

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 03. 010

强降雨下果园除草对径流中颗粒物及营养盐的影响

赵联芳¹,次仁吉保¹,王 成²,路宗仁¹

(1. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098; 2. 句容市白兔镇农业服务中心,江苏 句容 212403)

摘要:为探究夏季果园除草对果园面源污染的影响,采用人工模拟降雨的方法,研究了3种雨强(60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h)及2种下垫面(有草样地和无草样地)条件下,果园地表径流中颗粒物(SS)及营养盐(TN、TP)的流失情况。试验结果表明,径流中TN、TP质量浓度与SS质量浓度均呈线性相关关系,TP与SS质量浓度之间的线性相关性更强($R^2=0.9215$);人工割草造成了径流中SS、TN、TP质量浓度升高,使其单位面积流失量分别增加了30%~46%、11%~29%、11%~22%,尤其是增大了降雨后期的流失量。因此,在夏季多雨、尤其是暴雨发生时段,应减少对果园中杂草的收割频次。

关键词:降雨强度;夏季除草;果园;颗粒物;营养盐

中图分类号:TV121;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)03-0057-06

Effect of orchard weeding on suspended solids and nutrients in runoff under heavy rainfall // ZHAO Lianfang¹, CIREN Jibao¹, WANG Cheng², LU Zongren¹ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Agricultural Service Center of Baitu Town, Jurong City, Jurong 212403, China)

Abstract: In order to explore the effect of orchard weeding in summer on non-point source pollution of orchard, the loss of suspended solids (SS) and nutrients (TN, TP) in surface runoff was studied under three rainfall intensities (60 mm/h, 120 mm/h, 180 mm/h) and two kinds of underlying surface (with grass and without grass). The results show that the mass concentration of TN and TP in runoff is linearly correlated with the mass concentration of SS, and the linear correlation between the mass concentration of TP and SS is stronger ($R^2=0.9215$). Artificial weeding results in the increase of SS, TN and TP mass concentration in runoff, which cause the loss per unit area of SS, TN and TP increased by 30%~46%, 11%~29% and 11%~22%, respectively, especially in the later stage of rainfall. Therefore, the frequency of orchard weeding should be reduced during the rainy summer, especially during the rainstorm period.

Key words: rainfall intensity; weeding in summer; orchard; suspended solid; nutrient

农业面源污染是造成水体富营养化的主要污染源之一^[1-3]。果树业是我国农业的重要组成部分,果园面源污染是农业面源污染的一个重要来源。但是,较之种植范围广、施肥量大的水稻、玉米、蔬菜等农田作物产生的面源污染^[4-6],目前对果园面源污染的研究相对较少。

我国传统的果树种植采用清耕制度,果园中大面积裸露的地表在降雨量较大时产生的水土流失是造成果园面源污染的主要原因^[7]。果园生草栽培是欧美等发达国家20世纪40年代开始普遍推行的果园可持续发展土壤管理模式,在20世纪80年代被我国作为土壤培肥技术引进,从1998年起开始在

全国推广^[8]。有关果园生草对土壤营养和果树生长影响的研究表明,果园生草不仅能改善土壤结构、提高土壤肥力、促进果树生长、改善果实品质,还可以减少土壤和养分的流失,对控制果园面源污染有一定作用。近年来,随着对水体富营养化问题的关注,关于果园生草栽培对果园面源污染控制效果的研究开始受到重视,已有关于生草栽培模式^[9]、生草品种^[10]、生草带宽度^[11]等影响因素的研究报道。但是,尽管果园生草具有上述有益作用,但由于夏季果园中的草被植物生长和扩散非常迅速,会严重影响果树生长,因此必须除草^[12]。夏季正是多雨季节,此时除草对果园土壤颗粒物及营养盐的流失势

基金项目:国家自然科学基金(51209070);江苏省科技支撑计划(BE2016357)
作者简介:赵联芳(1972—),女,副教授,博士,主要从事水体污染控制与生态修复技术研究。E-mail: lfzhao@hhu.edu.cn

