

DOI:10.13870/j.cnki.stbexb.2024.02.010

王凯丽, 张含玉, 方怒放, 等. 不同厚度降解地膜对坡耕地溶解态氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2).

WANG Kaili, ZHANG Hanyu, FANG Nufang, et al. Effects of Different Thickness of Degradable Plastic Film on the Loss of Dissolved Nitrogen and Phosphorus in Sloping Farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2).

不同厚度降解地膜对坡耕地溶解态氮磷流失的影响

王凯丽^{1,2,3}, 张含玉⁴, 方怒放^{1,2,3,5}, 刘前进⁴, 李靖江⁵

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院水利部水土保持研究所, 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; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005;

5.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为探究降解地膜覆盖对径流及溶解态氮磷流失的影响。[方法] 利用野外原位径流小区, 以覆膜垄作花生种植为研究对象, 设置 0.003 mm 厚聚乙烯普通地膜覆盖处理 (PF) 和厚度为 0.006 mm (BF1), 0.008 mm (BF2), 0.010 mm (BF3), 0.012 mm (BF4) 的降解地膜覆盖处理及未覆膜处理 (CK), 测定不同处理在自然降雨条件下的径流量及径流中铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、速效磷 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 浓度, 分析不同厚度降解地膜覆盖条件下径流及养分流失特征。[结果] (1) 降解地膜降解所需时间随地膜厚度的增加而增加。(2) 各处理的累积径流量由小到大为 $\text{BF1} < \text{BF2} < \text{BF3} < \text{PF} < \text{CK} < \text{BF4}$, BF1 与 BF4 之间差异显著 ($p < 0.05$)。(3) 与 CK 相比, 各覆膜处理均能不同程度减少氮磷累积流失量。其中, BF1 处理对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量的削减效果较好, 而 BF2 处理对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量的削减效果较好。(4) 在 5 个覆膜处理中, BF4 处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量最高, 而 BF3 处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失量最高。[结论] 研究结果可为防治覆膜坡耕地水土及养分流失、解决农业面源污染等问题提供理论基础, 对绿色农业发展和生态可持续发展具有重要意义。

关键词: 降解地膜厚度; 自然降雨; 径流; 溶解态氮磷流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

Effects of Different Thickness of Degradable Plastic Film on the Loss of Dissolved Nitrogen and Phosphorus in Sloping Farmland

WANG Kaili^{1,2,3}, ZHANG Hanyu⁴, FANG Nufang^{1,2,3,5}, LIU Qianjin⁴, LI Jingjiang⁵

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China; 5. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of degradable mulch film mulching on runoff and loss of dissolved nitrogen and phosphorus. [Methods] Polyethylene film mulching (PF) with a thickness of 0.003 mm, degradable film mulching with a thickness of 0.006 mm (BF1), 0.008 mm (BF2), 0.010 mm (BF3) and 0.012 mm (BF4), and no mulch (CK) were set up. In in-situ runoff plots, using mulching on ridge tillage peanut planting as the study object, the runoff and concentration of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), and available phosphorus ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) in runoff under natural rainfall conditions were measured, and the runoff and nutrient loss characteristics under different thickness of

收稿日期: 2023-06-19

修回日期: 2023-00-00

录用日期: 2023-00-00

网络首发日期: 2023-12-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701311, 42377329, 42077061); 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD081); 山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ115, LUJIAORENZI20199)

第一作者: 王凯丽(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: wangkaili21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 方怒放(1985—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fnf@ms.iswac.ac.cn

http://stbexb.alljournal.com.cn

degradable mulch film were analyzed. [Results] (1) The degradation time of degradable film increased with the increase of film thickness. (2) The order of cumulative runoff was BF1 < BF2 < BF3 < PF < CK < BF4, and there was significant difference between BF1 and BF4 ($p < 0.05$). (3) Compared with CK, different film mulching can reduce the cumulative loss of nitrogen and phosphorus to varying degrees. BF1 had the most significant effect on reducing the loss of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$, while BF2 had the most significant effect on reducing the loss of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$. (4) Among the five laminating treatments, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ loss in BF4 treatment was the highest, while the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ loss in BF3 treatment was the highest. [Conclusion] The research results can provide a theoretical basis for the prevention and control of water, soil, and nutrient loss in sloping farmland mulching with plastic film and solving the problems of agricultural non-point source pollution, and have important significance for green agricultural development and ecological sustainable development.

Keywords: thickness of degradation film; natural rainfall; runoff; loss of dissolved nitrogen and phosphorus

Received: 2023-06-19

Revised: 2023-00-00

Accepted: 2023-00-00

Online: 2023-12-06

坡耕地养分流失是全球面临的生态环境问题之一,不仅会导致土壤退化,土地生产力下降,还可造成水体富营养化^[1-3]。地膜覆盖可改善土壤水热状况,提高作物产量,世界范围内被广泛应用^[4-8]。我国地膜使用量和覆盖面积逐年增加,预计 2025 年地膜使用量可达 22.8×10^8 kg,覆盖面积达 23.4×10^6 hm²^[5]。地膜覆盖可通过影响降雨击溅、改变汇流等,从而影响养分流失^[9-11]。地膜的不透水性可减少降雨入渗,有助于径流汇集,从而增加径流和产沙风险^[7];然而,地膜覆盖也会减少雨滴对表层土壤的直接打击,降低雨滴动能,从而减少水土及养分流失^[12-13]。因此,研究地膜覆盖对水土及养分流失的影响,并揭示其机理,对农业可持续发展具有重要意义。

