only ensure abundant water but also conserve soil nutrient effectively. The concentration of N loss increased in fluctuation with rainfall time which the largest range for total N and nitrate N were 45.54%, 55.79%, respectively. From top to bottom of the slope, the N loss

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目“复杂下垫面坡改梯技术及配套工程设计技术标准”(2011BAD31B01); 水利部公益性行业科研专项经费项目“小流域淤地坝坝系防洪风险评价技术项目”(201201084); 陕西高校省级重点实验室科研项目“植被覆盖与格局变化对非点源污染过程调控机理试验研究”(12JS065)

第一作者: 刘晓君(1988-), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事非点源污染与土壤侵蚀研究。E-mail: Liuxiaojun.lxj@163.com

通信作者: 李占斌(1962-), 男, 河南镇平人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zbli@126.com

decreased firstly, and then increased. For all the sampling points of the slope, the concentration of N loss increased at the early and middle stage of rainfall. But the stabilization had been gradually achieved at the later stage. Under the five kinds of conditions, the amounts of TN and nitrate N loss were in the 15.90~110.81 mg/m² and 15.58~90.33 mg/m² respectively. Even though the straw mulching could reduce the runoff, the nutrient loss under the straw mulching was not the least. Therefore, only combing with other measures of soil and water conservation can improve the capacity of holding water and soil nutrient. The variability of nutrient loss was higher than that of surface runoff which indicated that the nutrient loss was more likely to be affected by environmental factors. According to the correlation analysis, the AP was positively related with nitrate N and had no obvious correlation with total N. This indicated that more attention should be paid to the nutrient loss on farmland in Yingwugou watershed, and effective measures must be adopted. As a soil and water conservation measures in water source area, straw mulching not only ensure abundant water but also conserve soil nutrient effectively in Yingwugou watershed. For reasonable and targeted watershed management, various measures should be combined.

Key words: simulated rainfall; farming practices; nitrogen loss; migration process

水土资源作为农业生态系统中最为重要的自然资源,为人类生存和发展提供物质基础。严重的水土及养分流失制约了社会经济的发展,加速了土壤生态系统的恶性循环^[1-2]。伴随着土壤侵蚀,附着在土壤颗粒表面上的各种养分随之流失,并沿坡面小区汇入收纳水体,造成富营养化及其他形式的非点源污染^[3-5]。土壤养分流失途径主要为径流泥沙携带和径流携带^[6],经过径流的浸提作用,吸附在土壤颗粒表面的养分离离子因径流的冲洗作用而解吸,土壤可溶性养分得到扩散,而在径流沿坡面冲刷作用下,一些土壤颗粒被径流泥沙携带流出坡面。目前,国内外关于不同土地利用方式^[7-8]、耕作方式^[9-10]、施肥等^[11]对坡地水土和养分流失影响的研究较多。与传统耕作相比,免耕、横垄、秸秆覆盖及留茬可有效抑制土壤侵蚀和保墒保肥^[12-13],但对径流量影响较小^[14];植被覆盖面积越大,对坡面径流养分调控作用越强。尽管相关研究较多,但多集中于径流出口,针对坡面养分由上至下的迁移机制研究较少^[15]。本文从坡面径流养分流失角度出发,对丹汉江水源区径流中总氮、硝态氮在不同农作方式条件下坡面流失特征及迁移过程进行研究,有助于揭示土壤养分随径流迁移的机制,可为陕南水源地区水土—养分流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鸚鵡沟小流域径流场位于陕西省商南县城东南 2 km 处的城关镇五里铺村(110°52′16″—110°55′30″E,33°29′55″—33°33′50″N),是商南县二期“长治”工程东北山流域的一条支沟,地处丹江流域下游,土地总面积 1.86 km²,主沟长为 3.23 km,主沟道最大比降为 0.01 m/m。流域内多低山丘陵,河谷开阔,最高海拔为 600 m,最低海拔 464 m。该流域处于北亚热带和暖温带过渡区,具有气候温和、日照充足、雨量充沛、四季分明的特点。降水年内分配不均,主要集中在 7—9 月,占年降水量 50%左右,且多以暴雨形式出现。流域内以黄棕壤、风化石壤土为主,有机质、微量元素较为缺乏。受土壤、气候及地形等影响,流域内植被多为常绿阔叶林。