必造成影响,可能加剧果园的面源污染程度,但目前还缺少相关的研究报道。

本文以一处人工割草的有机无花果园为研究对象,采用人工模拟降雨方法,对3种降雨强度、2种下垫面(有草和无草)条件下径流中颗粒物及营养盐的流失情况展开研究,以期为果园面源污染控制措施的设计及果园除草管理提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验场地为位于江苏省句容市白兔镇永丰农庄的无花果园。白兔镇位于句容市的东北部,地理位置为东经119°35′、北纬31°98′,属于丘陵地区,气候属于亚热带季风气候,年平均温度15.5℃,多年平均降水量1100 mm,夏、秋季降水量占全年的65%。采集无花果园内的土壤测定,其土壤基本性质为:有机质质量比为12.3 g/kg,总氮(TN)质量比为1.25 g/kg,总磷(TP)质量比为0.57 g/kg,氨氮质量比为71.2 mg/kg,硝氮质量比为16.1 mg/kg。

1.2 试验设计

在无花果园内确定了3个小区,每个小区中有2株树冠和树高相近的无花果树,草被盖度为80%以上,地面坡度约为5°。每个小区分为2块样地,每块样地面积为2 m×1 m、有1株无花果树,其中1块样地保留原有的草被(草高10~20 cm),另1块样地在试验前1周用镰刀手工割除,残留草高2 cm左右,并在试验前进行修整。每块试验样地四面竖直插入钢板,入土深度15 cm,地上部分距离地面45 cm。其中一面钢板开口接塑料短管,用于收集雨水。四面钢板的交叉处及接管处均用塑料胶带粘合,以保证试验场地的雨水不向外渗漏。

根据江苏省句容市气象资料记载,多年平均降水量为1100 mm,夏季7—8月为强降雨多发时段,历史记载最高日降水量300 mm以上。雨量过小时很难产生径流,为保证人工降雨径流的收集,设置3种降雨强度模拟短时强降雨:中雨60 mm/h、大雨120 mm/h及暴雨180 mm/h。为了确保不同降雨强度试验时土壤前期含水量相对一致,此3个雨强的模拟降雨试验分别在上述3个小区进行。

人工模拟降雨装置采用南京南林电子科技有限公司研制的NLJY-10型人工模拟降雨系统,压控双向侧喷,降雨强度可控制在10~300 mm/h,降雨过程由计算机控制。因试验时段风大,而试验区域面积较小,为了避免风对人工降雨的干扰,喷头距离地表高度设为2.0 m,利用雨量筒测量实际雨强。经过率定后的降雨均匀度系数大于0.8,可满足人工

模拟降雨试验的要求。

试验地附近有一处生态塘,为保证试验中降雨系统的喷头不致堵塞及满足降雨用水水质的要求,降雨用水为事先储备好的生态塘上清液。经测定上清液的SS和TN、TP质量浓度分别为10 mg/L、0.97 mg/L和0.05 mg/L,满足试验用水要求。

1.3 分析方法

试验时天晴,模拟降雨开始后准确记录降雨产流时间,产流开始后,用500 mL的聚乙烯瓶每隔5 min采集1次径流样品,共采集4次,之后每隔10 min采集1次,产流时间共计60 min。试验结束后将收集的径流样品带回实验室进行分析。悬浮颗粒物SS测定方法根据GB11901—89《水质 悬浮物的测定 重量法》,TN测定方法根据HJ636—2012《水质 悬浮物的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》,TP测定方法根据GB11893—89《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》。

由于在一场降雨中污染物质量浓度是变化的,通常用次降雨平均质量浓度(event mean concentration, EMC)来代表一场降雨的污染物质量浓度,计算公式为

$$\rho_{EMC} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

式中: ρ_{EMC} 为EMC值,mg/L; ρ_i 为取样时间段内污染物质量浓度,mg/L; V_i 为取样时间段内径流体积,L; n 为整场降雨的取样次数。

次降雨流失量的计算公式为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i}{S_0} \quad (2)$$

式中: L 为流失量,mg/m²; S_0 为试验地面积,m²。

2 结果与讨论

2.1 不同降雨强度和下垫面对径流污染物质量浓度的影响

图1~3为不同降雨强度和下垫面条件下,径流中SS及TN、TP质量浓度随产流时间的变化。由图1可以看出,两种下垫面条件下径流中SS质量浓度随产流时间的总体变化趋势相近,即在产流后的较短时间内,质量浓度先迅速降低,随后降低速度变缓,直至渐趋稳定。这主要是因为降雨初期,雨水冲刷地表,破坏土壤团聚体结构,土壤颗粒被降雨径流卷携导致SS初始质量浓度较高^[13]。之后,雨水对地表的冲刷趋于稳定,则随径流卷携出的SS质量