降解地膜具有普通地膜增温保墒、提高作物产量等优点,且可有效解决农田残膜污染问题,在农业生产中的应用越来越广泛^[14-16]。目前对降解地膜的研究集中于降解速率及强度^[17]、土壤水热效率^[18]、作物生长及产量^[19]等方面。与未覆膜和普通地膜覆盖相比,降解地膜覆盖有较好的保温作用以及防止高温效果^[14]。降解地膜在玉米生长季的水分利用效率及产量可较普通地膜分别提高 19.5%,18.4%^[20]。此外,受地膜厚度^[21]、外界环境^[22]等的影响,地膜的降解速率和降解特性存在差异,从而改变地膜对土壤水热条件、作物产量等的影响。在相同外界条件下,地膜降解程度随其厚度的增加而降低^[18]。研究表明,在相同覆盖环境与时间下,0.005 mm 厚降解地膜的降解速度及强度均高于 0.008 mm 厚降解地膜^[17]。然而,地膜的降解破裂,一方面可增加降雨入渗量及地表粗糙度,降低径流流速,进而减少径流量;另一方面,地膜破裂使土壤裸露,降雨和径流可直接打击或冲刷表层土壤,增大泥沙和养分流失风险^[23]。与普通地膜相比,降解地膜覆盖对养分流失的影响更加复杂。明

确不同厚度降解地膜覆盖条件下养分流失特征及机理,可为降解地膜合理应用提供科学指导。

北方土石山区土层浅薄,土壤含蓄水能力低,坡耕地是其水土流失的主要策源地^[24-25],地膜覆盖被广泛用于该区坡耕地种植^[26]。

因此,本文利用野外原位径流小区,以覆膜垄作花生种植为研究对象,分析不同厚度降解地膜覆盖条件下水土及养分流失的特征,揭示降解地膜覆盖条件下地膜厚度对溶解态氮磷流失的影响机理。研究结果可为防治覆膜坡耕地水土及养分流失、解决农业面源污染等问题提供理论基础,对绿色农业发展和生态可持续发展有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验使用的野外原位径流小区位于北方土石山区双河峪小流域(35°38'20"N,118°07'30"E),径流小区土壤的质地为砂质壤土,容重为 1.3~1.4 g/cm³,pH 为 5.6,其他基本理化性质见表 1。径流小区长 9.6 m,宽 1.8 m,坡度 8°。花生采用垄作覆膜的种植方式,垄宽 0.4 m,垄沟宽 0.5 m,整地时每小区施用复合肥(15%氮肥 N,15%磷肥 P₂O₅,15%钾肥 K₂O)2.0 kg。每垄穴播种植 1 行花生。花生出苗后,在出苗位置进行破膜引苗,以便作物正常生长。为防止各小区因降雨造成土壤颗粒溅出和径流的渗漏外流,在小区的两侧边界和上端分别安置高为 30 cm 的 PVC 板于土壤中,并外露 10 cm 作为各小区分界的遮挡。在每个小区出水口位置接 1 个 75 L 聚乙烯径流泥沙收集桶。

本研究在花生整个生长季(2022 年 5 月 14 日至 2022 年 9 月 8 日)进行,共设置 6 个处理,分别为 0.003 mm 厚聚乙烯地膜覆盖处理(PF)和厚度为 0.006 mm (BF1),0.008 mm (BF2),0.010 mm (BF3),0.012 mm

(BF4)的降解地膜覆盖处理,及未覆膜处理(CK),每个处理重复 3 次。其中,0.006,0.008,0.010 mm 的降解

地膜由山东清田塑工有限公司免费提供,0.012 mm 的降解地膜购买自青岛海益塑业有限责任公司。

表 1 径流小区土壤基本理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of in-situ runoff plots

土层深度/ cm	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	颗粒组成			
					粘粒/%	粉粒/%	细砂/%	粗砂/%
0—20	0.25±0.11	0.86±0.20	23.68±1.40	4.95±1.65	0.15±0.09	1.88±0.31	35.67±11.36	62.30±11.50
20—40	0.23±0.17	0.84±0.25	23.69±2.24	4.51±2.43	0.39±0.78	2.39±1.70	33.97±7.91	63.25±8.67
40—60	0.12±0.06	0.92±0.33	22.62±2.77	3.01±1.13	0.58±1.25	2.68±2.28	37.62±10.24	59.13±10.83

注:表中数据为平均值±标准差;土壤粒径按国际制划分。

试验期间花生各生长期分别为:苗期(5月25日至6月15日)、花针期(6月16日至7月14日)、结荚期(7月15日至8月14日)和饱果期(8月15日至9月8日)。各处理在花生生长期内的田间管理措施皆参照当地的农耕习惯。