1.2 试验设计

2012 年 9—10 月在鸚鵡沟小流域开展人工模拟降雨试验。采用西安理工大学设计生产的下喷式人工模拟降雨机,降雨前对水泵功率及降雨强度进行率定,并选择无风天气进行人工降雨以排除风力影响。试验降雨强度为 1.2 mm/min,降雨时间为 1 h,每场降雨时间间隔为 24 h。基于野外实地调查并结合研究区坡耕地斑块面积小且零碎的特点,根据地形特征,建立径流监测小区,修建径流小区均为水泥砂浆抹面,挖深 60 cm,埋深 40 cm,出露 20 cm,周边用单砖浆砌,以防止小区径流流出及小区外径流流入。模拟降雨小区长 10 m,宽 2 m,坡度 10°。各处理对应的土壤总氮含量为:裸地(BL)0.72 g/kg,花生(PL)0.78 g/kg,50%裸地+50%花生(BP)0.83 g/kg,50%玉米+50%花生(CP)0.77 g/kg 和秸秆覆盖(SC)0.78 g/kg。硝态氮含量为:裸地(BL)15.20 mg/kg,花生(PL)13.12 mg/kg,50%裸地+50%花生(BP)14.73 mg/kg,50%玉米+50%花生(CP)14.96 mg/kg 和秸秆覆盖(SC)12.54 mg/kg。不同农作方式下氮素水平大体相同,保证了前期降雨条件一致。各场降雨均为 1 次,每次降雨量约为 1 440 L,其中 BL 处理采集水样 39 个,PL 处理采集水样 23 个,BP 处理采集水样 43 个,CP 处理采集水样 45 个,SC 处理采集水样 29 个,共计 179 个。

在降雨过程中准确记录相关降雨时间节点,将玻璃瓶放置在坡面上中下共 4 处(自上而下编号为 A 点、B 点、C 点、D 点)收集地表径流(图 1),每 5 min 采集 1 次,降雨停止后收集其延续产流。通过在小区出口采集的地表径流量(每 5 min)计算平

均径流量,公式为: $Q_5 = \sum_{i=1}^n Q_{5i} / n$

式中: Q_5 为每 5 min 平均地表径流量(L); Q_{5i} 为在小区出口每 5 min 采集并测定的地表径流量(L); n 为出口处采集的每 5 min 地表径流样品个数。

同理,通过测定的坡面上各个采集点径流中氮素浓度计算

其平均浓度,公式为: $C_{N5} = \sum_{i=1}^{n'} C_{N5i} / n'$

式中: C_{N5} 为各点每 5 min 氮素平均流失浓度(mg/L); C_{N5i} 为在坡面各点每 5 min 采集并测定的地表径流中氮素流失浓度量(mg/L); n' 为坡面各点采集的每 5 min 地表径流样品个数。

1.3 样品分析及数据处理

降雨过程中收集每一时间段内的径流上清液,经 0.45 μm 滤膜(上海谱振生物科技有限公司)过滤后的径流水样即刻带回实验室分析其养分含量。总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)质量浓度利用 CleverChem200 全自动间断化学分析仪(德国 DeChem-Tech. GmbH 公司)测定。