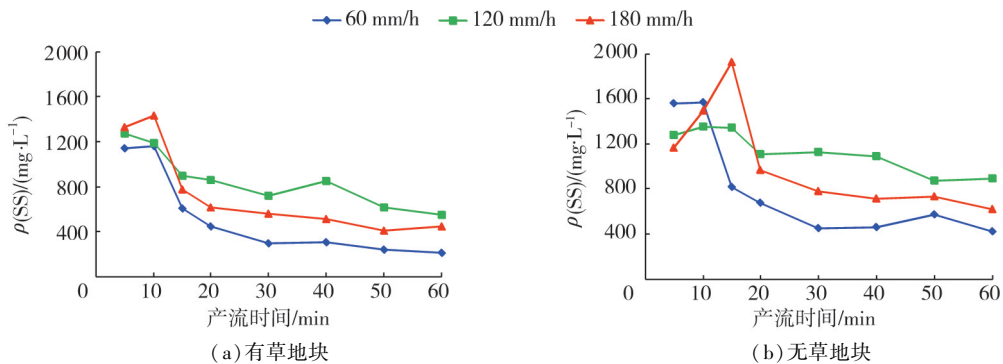


图1 径流中 SS 质量浓度随产流时间的变化

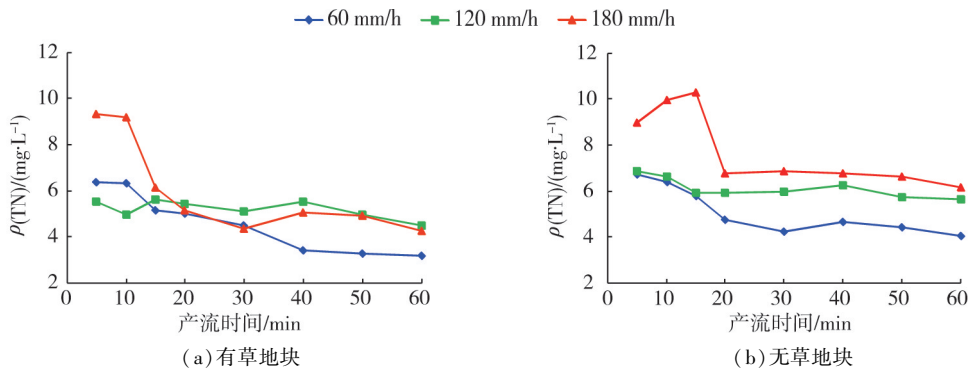


图2 径流中 TN 质量浓度随产流时间的变化

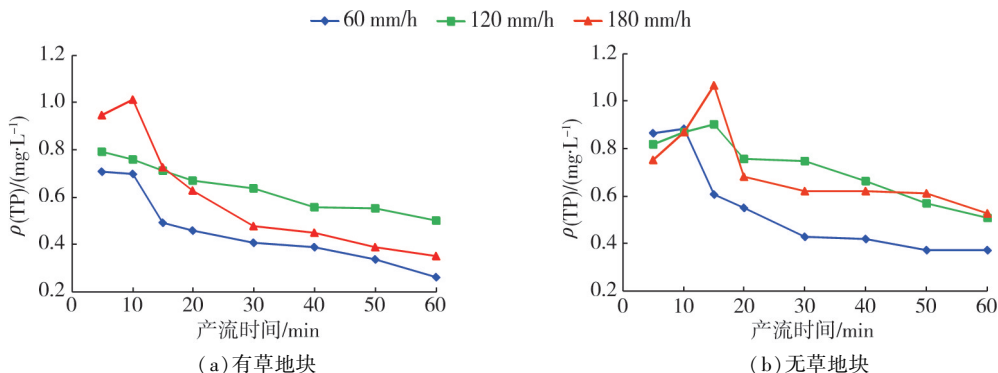


图3 径流中 TP 质量浓度随产流时间的变化

浓度也趋于稳定。由图2、图3可见,两种下垫面条件下径流中的TN和TP质量浓度随产流时间的变化趋势与SS具有一定的相似性,其中TP质量浓度的变化趋势与SS的相似性更高。