1.2 样品采集与测定

试验前采集土壤样品用于测定土壤背景值。试验期间,在每次降雨结束后,立即称量各处理径流桶内的径流和泥沙总重。待径流与泥沙分层后,取上清液于 500 mL 聚乙烯瓶中,置于 4 °C 冰箱,带回实验室,用于测定铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和速效磷(PO₄³⁻-P)。将径流桶上清液倒掉,称取饱和湿泥沙总重。通过径流和泥沙总重与饱和湿泥沙总重获得径流量,溶解态氮磷流失量通过径流量与溶解态氮磷浓度获得。径流样品取完后用超纯水将径流桶清洗干净,以便进行下次降雨取样。

土壤背景样品在室内自然风干后过 2 mm 筛,其中,全氮、全磷、全钾和有机质的测定分别采用硫酸—催化剂消解法、NaOH 熔融法—钼锑抗比色、火焰光度法和重铬酸钾—浓硫酸外加热法。本研究中溶解态氮包括 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,溶解态磷指 PO₄³⁻-P。径流样品经 0.45 μm 滤膜过滤后,分别采用纳氏试剂比色法、双波长比色法和钼锑抗比色法测定 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻-P 浓度,测定仪器为紫外可见分光光度计。

地膜的自然降解特征利用肉眼观测法和拍照法定期观测记录,以防人为破坏地膜。观测频次为从发现地膜出现裂纹开始每 10 天观测 1 次,并根据地膜的实际降解特征适当提前或延迟观测时间。降解地膜的田间降解过程分为诱导期、破裂期、崩解期、破碎期和全降解期 5 个阶段^[22]。诱导期为从开始覆膜到出现小裂缝,破裂期为从小裂缝降解为大裂缝,崩解期是从大裂缝到出现大碎块且无完整膜面,破碎期为从地膜大碎块降解为小碎片,全降解期为小碎片在地表基本消失。

利用双河峪小流域气象站的翻斗式雨量计记录降雨量和历时,并计算最大 30 min 降雨强度(I₃₀)。

试验期间总降雨量为 171.0 mm,有 8 次降雨事件产生径流(图 1),其中苗期、结荚期和饱果期各 1 场降雨,花针期有 5 场降雨。8 次降雨事件累积降雨量为 131.6 mm,占总降雨量的 77.0%。在所有降雨事件中,降雨量最小和最大的分别为第 1 次和第 6 次降雨事件,分别为 5.4,45.6 mm。最大 30 min 雨强(I₃₀)最小的是第 2 次降雨事件,为 5.5 mm/h。第 4 次降雨事件的 I₃₀最大,为 25.6 mm/h。

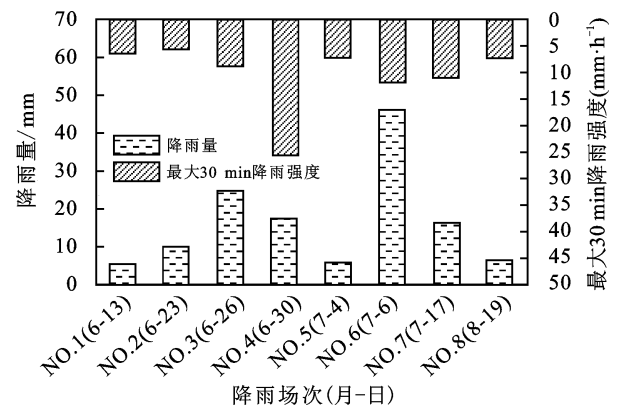


图 1 试验期间产流降雨事件的降雨特征

Fig. 1 Rainfall characteristics of rainfall runoff events during the experiment

1.3 数据处理

本研究利用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据的初步整理和分析。利用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析,单因素差异显著性分析采用 Duncan 法($p < 0.05$)。利用 OriginPro 2023b 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 地膜降解特征变化

从表 2 可以看出,聚乙烯地膜 PF 处理在花生不同生长期均不降解。而同一降解地膜覆盖处理在不同生长季的降解特征不同。BF2 处理的地膜在花针期、结荚期和饱果期分别处于诱导期、破裂期和崩解期。随着覆盖时间的增加,不同处理地膜降解特征的差异增大。在苗期,各降解地膜的降解特征差异并不明显,而在试验结束时,BF1、BF2、BF3 和 BF4 的地膜降解分别处于破碎期、崩解期、崩解期和破裂期阶段。

表 2 地膜在花生不同生长期的降解特征

Table 2 Degradation characteristics of plastic film in different growth periods of peanut