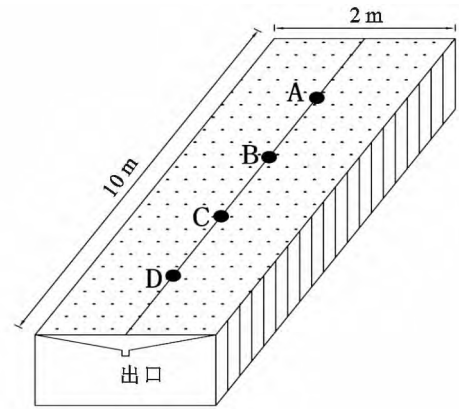
2 结果与分析

2.1 地表径流特征及产流过程

2.1.1 不同农作方式下的地表产流特征 PL、BP、CP、SC、BL 农作方式下的径流总量分别为 23.39, 48.03, 121.92, 146.24, 188.92 L。根据 ANOVA 分析,各农作方式下产流有显著性差异($P < 0.01$),多重比较结果显示,5 种方式下平均径流量从小至大被分为 3 个子集,其中 PL、BP 条件下的径流总量显著小于 SC 及 CP 方式($P < 0.01$),BL 条件下径流总量最高,并与其他方式的径流总量差异显著($P < 0.01$)。在 BL 情况下,地表覆盖度为 0,坡面对水流形成的阻力非常小,积水顺水能力较强,极易产生汇流;秸秆在一定程度上能保护地表(SC),其产生的地表径流量比 BL 减少了 22.60%($P < 0.01$),但其总径流量仍然高于其他方式($P < 0.01$)。由于花生作物茎叶繁茂,地上部生物量较大,雨水经枝叶一次或多次截留,且在坡面停留时间相对变长,通过土壤孔隙下渗形成壤中流,因此与 BL 相比,相同降雨条件下产生的地表径流总量减少了 87.62%($P < 0.01$),可见高植被覆盖度可以高效减少径流。为了比较 BL 与高覆盖度小区的地表径流差异,笔者在同一小区以 BP 为植被立地,得到的地表径流总量为 48.03 L,是覆盖 PL 的 2.05 倍($P < 0.01$)。而与之相比,CP 小区在相同降雨条件下所产生的地表径流高达 121.92 L,分别是 PL 及 BP 的 5.21 倍和 2.54 倍($P < 0.01$),这可能是由于更多雨滴沿玉米叶汇流,促进了地表径流的形成与汇集。

2.1.2 不同农作方式下的径流过程 由地表径流随降雨时间的动态变化过程(图 2)可以看出,不同农作方式下小区的每 5 min 地表径流(Q_5)在降雨过程中基本呈现逐渐增加的趋势(PL 和 CP 除外),径流变化的变异系数值介于 36.22%~51.21%之间,平均变异度为 43.08%。裸露的地表(BL)没有任何保护措施,其地表径流增加最为迅速和明显,径流变化范围较大,介于 1.48~20.66 L 之间;由于花生作物繁茂的茎叶具有明显的拦截径流的作用,花生小区所产生的径流时间均比无花生作物的降雨产流晚。PL 及 BP 分别在降雨后 3,6 min 开始产流,并且在整个降雨过程中其地表径流的变化幅度趋势都比其他措施下

小,虽然 PL 立地条件下地表径流初始产流时间相对较短,但其每 5 min 变化范围(0.30~3.46 L)均始终为最小,BP 措施下变化范围也相对较小(0.30~8.27 L);对于 SC 小区,秸秆为水流提供了良好的汇流路径,因此仅在降雨 1 min 后便开始产流,除 BL 外,其径流增长速度最高,30 min 内径流量增加了 2.09 倍,随后其水保



注:A、B、C、D 代表采集径流样品位置。

图 1 模拟降雨小区示意图

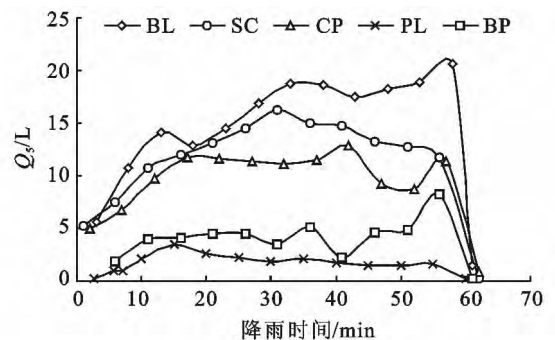


图 2 不同农作方式下地表径流动态变化特征

效果明显,地表径流量逐渐降低;CP 的立地条件下地表径流在降雨初期增加明显,17 min 内径流量增加了 1.36 倍,变化范围介于 0.83~12.92 L 之间,相对于 SC,其径流峰值出现较晚,出现时间为降雨后 42 min。总之,不同农作方式下的坡面径流在降雨初期基本都属于平稳增加,中后期波动较明显。

