

郭泽慧, 刘 洋, 黄懿梅, 等. 降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 158-166.

GUO Ze-hui, LIU Yang, HUANG Yi-mei, et al. Effects of rainfall and fertilization on water quality of the Yujia River watershed in the northern Qinling Mountains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 158-166.

降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响

郭泽慧, 刘 洋, 黄懿梅*, 晏江涛, 滕 飞, 王永斌

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了探讨小流域内种植业的施肥措施对流域内地面水质的影响机制,选取秦岭北麓的俞家河小流域为研究对象,设置 8 个覆盖整个流域特征的监测断面,并于该流域主要经济作物猕猴桃的 3 个典型施肥时期的不同降雨条件下对河流水质进行监测,分析水体中氮、磷和有机污染物含量的时空分布特征以及降雨和施肥对其产生的影响。结果表明:俞家河流域总氮浓度的变化范围是 $4.53\sim 11.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $6.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;总磷平均浓度的变化范围是 $0.004\sim 1.377\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.312\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;COD_{Mn} 浓度的变化范围为 $0.89\sim 11.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $3.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。早春基肥期总氮平均负荷为 $227.03\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,流域负荷增加了 73.34%;盛夏追肥期总磷平均负荷为 $11.36\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$,流域负荷增加了 117.36%。大雨时期总氮、总磷、COD_{Mn} 负荷分别为 228.10、9.94、174.53 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,对应增加的百分比为 35.93%、84.31%、69.65%。水体总氮、总磷浓度与降雨密切相关,雨强越大,浓度和负荷增加越显著,雨强是造成该流域氮素流失的主要气象参数。早春基肥期果园施加氮肥是水体总氮的主要来源,盛夏追施肥会增加水体磷素污染风险,早春施肥期大雨后存在较高的 COD_{Mn} 污染风险,降雨和施肥的叠加效应是导致面源污染发生的主要因素。河流污染负荷较高的区域集中于中部,主要由两岸猕猴桃园施肥引起,居民的生活污染也有一定贡献。

关键词:降雨;施肥;氮;磷;有机物;空间分布

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)01-0158-09 doi:10.11654/jaes.2016-0893

Effects of rainfall and fertilization on water quality of the Yujia River watershed in the northern Qinling Mountains

GUO Ze-hui, LIU Yang, HUANG Yi-mei*, YAN Jiang-tao, TENG Fei, WANG Yong-bin

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: With the purpose of investigating the mechanisms of how rainfall and fertilization affected the quality of ground water, we selected a typical Yujia River watershed in which eight water-sampling sections representing the watershed characteristics. Water quality (N, P and COD_{Mn}) was monitored after various rainfall intensities on Kiwifruit plots (main economical crop for the local) with three key fertilization time-points in early-spring, summer and late autumn. The results show that in Yujia River watershed the concentration of total N averages $6.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (range: $4.53\sim 11.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), the mean values for the concentrations of total P and COD_{Mn} are $0.312\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (range: $0.004\sim 1.377\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and $3.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (range: $0.89\sim 11.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) respectively. As for the load of fertilization applications to water quality, the mean load of total N during early-spring fertilization is $227.03\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, with an increase of 73.34% to the whole watershed, the average load of total P during the summer fertilization is $11.36\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, with an increase of 117.36%. With regard to rainfall, the loads of the total N, total P and COD_{Mn} during heavy rainfall period are $228.10\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, $9.94\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ and $174.53\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, with an increase of 35.93%, 84.31% and 69.65%, correspondingly. The concentration of total nitrogen and total phosphorus show a positive relationship with rainfall intensity. Therefore, as revealed by our data, rainfall is a main meteorological parameter to cause nitrogen loss in this region. Fertilization during early-spring con-

收稿日期: 2016-07-06

作者简介: 郭泽慧(1992—),女,山西山阴人,硕士研究生,从事生态环境工程研究。E-mail: guozehui_123@163.com

* 通信作者: 黄懿梅 E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家科技支撑计划项目“秦岭山地农业面源污染防治关键技术研究示范”(2012BAD15B04)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry Science and Technology of China (2012BAD15B04)

tributes substantially to the increased N concentration, and the risk of water P pollution becomes stronger especially in summer fertilization. There is higher COD_{Mn} contamination after heavy rain in early-spring. The combined effect of the rainfall and fertilization is the main factor causing the non-point pollution in Yujia River watershed. The main polluting area of the watershed was middle-part concentrated, which was mainly caused by kiwifruit fertilization, additionally, pollution from local living-residents may also be a reason to the total pollution.

Keywords: rainfall; fertilization; nitrogen; phosphorus; organic matter; spatial distribution

秦岭北麓素有“七十二峪”之称,是关中地区最大的水源地与水源涵养地。流域内河流的水质状况直接或间接影响当地及周边城市居民的饮水及身体健康状况。近年来,猕猴桃产业对秦岭北麓的农业经济和农民增收发挥着举足轻重的作用^[1]。猕猴桃园过量施用化肥的现象非常严重,平均用量是推荐量的 2 倍以上,过量施氮果园的比例高达 80% 以上^[2-3],再加之该区域土壤多发育于山前洪积扇,土质疏松,夏季降雨充沛,使得土壤表面养分更容易随降雨而流失,从而增加水体富营养化风险。导致面源污染发生的土壤营养元素有多种,其流失过程受多种因素影响^[4],其中降雨是营养元素流失的先决条件,地表污染物的累积情况为其提供了物质基础^[5]。目前,一些学者通过实地监测^[6-7]和人工模拟^[8-10]等方法对人口密度高、经济较为发达地区^[11-13]一年中的首场降雨或雨季典型降雨所引起的污染流失特征进行了研究分析,但对我国西北地区不同降雨条件下,施肥状况对流域内地面水质的影响并不清楚。本文拟通过对秦岭北麓俞家河流域主要施肥期不同雨量和雨强条件下俞家河的水质、水量进行监测和分析,旨在揭示俞家河流域水体碳、氮、磷营养物的时空分布特征及降雨和施肥对面源污染负荷输出的影响,为从源头上减少营养元素的流失和面源污染的发生以及水环境的改善提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况