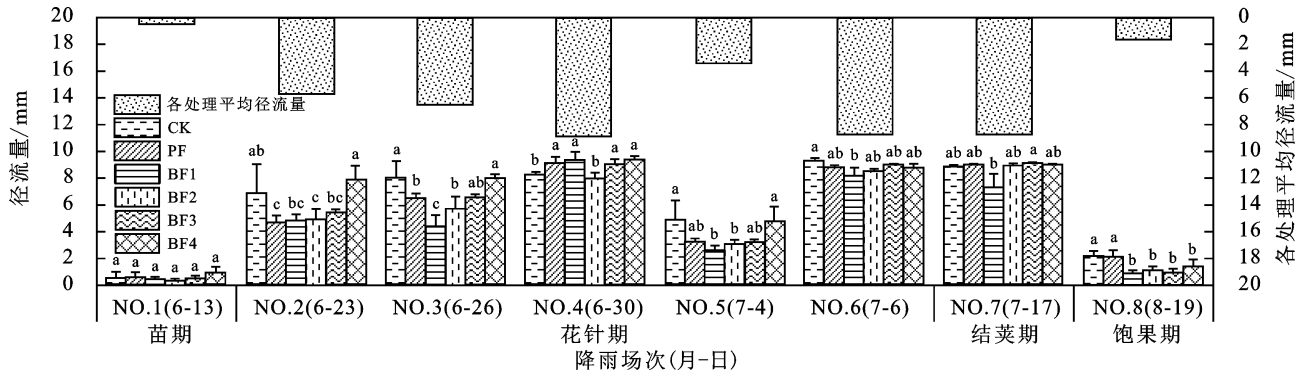
观测日期(月-日)	花生生长期	CK	PF(T=0.003)	BF1(T=0.006)	BF2(T=0.008)	BF3(T=0.010)	BF4(T=0.012)
06-13	苗期	未覆膜	未降解	诱导期	诱导期	诱导期	诱导期
06-23		未覆膜	未降解	诱导期	诱导期	诱导期	诱导期
07-01	花针期	未覆膜	未降解	破裂期	诱导期	诱导期	诱导期
07-15		未覆膜	未降解	破裂期	破裂期	破裂期	诱导期
08-04	结荚期	未覆膜	未降解	崩解期	破裂期	破裂期	诱导期
08-18		未覆膜	未降解	崩解期	崩解期	破裂期	诱导期
09-08	饱果期	未覆膜	未降解	破碎期	崩解期	崩解期	破裂期

注: T 表示地膜的厚度(mm)。

2.2 次降雨事件的径流特征

由图 2 可知,各处理平均径流量最小和最大的分别为第 1 次和第 4 次降雨事件,分别为 0.5、8.9 mm。同一降雨事件下各处理的径流量明显不同。在第 1、2、4 次降雨事件中,BF2 和 BF4 在 6 个处理中径流量分别为最小和最大,且在第 2、4 次降雨事件中存在显著差异。BF1 处理在第 3、5、6、7 次降雨事件下的径

流量分别为 4.38、2.63、8.18、7.19 mm,在 6 个处理中径流量最小,且在第 3、5 次降雨事件中与 CK 和 BF4 处理存在显著差异。在第 3、5、6、8 次降雨事件中,CK 处理的径流量最大,分别为 8.02、4.78、9.25、2.23 mm,且与 BF1 处理存在显著差异。BF1、BF2、BF3 和 BF4 处理的径流量在第 6、8 次降雨事件中均无显著差异。

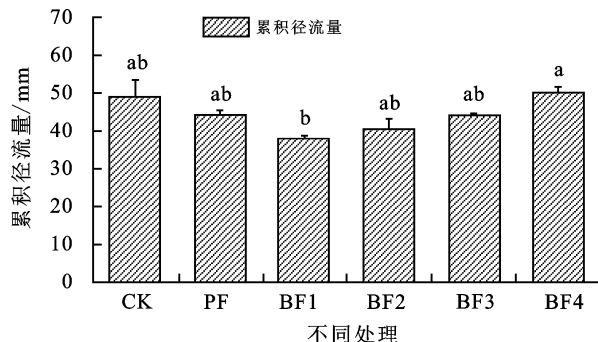


注:图中同一降雨场次的不同字母表示处理在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同降雨条件下各处理的径流量

Fig. 2 Runoff of each treatment in different rainfall events

由图 3 可知,试验期间各处理的累积径流量由小到大为 BF1<BF2<BF3<PF<CK<BF4。与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF3、PF 处理的累积径流量分别减少 22.0%、17.1%、9.3%、9.1%,差异不显著;而 BF4 处理增加 2.8% 的累积径流量,且 BF1 与 BF4 处理差异显著,PF、BF4 和 CK 处理之间无显著差异。