2.2 径流养分流失特征

表 1 为本次模拟降雨试验中不同农作方式下径流氮素平均流失浓度。根据地表水环境质量标准(GB 3838—2002),研究小区总氮和硝态氮的浓度均超过集中式生活饮用水标准;本研究铵氮浓度在 I 类标准(0.15 mg/L)范围内。因此,氮素流失成为研究区非点源污染的防治重点,其中硝态氮是重中之重。降雨过程中,秸秆覆盖在地表直接承受降雨,保护了表层土壤免受击溅侵蚀,从而使得养分流失防治效果十分明显。SC 条件下径流养分流失浓度基本均为最低($P<0.01$),以硝态氮为例,相对于 BL、P、CP 和 BP,

表 1 不同农作方式下径流

氮素平均流失浓度 mg/L

农作方式	总氮	硝态氮
BL	12.84	11.23
SC	12.36	10.95
PL	13.98	13.56
CP	14.31	12.29
BP	14.36	12.98

SC 下硝态氮平均流失浓度分别减少了 2.50%,19.24%,10.89%和 15.67% ($P<0.01$),说明水保措施可以明显减弱养分的流失。农地径流养分流失浓度明显高于其他农作方式下的流失浓度,甚至高于 BL($P<0.01$),其中 BP 立地条件下各养分流失浓度均相对较高,其挡雨、吸水和缓流的作用使径流带走土壤养分的能力降低。结合地表径流量特征,可知在陕南县鹦鹑沟小流域秸秆覆盖不仅可以减少养分流失,还能保证水分畅通。8—10 月份正是玉米收获季节,也是降雨多发季,以南水北调中线工程水源地角度考虑,在保证农民粮食生产的同时,对研究区实施水土保持措施时,可以优先选择秸秆覆盖对坡耕地进行保护。

2.3 坡面不同部位的径流氮素流失特征

为了分析不同农作方式下氮素流失的空间变化,以降雨时间为横轴,氮素流失浓度为纵轴作坡面由上至下 A、B、C、D 点氮素流失变化图(如图 3)。由 BL 立地条件下坡面各处氮素随时间变化知,随降雨历时增加,总氮和硝态氮流失浓度均呈增加趋势(B 点铵态氮变化趋势除外),40 min 内 A、B、C、D 各点硝态氮浓度分别增加了 36.94%,32.91%,13.01%和 54.50% ($P>0.05$);40 min 内 A、B、C、D 各点总氮浓度分别增加了 45.54%,41.66%,23.98%和 55.79% ($P>0.05$),D 点氮素浓度增加比率最大。其中坡面上部(A 点)氮素流失浓度整场降雨过程中均呈持续增加趋势,B、C、D 点氮素浓度呈波动性增加,且与总氮相比,硝态氮浓度变化更剧烈。SC 小区氮素流失浓度明显低于 BL 小区,坡面各部位总氮及硝态氮平均流失浓度分别较 BL 小区减少了 6.0%和 5.0% ($P<0.01$),而且随降雨历时增加 A、B、C、D 各点总氮流失浓度增加幅度也较 BL 小区低,分别为 23.48%,14.97%,17.07%和 26.89% ($P>0.05$);A、B、C、D 各点硝态氮流失浓度增加幅度也较 BL 小区低,分别为 22.21%,11.91%,16.36%和 22.05% ($P>0.05$)。说明秸秆覆盖这一水土保持措施在一定程度上可以减少降雨过程中的氮素流失并减缓其流失浓度的增加,因此在未来的水土保持与非点源污染治理中可将其作为有效措施加以普及和应用。CP 立地条件下,小区各点地表径流中氮素流失浓度在降雨过程中的变化显示,随着降雨历时增加,总氮和硝态氮的流失浓度均呈现波动性增加,且硝态氮流失浓度变化幅度大于总氮。A、B、C 和 D 点总氮增加幅度分别为 10.02%,23.61%,20.41%和 33.29% ($P>0.05$);A、B、C 和 D 点硝态氮增加幅度分别为 21.02%,21.32%,12.62%和 39.02% ($P>0.05$)。其流失程度比 SC 条件严重,但仍比 BL 条件下有所减缓,说明农作物在一定程度上也起到了保护地表养分流失的作用。与 BL、SC 相似,坡面小区下部(D 点)流失浓度增加幅度最大。BP 立地条件下,总氮和硝态氮流失浓度变化规律相似:整场降雨各点总氮流失浓度增加幅度分别为 11.85%,13.60%,3.63%和 19.17% ($P<0.01$);整场降雨各点硝态氮流失浓度增加幅度分别为 31.52%,12.42%,3.89%和 11.18% ($P<0.01$)。由于坡面上部为裸地,因此 A、B 点养分流失浓度增加幅度相对较高,而花生在坡面下部起到了拦截径流减缓养分流失的作用,因此其氮素流失浓度增加幅度最低达到 3.63%,而坡面下部的氮素流失浓度也呈现明显的波动性变化,正是花生作物对径流拦截及减缓养分流失的体现。