由图1~3可见,随产流时间的变化不同降雨强度和下垫面条件对径流中SS及TN、TP的质量浓度有一定的影响,但规律性不明显。通常认为,草被植物对地表的覆盖会减缓对表层土壤的冲刷作用^[14-15],因此推测割草后样地径流中污染物的初始质量浓度应高于有草样地。但是,由图1可以看出,在相同的降雨强度下,无草样地径流中SS的初始浓度并不一定高于有草样地,如在雨强为120 mm/h时,无草样地径流中SS质量浓度与有草样地相同,均为1271 mg/L,而当雨强为180 mm/h时,无草样地径流中SS质量浓度为1156 mg/L,甚至小于有草样地的1336 mg/L。

为了更直观地分析TN、TP和SS质量浓度的相关性,将不同降雨强度及下垫面条件下的TN、TP质量浓度与SS质量浓度进行相关性分析,结果见图4。可以看出,较之TN与SS的相关关系,TP与SS之间的线性相关性更强,这主要是由于TP和TN在土壤中的存在形态不同造成的。土壤中的磷吸附于土壤颗粒的表面,以不溶态为主^[16],因此,伴随着雨水对地表的冲刷,磷的流失与土壤颗粒的流失规律相一致。而土壤中氮的存在形态则较为复杂,其中大量不溶性的腐殖质、蛋白质等含氮有机物,主要以颗粒态存在,可以随土壤颗粒流出,而可溶性的无机氮,如硝氮和氨氮则从土壤中浸出,造成径流TN与SS质量浓度的相关关系偏移。

采用EMC进一步分析降雨强度和下垫面对径流污染物浓度的影响,结果见表1。由表1可见,在本试验的3个雨强条件下,下垫面对径流中SS及

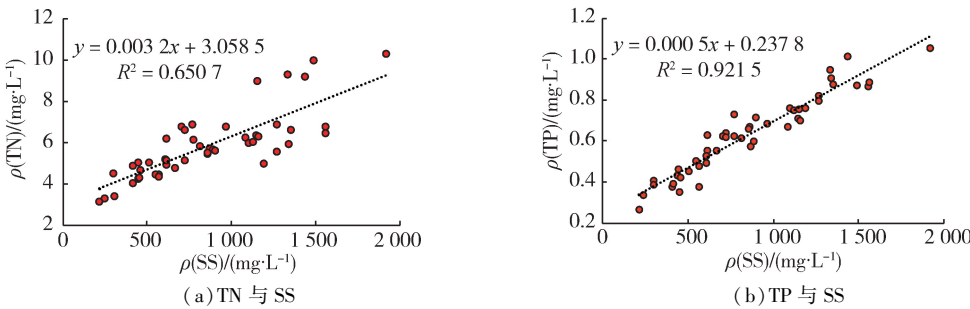


图 4 TN、TP 质量浓度与 SS 质量浓度的相关关系

TN、TP 的 EMC 值的影响规律是相同的,即无草样地径流污染物的 EMC 值均明显高于有草样地,这意味着在本试验条件下,虽然割草并未造成径流污染物初始质量浓度升高,但由于割草造成的草被对雨水冲刷下来的土壤颗粒截留作用减弱,随降雨时间的延长,造成了径流中污染物的 EMC 值升高。

由表 1 可见,降雨强度对径流中 SS 及 TN、TP 的 EMC 值的影响有所不同。在不同雨强和下垫面条件下,径流中 SS 的 EMC 值并非随雨强增大而线性增大。当雨强由 60 mm/h 上升至 120 mm/h 时,SS 的 EMC 值随之增大,但当雨强继续升至 180 mm/h 时,SS 的 EMC 值反而略有下降。分析认为,这是由于雨强越大,造成地面受到雨滴的击溅力越大,更多的土壤颗粒得以分散,使得地表径流卷携了更多的泥沙,导致 SS 的 EMC 值增大^[14];但是,当雨强增大至暴雨级别时,增大的地表径流量对暴雨冲刷作用产生的泥沙颗粒有较强的稀释作用强,导致 SS 的 EMC 值有所减小。径流中 TN 的 EMC 值随雨强增大,TN 的 EMC 值也相应增大,在雨强达到 180 mm/h 时,TN 的 EMC 值达到最大。分析认为,这是因为随着雨强增大,地表径流中卷携了更多土壤颗粒,同时促进了土壤中可溶态氮的浸出,当雨强继续增至暴雨强度(180 mm/h)时,促进了更多可溶态氮的溶出,使得径流中 TN 的 EMC 值继