注:图中不同字母表示处理在 0.05 水平上差异显著。

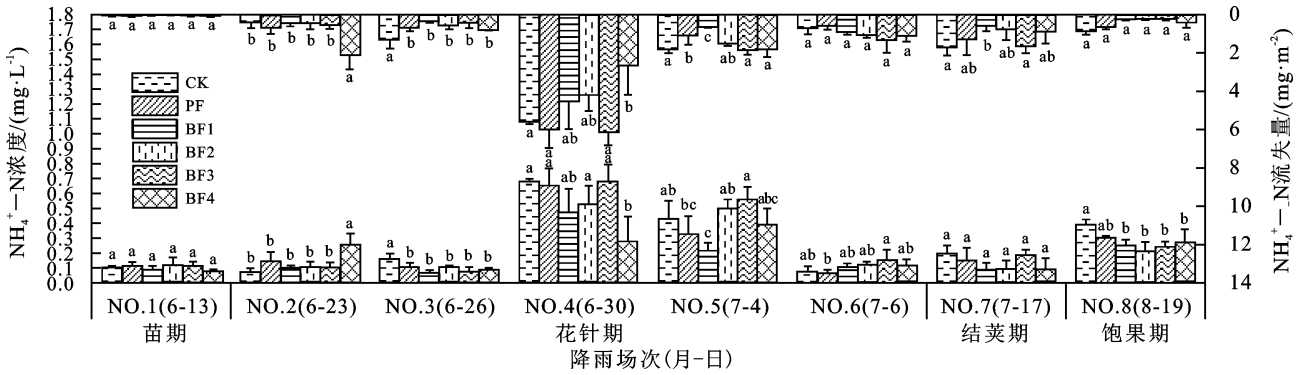
图 3 试验期间各处理的累积径流量

Fig. 3 The cumulative runoff of each treatment during the experiment

2.3 径流 NH₄⁺-N 流失特征

图 4 为各降雨事件下不同处理径流中 NH₄⁺-N 浓度及其流失量。在第 2 次降雨事件中,CK 处理径流 NH₄⁺-N 浓度最小,为 0.07 mg/L,与 BF4 处理存在显著差异。但在第 3、7、8 次降雨事件中,CK 处理径流 NH₄⁺-N 浓度最大,分别为 0.16、0.20、0.39 mg/L。在第 4、5、6 次降雨事件中,BF3 处理径流 NH₄⁺-N 浓度最大,分别为 0.68、0.56、0.15 mg/L。在第 3、5 次降雨事件中,BF1 处理径流 NH₄⁺-N 浓度最小,分别为 0.07、0.22 mg/L,与 CK 处理差异显著。各处理在所有产流降雨事件中径流 NH₄⁺-N 平均浓度为 BF1<BF4<BF2<PF<CK<BF3(图 7)。

与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF4、PF 处理的径流 NH₄⁺-N 平均浓度分别减少 33.4%、16.2%、25.0%、11.6%,而 BF3 处理的增加 0.6%。



注:图中同一降雨日期内不同字母表示处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

图 4 不同降雨场次下各处理的 NH₄⁺-N 浓度及其流失量

Fig. 4 The concentration and loss of NH₄⁺-N of each treatment in different rainfall events

对于径流 NH₄⁺-N 流失量,在第 3,5,7,8 次降雨事件中 CK 处理最大,分别为 1.32,1.87,1.72,0.88 mg/m²,且在第 3,5,7 次降雨事件中与 BF1 处理存在显著差异。在第 4,6 次降雨事件中,BF3 处理径流 NH₄⁺-N 流失量最大,分别为 6.14,1.34 mg/m²。BF1 处理径流 NH₄⁺-N 流失量在第 3,5,7 次降雨事件中,分别为 0.30,0.56,0.60 mg/m²。各处理径流 NH₄⁺-N 累积流失量的排序为 BF1<BF2<BF4<PF<BF3<CK(图 7)。与 CK 处理相比,PF、BF1、BF2、BF3、BF4 处理的 NH₄⁺-N 累积流失量分别减少 13.1%,40.1%,29.6%,1.8%,24.5%,其中,BF1、BF2、BF4 处理均与 CK 处理存在显著差异。

2.4 径流 NO₃⁻-N 流失特征

图 5 为各次降雨条件下不同处理径流中

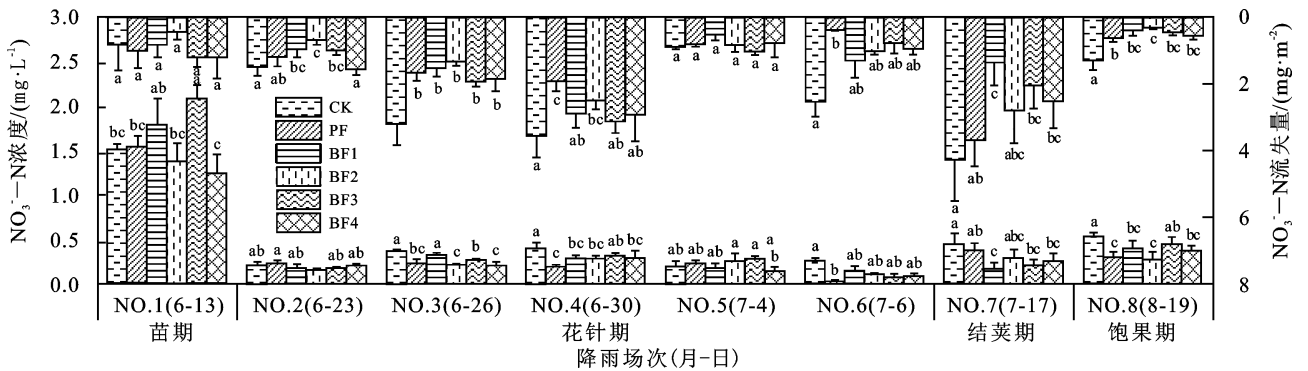


图 5 不同降雨场次下各处理的 NO₃⁻-N 浓度及其流失量

Fig. 5 The concentration and loss of NO₃⁻-N of each treatment in different rainfall events

对于 NO₃⁻-N 流失量,在第 1,2 次降雨事件中 BF4 处理最大,分别为 1.21,1.57 mg/m²。在第 3,4,6,7,8 次降雨事件中,CK 处理的 NO₃⁻-N 流失量最大,分别为 3.21,3.56,2.54,4.24,1.30 mg/m²,第 3,7,8 次降雨事件中与 BF1、BF3 和 BF4 处理差异显著,第 4,6 次降雨事件中与 PF 处理存在显著差异。在第 1,2,3,8 次降雨事件中,BF2 处理 NO₃⁻-N 流失量最小,分别为 0.36,0.68,1.33,0.31 mg/m²。在