2.4 不同农作方式氮素负荷输出特征

氮素随地表径流的流失特征(图 4)与径流总量变化特征相似,均随降雨历时延续呈逐渐增加的趋势。次降雨下 BL、CP、SC、BP、PL 农作方式总氮流失量依次为 110.81,83.12,73.92,33.03,15.90 mg/m² ($P<0.01$);硝态氮流失量依次为 90.33,73.10,67.93,28.62,15.58 mg/m² ($P<0.01$);硝态氮占总氮比例均高于 80%。总氮与硝态氮流失过程基本一致,其流失量的波动幅度较径流量大,各农作方式下养分流失量变异系数在 38.47%~50.97%之间,属于中等变异。尤其是 BL 和 CP 立地条件下,数据离散程度较大。其中由于裸地没有保持养分的作用力,氮素流失量增加较快,因此变异系数较大;而 CP 条件下,玉米枝叶承受降雨,形成较

大雨滴对土壤产生击溅作用,使得氮素的流失更加复杂,其流失量变动幅度也相对较大。虽然秸秆覆盖对养分的保持能力较强,但由于其截留作用不明显,因而 SC 条件下的养分流失量仍较高。

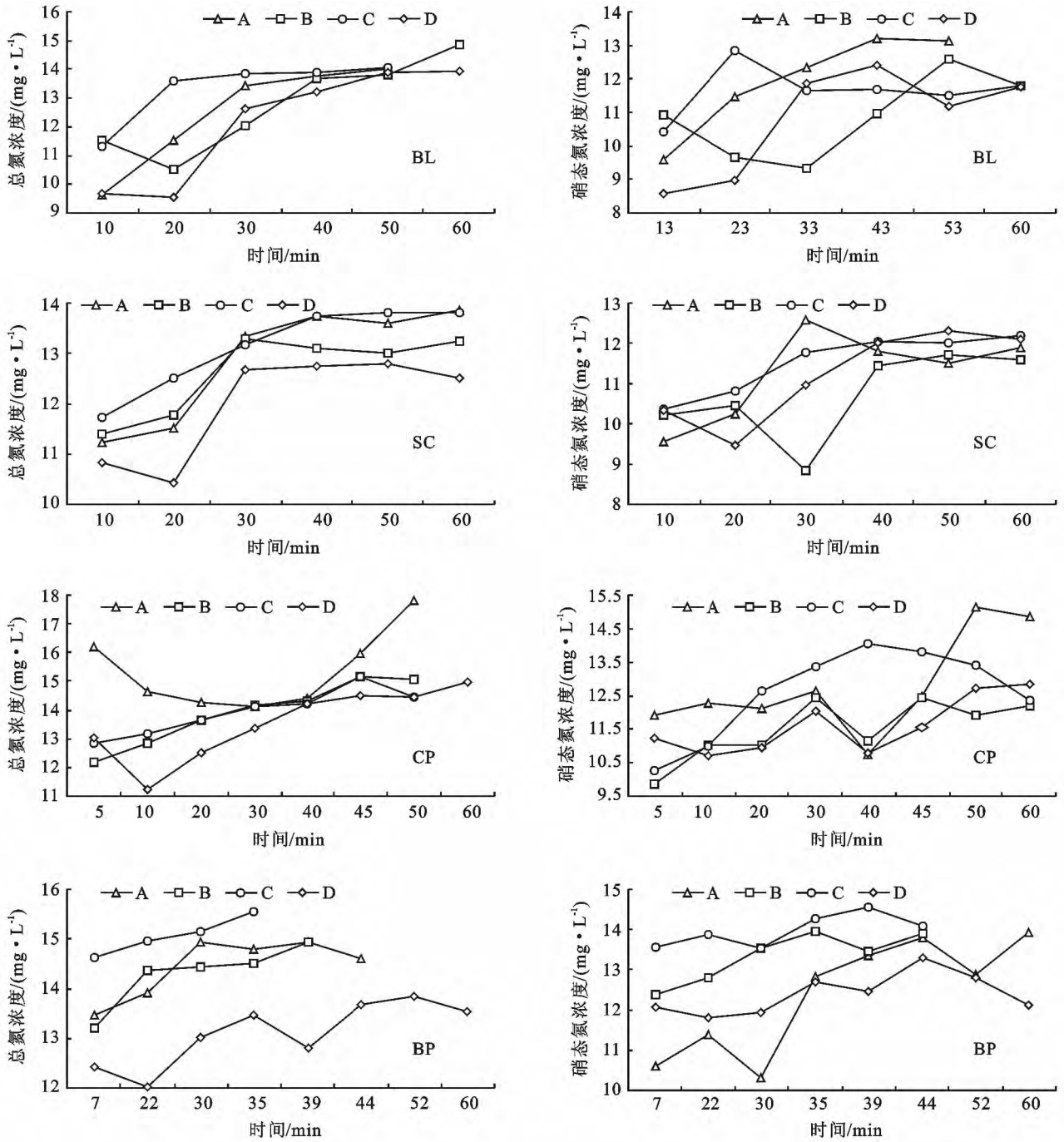