续升高。由表 1 还可以看出,在不同雨强和下垫面条件下,雨强对 TP 的 EMC 值的影响与对 SS 的影响相同,这与图 4 中 TP 与 SS 的相关性分析结论一致。

2.2 不同降雨强度和下垫面对径流污染物流失量的影响

表 2 为试验期间不同雨强及下垫面条件下径流中各污染物的单位面积流失量。可以看出,在不同雨强条件下,各无草样地 SS、TN 及 TP 的单位面积流失量均高于有草样地,分别增加了 30% ~ 46%、11% ~ 29%、11% ~ 22%;雨强对 SS、TN 及 TP 的单位面积流失量的影响不同,TN 的最高流失量出现在雨强 180 mm/h 时,SS 和 TP 的最高流失量出现在雨强 120 mm/h 时。

由于降雨初期径流中污染物浓度较高,在进行面源污染控制设施设计时往往重视初期雨水的截留处理。计算不同雨强及下垫面条件下的 SS、TN 和 TP 在产流开始后 30 min 内的流失量,结果见表 3。可以看出,前 30 min 径流污染物的流失量受雨强和下垫面的影响情况与表 2 中的总流失量一致,前 30 min 污染物的流失量均占到总流失量的 60% 以上。另一方面,虽然无草样地前 30 min 径流污染物的流失量高于有草样地,但其占总流失量比例却略小于有草样地,意味着人工割草后,增大了降雨后期径流污染物的流失量。

表 1 不同雨强和下垫面条件下径流中污染物 EMC 值

雨强/ (mm·h ⁻¹)	ρ _{EMC} (SS)/(mg·L ⁻¹)		ρ _{EMC} (TN)/(mg·L ⁻¹)		ρ _{EMC} (TP)/(mg·L ⁻¹)	
	有草	无草	有草	无草	有草	无草
60	553.7 ± 26.5	810.8 ± 42.3	4.6 ± 0.24	5.1 ± 0.27	0.47 ± 0.022	0.56 ± 0.029
120	871.6 ± 44.6	1 129.8 ± 56.5	5.2 ± 0.27	6.1 ± 0.31	0.65 ± 0.034	0.73 ± 0.038
180	763.3 ± 36.1	1 043.5 ± 52.2	6.1 ± 0.30	7.8 ± 0.38	0.63 ± 0.032	0.72 ± 0.035

表 2 不同雨强和下垫面条件下径流中污染物单位面积流失量

雨强/ (mm·h ⁻¹)	SS 流失量/(g·m ⁻²)		K _{SS}	TN 流失量/(mg·m ⁻²)		K _{TN}	TP 流失量/(mg·m ⁻²)		K _{TP}
	有草	无草		有草	无草		有草	无草	
60	1.11 ± 0.05	1.62 ± 0.08	1.46	9.28 ± 0.45	10.28 ± 0.51	1.11	0.93 ± 0.05	1.13 ± 0.06	1.22
120	1.74 ± 0.08	2.26 ± 0.11	1.30	10.38 ± 0.52	12.26 ± 0.61	1.18	1.32 ± 0.07	1.46 ± 0.07	1.11
180	1.52 ± 0.07	2.09 ± 0.11	1.38	12.07 ± 0.61	15.62 ± 0.78	1.29	1.26 ± 0.06	1.44 ± 0.07	1.14

注:K_{SS}、K_{TN}、K_{TP}分别为无草样地 SS、TN、TP 流失量与有草样地相应流失量的比值。

表3 不同雨强和下垫面条件下前 30 min 径流中
污染物流失量

指标	雨强/ (mm·h ⁻¹)	流失量/(g·m ⁻²)		占总流失量比例/%	
		有草	无草	有草	无草
SS	60	0.92±0.05	1.26±0.06	82.8	77.8
	120	1.24±0.07	1.55±0.07	71.0	68.5
	180	1.18±0.06	1.58±0.08	77.4	75.5
TN	60	6.83±0.36	6.99±0.35	73.6	68.1
	120	6.66±0.35	7.85±0.41	64.1	64.0
	180	8.52±0.44	10.73±0.56	70.6	68.7
TP	60	0.69±0.03	0.84±0.04	73.8	72.4
	120	0.89±0.04	1.03±0.05	67.6	70.1
	180	0.96±0.05	0.99±0.05	76.4	69.3