NO₃⁻-N 浓度及其流失量。在第 1,3,5 次降雨事件中,BF4 处理径流 NO₃⁻-N 浓度最小,分别为 1.35,0.23,0.16 mg/L,与 BF3 处理存在显著差异。BF3 处理在第 1,5 次降雨事件中径流 NO₃⁻-N 浓度最大,分别为 2.25,0.31 mg/L。在第 3,4,6,7,8 次降雨事件中,CK 处理径流 NO₃⁻-N 浓度最大,分别为 0.40,0.43,0.27,0.48,0.58 mg/L,且在第 3,4,7,8 次降雨事件中与 BF4 处理存在显著差异。各处理在所有产流降雨事件中径流 NO₃⁻-N 平均浓度为 BF4<BF2<PF<BF1<BF3<CK(图 7)。

与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF3、BF4、PF 处理的径流 NO₃⁻-N 平均浓度分别减少 12.1%,24.7%,1.5%,28.1%,19.3%。

第 5,7 次降雨事件中,BF1 处理径流 NO₃⁻-N 流失量最小,分别为 0.51,1.36 mg/m²。从 NO₃⁻-N 累积流失量可以看出,各处理的顺序为 BF1<BF2<PF<BF3<BF4<CK(图 7)。与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF3、BF4、PF 处理的径流 NO₃⁻-N 累积流失量分别显著减少 46.0%,45.8%,36.5%,31.7%,37.5%。

2.5 径流 PO₄³⁻-P 流失特征

从图 6 可以看出,在第 2,3,4,6,7,8 次降雨事件

中,CK 处理径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度最大,分别为 0.25, 0.19, 0.16, 0.09, 0.09, 0.10 mg/L, 与 BF3 处理存在显著差异。BF4 处理径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度在第 1, 5 次降雨事件中最大,分别为 1.16, 0.09 mg/L, 第 5 次降雨事件中与 BF2 和 BF3 处理差异显著。BF3 处理是第 1, 5, 8 次降雨事件中径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度最小的, 其浓度分别为 0.08, 0.04, 0.02 mg/L。在第 2, 3 次降

雨事件中,PF 处理径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度最小,分别为 0.07, 0.07 mg/L, 与 CK 处理差异显著。CK 和 BF2 处理是所有产流降雨事件中径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 平均浓度最大和最小的,其平均浓度分别是 0.14, 0.06 mg/L(图 7)。与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF3、BF4、PF 处理径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 平均浓度分别显著减少 55.6%, 55.4%, 53.4%, 41.6%, 51.8%。

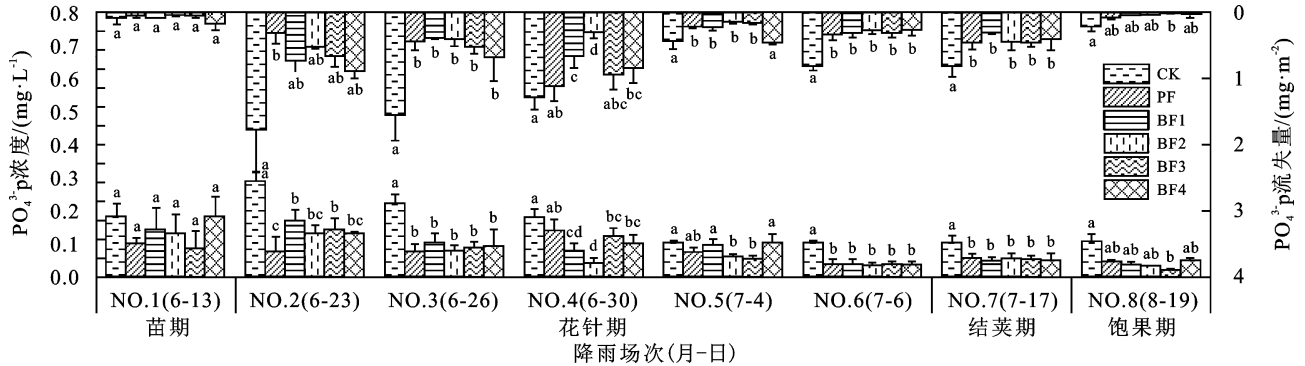
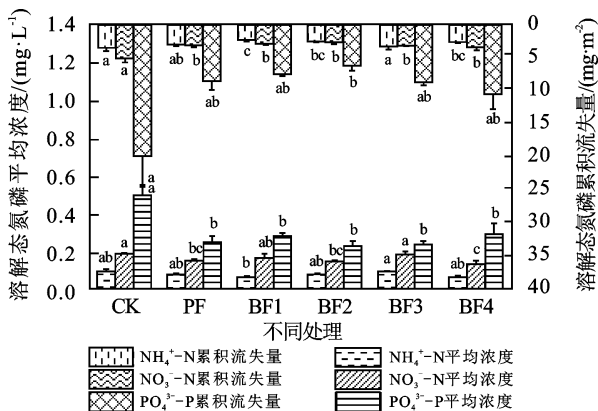


图 6 不同降雨场次下各处理的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度及其流失量

Fig. 6 The concentration and loss of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ of each treatment in different rainfall events