图 3 不同农作方式下坡面氮素流失过程

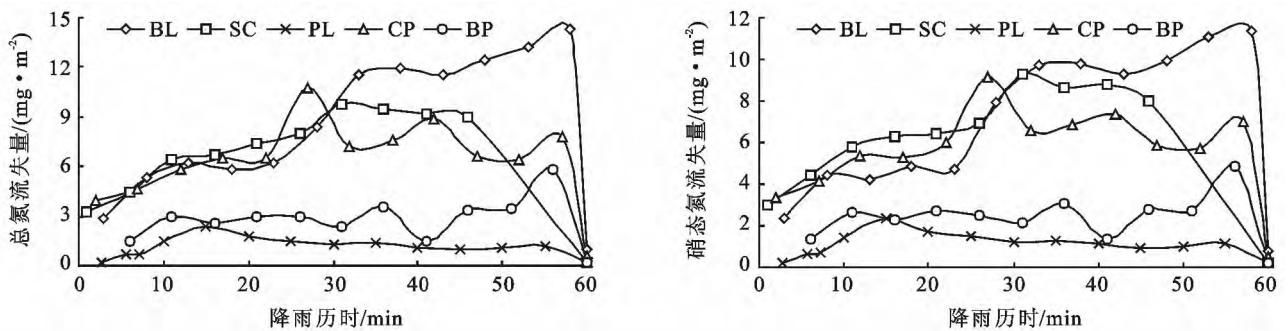


图 4 不同农作方式氮素养分流失量

2.5 各养分流失浓度与农作方式的关系

不同农作方式对坡面小区各养分在径流中的流失浓度有很大影响,为分析不同养分流失与农作方式之间的相关性,以各农作方式量下的植被覆盖度作为统计量,其中 BL 为 0%,SC 为 95%,PL 为 90%,CP 为 80%,BP 为 50%,计算其相对应立地条件下地表径流中各养分流失浓度的相关性及其显著水平。由表 2 可知,总氮与硝态氮相关性最好,其系数可达 0.812,并达到极显著相关($P < 0.01$),而总氮流失浓度与农作方式相关系数较小,且均未达到显著相关($P > 0.05$);相反,农作方式与硝态氮流失浓度呈现显著正相关,说明相对于总氮,种植农作物使得硝态氮更易流失。高覆盖度能有效减小地表径流,但对养分保持作用不明显,相反,种植农作物面积越大,其氮素流失表现得越严重,因此为了更好地保持研究区的养分,应适当加强农田覆盖管理,促进秸秆还田,从而更加有效地促进氮素流失控制,并提高水土保持措施的面积比例。