3 结 论

- a. 试验研究不同降雨强度及下垫面条件下,径流中 TN、TP 质量浓度与 SS 质量浓度均呈线性相关关系,TP 与 SS 之间的线性相关性更强 ($R^2 = 0.9215$),意味着伴随径流颗粒物流失量的增加会加大营养盐流失的风险。
- b. 在试验强降雨条件下,由于人工割草减弱了果园草被对雨水冲刷下来的土壤颗粒的截留作用,造成了径流中 SS 及 TN、TP 的 EMC 值升高,加剧了果园面源污染的程度。建议在夏季多雨尤其是暴雨发生时段,减少对果园中杂草的收割频次。
- c. 在试验强降雨条件下,人工割草使果园径流 SS、TN、TP 的单位面积流失量分别增加了 30% ~ 46%、11% ~ 29%、11% ~ 22%,且增大了降雨后期流失量的比例。建议在进行果园面源污染控制设计时,适当考虑由于夏季割草增加的降雨后期径流污染物流失量的控制。

参考文献:

[1] 全为民,严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报,2002,22(3):291-299. (QUAN Weimin, YAN Lijiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3):291-299. (in Chinese))

[2] 边博,朱伟,李冰,等. 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术[J]. 水资源保护,2015,31(1):48-55. (BIAN Bo, ZHU Wei, LI Bing, et al. Characteristics and control techniques of non-point pollution in the western region of Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(1):48-55. (in Chinese))

[3] 耿润哲,王晓燕,庞树江,等. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学,2016,36(4):1258-1267. (GENG Runzhe, WANG Xiaoyan, PANG Shujiang, et al. Identification of key factors and zonation for nonpoint source pollution control in Chaohe River watershed [J]. China Environmental Science, 2016, 36

(4):1258-1267. (in Chinese))

[4] 周静雯,苏保林,黄宁波,等. 不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究[J]. 环境科学,2016,37(3):963-969. (ZHOU Jingwen, SU Baolin, HUANG Ningbo, et al. Runoff pollution experiments of paddy fields under different irrigation patterns [J]. Environmental Science, 2016, 37(3):963-969. (in Chinese))

[5] 孙铖,周华真,陈磊,等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1266-1273. (SUN Cheng, ZHOU Huazhen, CHEN Lei, et al. The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7):1266-1273. (in Chinese))

[6] 杨翠玲,祖艳群,李元,等. 不同配比的蔬菜与玉米间套作削减农田径流污染的研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(2):378-384. (YANG Cuiling, ZU Yanqun, LI Yuan, et al. Reduction of runoff from cultivated land with intercropping system of different ratio of vegetables to maize [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(2):378-384. (in Chinese))

[7] 毕明浩,梁斌,董静,等. 果园生草对氮素表层累积及径流损失的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):102-105. (BI Minghao, LIANG Bin, DONG Jing, et al. Effects of cover crop (*Vulpia myuros*) on the accumulation and runoff loss of nitrogen in orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):102-105. (in Chinese))

[8] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等. 我国果园生草的研究进展[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1892-1900. (WANG Yanting, JI Xiaohao, WU Yusen, et al. Research progress of cover crop in Chinese orchard [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6):1892-1900. (in Chinese))

[9] 李发林,谢南松,郑域茹,等. 生草栽培方式对坡地果园氮磷流失的控制效果[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2014,43(3):304-311. (LI Falin, XIE Nansong, ZHENG Yuru, et al. Influence of sod culture with the whole orchard on controlling the nitrogen and phosphorus erosion [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 43(3):304-311. (in Chinese))

[10] 高小叶,张兴兴,朱建国,等. 生草栽培对果园面源污染的控制:三种牧草的比较研究[J]. 草业学报,2015,24(2):49-54. (GAO Xiaoye, ZHANG Xingxing, ZHU Jianguo, et al. A comparison of the effect of three grass species on controlling non-point pollution in orchards [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(2):49-54. (in Chinese))

[11] 李发林,郑域茹,郑涛,等. 果园带状生草对果园面源污染的控制效果[J]. 水土保持学报,2013,27(3):82-89.