除第 1 次降雨事件外,CK 处理的次降雨径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 流失量最大(图 6),在第 3, 4, 6, 7 次降雨事件中与 BF1 和 BF2 处理存在显著差异。BF2 处理在第 1, 4 次降雨事件中径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 流失量最小,其流失量分别为 0.03, 0.30 mg/m^2 。各处理径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 累积流失量为 $\text{BF2} < \text{BF1} < \text{PF} < \text{BF3} < \text{BF4} < \text{CK}$ (图 7)。与 CK 处理相比,BF1、BF2、BF3、BF4、PF 处理的径流 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 累积流失量分别减少 60.9%, 68.8%, 55.7%, 46.5%, 56.7%。

mm 厚降解地膜的降解速率略快于 0.012 mm 厚。在降解地膜覆盖条件下,累积径流量随地膜厚度的减小而减小(图 2),且 BF1、BF2 和 BF3 处理的累积径流量均小于 PF 和 CK 处理。原因可能是地膜厚度越小,降解程度越大,增加地表粗糙度,降低径流流速,增大裸露土壤降雨入渗量,进而减少径流量^[27]。降解程度较低的 BF4 处理,累积径流量最大,但与 PF 和 CK 处理无显著差异。原因可能是在花生生长早期,植被覆盖率低,地膜的不透水性降低雨水入渗,有助于径流汇集,进而增加径流量。但随着花生的生长,植被覆盖率增大,地膜覆盖对径流量的影响减小,最终导致 BF4、PF 和 CK 处理间无显著差异^[7, 28]。



注:图中同一指标不同字母表示处理在 0.05 水平上差异显著。

图 7 所有产流降雨事件各处理的溶解态氮磷平均浓度及其累积流失量

Fig. 7 The mean concentration of dissolved nitrogen and phosphorus and its cumulative loss of each treatment of all rainfall runoff events

3 讨论

不同处理降解地膜降解特征显示,地膜的降解程度随地膜厚度的增加而减小(表 2),降解地膜越厚,降解所需时间越长。李仙岳等^[18]研究发现,0.008

与未覆膜 CK 处理相比,不同覆膜处理能够有效减少氮磷流失量(图 7)。本研究仅对垄上土壤进行施肥和覆膜,地膜覆盖可降低雨水和径流对垄上土壤的打击和冲刷作用,从而减少养分流失^[23]。在覆膜处理中,BF1 和 BF2 处理养分流失量较低,可能是 BF1 和 BF2 处理的径流量小于其他覆膜处理,导致其养分流失量较少^[29]。而 BF4 处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 累积流失量在各覆膜处理中最高,BF3 处理次之,是因为地膜较厚时降解程度较低,因此减少入渗,直接增加垄沟径流量及养分流失量。此外,降解程度较低的地膜还可通过促进花生生长增加花生茎流^[30],而花生茎流通过破膜引苗处进入垄上土壤,并携带养分向垄沟汇集,最终输出小区,从而增加径流量和土壤养分流失量^[31]。因此,为减少花生生长过程中土壤养分流失,建议选择厚度为 0.006 或 0.008 mm 在生长期内崩解或破碎的降解地膜进行覆盖。本研究仅以花生为代表性作物进行研究,而降解

地膜的降解过程除受本身厚度影响外,还受作物类型、气候等因素的影响。因此,未来研究将在不同季节研究不同覆膜作物生长过程中降解地膜厚度对水土及养分流失的影响,为降解地膜的合理应用与推广提供科学依据。

4 结论

(1)降解地膜的降解程度随地膜厚度的增加而减小,而径流量随地膜厚度的增加而增大。较薄的地膜降解程度大,增加地表粗糙度,降低径流流速,且增加裸露土壤降雨入渗量,减少径流量。

(2)与未覆膜相比,覆膜可减少雨水和径流对垄上土壤的打击和冲刷作用,导致覆膜处理减少 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积流失量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均浓度和累积流失量。

(3)在所有覆膜处理中,厚度为 0.006 mm(BF1 处理)的降解地膜对径流量及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量的削减效果较好,厚度为 0.008 mm(BF2 处理)的降解地膜对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量的削减效果较好。

(4)在 5 个覆膜处理中,径流 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 流失量最高的处理均为 0.012 mm(BF4 处理)厚的地膜,而厚度为 0.010 mm(BF3 处理)的径流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失量最高。

参考文献:

- [1] OCHOA-CUEVA P, FRIES A, MONTESINOS P, et al. Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the andes of southern Ecuador[J]. Land Degradation and Development, 2015, 26(6): 565-573.
- [2] LIU H T, YAO L, LIN C W, et al. 18-year grass hedge effect on soil water loss and soil productivity on sloping cropland[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177: 12-18.
- [3] 陈晓安, 杨洁, 郑太辉, 等. 赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 162-167.
CHEN X A, YANG J, ZHENG T H, et al. Sediment, runoff, nitrogen and phosphorus losses of sloping cropland of quaternary red soil in northern Jiangxi [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 162-167.
- [4] 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 等. 地膜覆盖和生物炭添加对菜地 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2163-2170.
HU J, JIANG C S, CHEN X T, et al. Effects of plastic film mulching and biochar application on N_2O emission from a vegetable field[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2163-2170.
- [5] 高海河, 刘宏金, 高维常, 等. 作物地膜覆盖技术适宜性及其在东北春玉米上的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 95-107.
GAO H H, LIU H J, GAO W C, et al. The suitability of crop plastic film mulching technology and its application on spring maize in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 95-107.
- [6] 张丹, 王洪媛, 胡万里, 等. 地膜厚度对作物产量与土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 293-301.
ZHANG D, WANG H Y, HU W L, et al. Effect of film thickness on crop yield and soil environment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(2): 293-301.
- [7] ZHANG G S, ZHANG X X, HU X B. Runoff and soil erosion as affected by plastic mulch patterns in vegetable field at Dianchi lake's catchment, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 122: 20-27.
- [8] HU Q, LI X Y, SHI H B, et al. Residual plastic film exerts dual effects of blocking and preferential flow on soil water movement[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: e105628.
- [9] 程鹏, 廖超林, 肖其亮, 等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1036-1046.
CHENG P, LIAO C L, XIAO Q L, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(5): 1036-1046.
- [10] 刘元保, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 25-29.
LIU Y B, TANG K L, ZHA X, et al. Experiment on the soil and water loss of sloping land with different ground cover[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(1): 25-29.
- [11] PROSDOCIMI M, TAROLLI P, CERDÀ A. Mulching practices for reducing soil water erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 161: 191-203.
- [12] LIU Y, TAO Y, WAN K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34-40.
- [13] 安瞳昕, 贺佳, 杨友琼, 等. 坡耕地甜玉米地膜覆盖间作模式水土保持效应[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 31-33.
AN T X, HE J, YANG Y Q, et al. Benefits of soil and water conservation by sweet maize intercropped with different mulches on sloping land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 31-33.
- [14] CHEN N, LI X Y, ŠIMUNEK J, et al. Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: e105116.
- [15] CHEN N, LI X Y, SHI H B, et al. Effect of biodegradable film mulching on crop yield, soil microbial and enzymatic activities, and optimal levels of irrigation and nitrogen fertilizer for the *Zea mays* crops in

- arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: e145970.
- [16] BORROWMAN C K, JOHNSTON P, AAHIKARI R, et al. Environmental degradation and efficacy of a sprayable, biodegradable polymeric mulch[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 175: e109126.
- [17] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 111-116.
SHEN L X, WANG P, ZHANG L L. Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4): 111-116.
- [18] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 97-103.
LI X Y, PENG Z Y, SHI H B, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 97-103.
- [19] 战勇, 魏建军, 杨相昆, 等. 可降解地膜的性能及在北疆棉田上的应用[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(7): 202-206.
ZHAN Y, WEI J J, YANG X K, et al. Characteristics of degradable plastic film and application in north Xinjiang cotton field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(7): 202-206.
- [20] 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 等. 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2788-2801.
GUO Y T, LUO X Q, WANG R, et al. Effects of biodegradable plastic film mulching on greenhouse gas emissions under wheat-maize rotation system in the Guanzhong plain[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2788-2801.
- [21] 唐文雪, 马忠明. 地膜降解特征对土壤水热效应和玉米产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 114-123.
TANG W X, MA Z M. Effects of degradable film degradation properties on soil temperature, moisture, and maize yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 114-123.
- [22] 何文清, 赵彩霞, 刘爽, 等. 全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(3): 21-27.
HE W Q, ZHAO C X, LIU S, et al. Study on the degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(3): 21-27.
- [23] 张含玉. 覆膜对沂蒙山区棕壤土壤氮矿化及水土流失的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
ZHANG H Y. Effect of plastic film mulching on brown soil nitrogen mineralization and soil erosion in Yimeng mountainous area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [24] 井光花, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 120-125.
JING G H, YU X X, LIU Q J, et al. Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng mountainous area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 120-125.
- [25] 张明礼, 杨浩, 邹军, 等. 北方土石山区土壤侵蚀对土壤质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 218-221.
ZHANG M L, YANG H, ZOU J, et al. Effects of soil erosion on soil quality in the rocky mountain areas of northern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 218-221.
- [26] ZHANG H Y, LIU Q J, YU X X, et al. Effects of plastic mulch duration on nitrogen mineralization and leaching in peanut (*Arachis hypogaea*) cultivated land in the Yimeng Mountainous Area, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 158: 164-171.
- [27] SAGLAM M, SINTIM H Y, BARY A I, et al. Modeling the effect of biodegradable paper and plastic mulch on soil moisture dynamics[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 193: 240-250.
- [28] 马波, 刘雨鑫, 吴发启. 植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 32-36.
MA B, LIU Y X, WU F Q. Effect of soybean plants on runoff erosion sediment on slope land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 32-36.
- [29] 刘瑞, 张宇亭, 王志超, 等. 绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园氮磷流失的阻控效应研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 68-74.
LIU R, ZHANG Y T, WANG Z C, et al. Control effect of green manure cover on nitrogen and phosphorus loss of citrus orchard on purple soil slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 68-74.
- [30] 汪水前. 南方水土流失区马尾松对降雨再分配的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(2): 99-105.
WANG S Q. Effects of *Pinus massoniana* in soil erosion area in south China on rainfall redistribution[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(2): 99-105.
- [31] 王军, 陈能场, 詹振寿, 等. 不同种植方式对烟田氮素径流损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 68-73.
WANG J, CHEN N C, ZHAN Z S, et al. Influence of different planting methods on runoff losses of nitrogen in tobacco field soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 68-73.