表 2 各农作方式与氮素流失浓度的相关性

指标	总氮	硝态氮	农作方式
总氮	1		
硝态氮	0.812**	1	
农作方式	0.105	0.150*	1

注:**表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$ 。

3 结论与讨论

(1)不同农作方式下的地表径流总量具体表现为 $BL > SC > CP > BP > PL$;随降雨时间的延续,各措施下的地表径流均呈不同程度的增加趋势,BL 增长速度最快,SC 次之,且 BP 措施下出流时间最晚(降雨后第 6 min),PL 立地条件下每 5 min 地表径流变化稳定在 0.30~3.46 L 之间。

(2)不同农作方式下径流中氮素流失浓度大小顺序基本表现为 $BP > CP > PL > BL > SC$,说明作为水源区的农作方式,在保证不拦水的同时,秸秆覆盖可有效保持土壤养分,防止其流失污染水源。

(3)受田间各处理方式影响,氮素流失随时间及沿坡面变化均呈现不同规律,其中 BL 条件下其养分流失浓度随时间及沿坡面均增加较大,且初期流失最大,后逐渐趋于稳定,其中总氮、硝态氮最大增加幅度可达 45.54%,55.79%;坡面各点的地表径流中氮素流失浓度基本呈波动增加趋势。

(4)各农作方式总氮流失量在 15.90~110.81 mg/m^2 之间,硝态氮流失量在 15.58~90.33 mg/m^2 之间,且变异性略大于相应的地表径流;农作方式与硝态氮流失浓度呈正相关,与总氮相关性不显著。

由于地表径流过程样采集艰难,学者对于径流及其养分的过程变化研究较少,不同农作方式或土地利用方式下径流养分比较多以总输出量为研究对象^[16]。本文结合野外模拟降雨探索不同农作方式地表径流及其氮素流失的过程变化,发现径流养分流失浓度沿程均呈波动增加趋势,且产流初期养分流失较大,后期逐渐趋于稳定,这与梯田径流养分流失过程^[17]类似。农作方式与硝态氮流失浓度呈显著相关,与全氮流失浓度关系不显著。这为研究区选择合理的养分流失治理方式提供了科学依据。但在计算农作方式与径流养分流失关系时,仅将各方式下的植被覆盖度作为量化指标进行了分析,不能很好地表征各方式的差异性,因此在以后的研究中考考虑采取更优化、代表性更强的量化指标来分析其相关性。

参考文献:

- [1] 魏兴萍. 基于同位素法监测岩溶槽谷区山坡土壤侵蚀和养分流失[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 128-136.
- [2] Wang A P, Li F H, Yang S M. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall[J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 628-638.
- [3] 王建中, 刘凌, 宋兰兰. 坡地氮磷流失过程模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 531-536.
- [4] He X B, Li Z B, Hao M D, et al. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil-water conservation on Loess Plateau of China[J]. Agr. Ecosyst. Environ., 2003, 94(3): 355-361.
- [5] Zheng F L, He X B, Gao X T, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China[J]. Agr. Ecosyst. Environ., 2005, 108(1): 85-97.
- [6] 王全九, 王力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(12): 109-119.
- [7] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2009, 150(1/2): 141-149.
- [8] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1543-1549.
- [9] Bertol I, Engel F L, Mafra A L, et al. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 142-150.
- [10] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 2492-2500.