- (LI Falin,ZHENG Yuru,ZHENG Tao, et al. Influence of zonal grass on non-point source pollution control in orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(3):82-89. (in Chinese))
- [12] 付小猛,毛加梅,刘红明,等. 国内外有机果园杂草管理技术研究综述[J]. 杂草学报,2016,34(4):7-11. (FU Xiaomeng,MAO Jiamei,LIU Hongming, et al. Review on weed management in organic orchards at home and abroad [J]. Journal of Weed Science, 2016, 34 (4): 7-11. (in Chinese))
- [13] 袁溪,潘忠成,李敏,等. 雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(10):3099-3106. (YUAN Xi,PAN Zhongcheng,LI Min, et al. Influence of rainfall intensity and slope gradient on suspended substance and phosphorus losses in runoff[J]. China Environmental Science, 2016,36(10):3099-3106. (in Chinese))
- [14] 曾远,张永春,范学平. 太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析[J]. 水资源保护,2007,23(1):25-27. (ZENG Yuan,ZHANG Yongchun,FAN Xueping. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss of rainfall runoff in typical plain river-net area of Taihu Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (1): 25-27. (in Chinese))
- [15] 张展羽,王超,杨洁,等. 不同植被条件下红壤坡地果园氮磷流失特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):479-483. (ZHANG Zhanyu,WANG Chao,YANG Jie, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in garden of red soil slope land under different vegetation measures [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38 (5): 479-483. (in Chinese))
- [16] 石飞,于江华,方华,等. 模拟降雨下雨强对城市回填土草地径流系统中水量和污染物分配的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(9):3449-3455. (SHI Fei,YU Jianghua,FANG Hua, et al. Effects of rainfall intensity on the transport and distribution of water and pollutants in the runoff system with backfilled soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (9): 3449-3455. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-07-30 编辑:王 芳)

(上接第 38 页)

- [13] 裴丽萍. 可交易水权研究[M]. 北京:中国社会科学出版社,2008:93-106.
- [14] 陈洪转,杨向辉. 水权交易价值评估方法研究[J]. 能源技术与管理,2007(5):74-75. (CHENG Hongzhuan,YANG Xianghui. Study on value evaluation method of water right transaction [J]. Energy Technology and Management, 2007 (5): 74-74. (in Chinese))
- [15] 韩绵绵. 水权交易的第三方效应研究[M]. 北京:中国经济出版社,2012:75-97.
- [16] 田贵良,杜梦娇,蒋咏. 水权交易机制探究[J]. 水资源保护,2016,32(5):29-33. (TIAN Guiliang, DU Mengjiao, JIANG Yong. Study on water rights trading mechanisms [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (5): 29-33. (in Chinese))
- [17] 周晔,陈艳萍,吴凤平. 初始水权分配中的弱势群体初步评价[J]. 水资源保护,2011,27(2):75-79. (ZHOU Ye, CHEN Yanping, WU Fengping. Preliminary study on evaluation of vulnerable groups in initial water rights allocation [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (2): 75-79. (in Chinese))
- [18] 陈海嵩. 可交易水权制度构建探析:以澳大利亚水权制度改革为例[J]. 水资源保护,2011,27(3):91-94. (CHEN Haisong. Study on institution construction of tradable water rights: a case study of reform of tradable water rights in Australia [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (3): 91-94. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-07-04 编辑:彭桃英)

(上接第 52 页)

- [11] 云南省水利水电勘测设计研究院. 云南省水中长期供水规划[R]. 昆明:云南省水利厅,2013.
- [12] 马平森,雷艳娇,卯昌书,等. 基于用水总量与效率控制的云南省水资源配置[J]. 水利水电科技进展,2015,35(1):49-53. (MA Pingsen,LEI Yanjiao,MAO Changshu, et al. Water resources rational allocation based on total water consumption and water efficiency control in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (1): 49-53. (in Chinese))
- [13] 李宗礼,郝秀平,王中根,等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1975-1982. (LI Zongli,HAO Xiuping,WANG Zhonggen, et al. Exploration on classification of interconnected river system network [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (11): 1975-1982. (in Chinese))
- [14] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1023-1029. (WANG Jianhua,ZHAI Zhengli,SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (9): 1023-1029. (in Chinese))
- [15] 张欧阳,熊文,丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江,2010,41(1):1-5. (ZHANG Ouyang,XIONG Wen,DING Hongliang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2010, 41 (1): 1-5. (in Chinese))
- [16] 顾世祥,李俊德,谢波,等. 云南省水资源合理配置研究[J]. 水利水电技术,2007(12):54-58. (GU Shixiang,LI Junde,XIE Bo, et al. Study on reasonable allocation of water resources in Yunnan Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007 (12): 54-58. (in Chinese))
- (收稿日期:2018-07-05 编辑:王 芳)