下转第 291 页

解,酸、碱、光、氧化剂等都是使其分解的外界影响因素,植物在逆境状态下,叶绿素的含量会发生降低。本研究结果表明,水花生浸提液处理对马尼拉草叶绿素含量的影响与浸提液浓度有密切关系,表现为低浓度促进,高浓度抑制的效应。马尼拉草叶绿素含量在低浓度(≤ 10 g/L)浸提液处理下有所增长,但浓度超过 10 g/L 时,马尼拉草幼苗叶绿素含量便迅速下降。随着培养时间的延长,高浓度浸提液处理下,过多的水花生化感物质被马尼拉草幼苗吸收,叶绿素的生物合成受到干扰或加速分解,叶绿素含量降低。

综上所述,高浓度水花生及其根际土浸提液能够明显抑制草坪草马尼拉的生长,并以水花生根浸提液处理抑制作用最显著,表现为幼苗根长、苗高以及整株鲜重下降,叶片光合色素含量减少,抗氧化保护酶系统失去平衡,酶活性受到抑制,丙二醛含量迅速增加,马尼拉草生长受到明显抑制。因此,高浓度水花生浸提液对草坪草马尼拉具有较强的化感抑制作用,在草坪养护和栽培管理中,应严格控制水花生的入侵蔓延,防止其破坏草坪的观赏价值。在后续研究中,笔者将进一步深入探索入侵种水花生具体有效化感物质对受体植物的作用机理。

参考文献:

- [1] Hager H A. Competitive effect versus competitive response of invasive and native wetland plant species[J]. *Oecologia*, 2004, 139(1): 140-149.
- [2] Callaway R M, Aschehoug E T. Invasive plants versus their new and old neighbors: A mechanism for exotic invasion[J]. *Science*, 2000, 290(5499): 521-523.
- [3] 卢艳敏,李会芬. 白三叶草水浸液对黑麦草种子的化感作用[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(5): 367-369.
- [4] 王建华,陈婷,林文雄. 植物化感作用类型及其在农业中的应用[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1173-1183.
- [5] 华建锋,胡李娟,张垂胜,等. 3 种水生植物对锰污染水体修复作用的研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2160-2165.
- [6] Shon S S, Tony C, Crahan P. Disturbance-mediated competition: The interacting roles of inundation regime and mechanical and herbicidal control in determining native and invasive plant abundance[J]. *Biological Invasions*, 2010, 12(9): 3289-3298.
- [7] 张志忠,石秋香,孙志浩,等. 入侵植物空心莲子草对生菜和萝卜的化感效应[J]. *草业学报*, 2013, 22(1): 288-293.
- [8] 苏宝玲,韩士杰,王建国. 根际微域研究中土样采集方法的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 477-480.
- [9] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [10] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 王云,符亮,龙凤玲,等. 2 种婆婆纳属植株水浸液对 6 种受体植物的化感作用[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2013, 41(4): 179-190.
- [12] 陈林,李学斌,王磊,等. 柠条锦鸡儿茎叶水浸液对 4 种农作物生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 165-167.
- [13] 龚宁,陈庆富,李昌梅,等. 几种荞麦的抗氧化酶活性研究[J]. *广西植物*, 2006, 26(1): 88-91.
- [14] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等. 铝胁迫对黑麦草根系抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 391-395.
- [15] 李键,刘奕,洪滔,等. 2 种化感成分对木麻黄幼苗小枝活性氧含量和保护酶活性的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2013, 22(2): 30-38.
- [16] 刘苏娇,赵国琦,邹彩霞,等. 几种豆科牧草水浸液对多花黑麦草化感作用机理研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(6): 1183-1188.
- [17] 杨莉,韩梅,肖春萍,等. 入侵种加拿大蓬对玉米的化感潜力及机制研究[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(4): 2-5.

上接第 85 页

- [11] Scott D, Huang L J. Rainfall, evaporation and runoff responses to hill slope aspect in the Shenchong Basin[J]. *Catena*, 1997, 29(2): 131-144.
- [12] 辛艳,王瑄,邱野,等. 辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 27-30.
- [13] 张建军,王勇,樊廷录,等. 耕作方式与施肥对陇东旱塬冬小麦-春玉米轮作农田土壤理化性质及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1001-1008.
- [14] 王安,郝明德,王英文. 人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 26-34.
- [15] 景元书,张斌,王明珠,等. 桔园地土壤水分与径流的坡位差异研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 74-77.
- [16] 高尚坤. 兰陵溪小流域土地利用模式的水土保持效应研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
- [17] 张展羽,张卫,杨洁,等. 不同尺度下梯田果园地表径流养分流失特征分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 105-109.