秦岭北麓俞家河小流域位于陕西省周至县竹峪乡(107°39'~108°37'E, 33°42'~34°14'N),海拔 487~672 m,年平均气温 13.2℃,年均光照时数 2 154.7 h,无霜期 225 d,1956—2013 年的年平均降雨量 664.9 mm,集中在每年的 7—9 月,属典型的温带大陆性季风气候。流域面积 4.12 km²,其中耕地 1.17 km²,园地 1.60 km²,林地 0.29 km²,居民区及工矿用地 0.82 km²,其他 0.24 km²。区域内主要的粮食作物为小麦、玉米;林果类作物为猕猴桃,猕猴桃果园较多分布在河流两岸,其面积约占地面积的 83.82%,且比例在逐年扩大^[18]。流域土壤类型主要是壤土中的立茬土,质地黏重。表

层土壤(0~20 cm)有机质含量 8.57~17.32 mg·kg⁻¹,全氮含量 0.62~1.27 g·kg⁻¹,全磷含量 0~0.60 g·kg⁻¹,pH 值介于 5.79~7.52 之间^[19]。

1.2 监测断面和采样点的确定

依据俞家河流域的地理位置,结合周围的土地利用情况以及民居的分布状况,从河流上游至下游(从南至北),选择河道顺直、水流平缓的河段共布设 8 个监测断面(图 1),由于河宽小于 50 m,每个监测断面只布设一个样点,各样点的具体信息见表 1。降雨过程中在各样点采集两次瞬时水样,间隔时间为 5 min,然后将其均匀混合。常规月份进行两次监测,雨季适当增加采样次数和频率。

1.3 监测时间的确定

根据以往降雨信息和雨量计的测定值,再考虑猕猴桃的生长习性和需肥特点,监测时间分布于全年的三个时段,分别选取猕猴桃生长季中三个施肥阶段的晴天、小雨以及首次大雨作为水质监测的时间,具体分配及相应降雨情况见表 2。2015 年 1 月 25 日

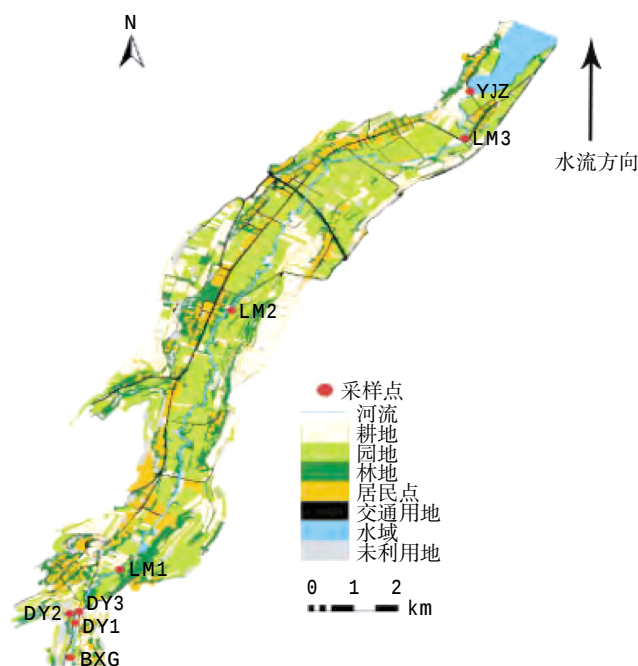


图 1 采样点位置介绍

Figure 1 Sampling site and land use of watershed

表 1 俞家河流域水样采样断面地理位置与土地利用状况^[19]
Table 1 Introduction of water samples and land use types in Yujia River

采样断面及性质	样点编号	地理位置	海拔/m	距源头 距离/m	在流域的 位置	土地利用状况所占比例				周边环境
						耕地	园地	林地	居民区	
白仙沟(上游对照)	BXG	34°09′39.6″N, 108°00′00″E	588.6	864	上游	39.3%	29.1%	10.4%	15.8%	猕猴桃园和大片林地
丹阳村 1(支流前 对照)	DY1	34°06′50.4″N, 108°01′55.2″E	584.1	1348	上游	36.9%	34.6%	5.4%	17.3%	有一条主要通行道路, 坡上栽种密集侧柏
丹阳村 2(支流 控制)	DY2	34°06′50.1″N, 108°01′55.9″E	585.7	—	上游					附近有大片猕猴桃园, 堆积生活垃圾
丹阳村 3(支流 汇入后控制)	DY3	34°06′50.6″N, 108°01′56.5″E	579.9	1378	上游					周边有几户住户,少许 垃圾丢弃
岭梅村 1(支流消减/ 岭梅村入村对照)	LM1	34°07′01.4″N, 108°02′06.5″E	576.1	1807	中游	26.3%	41.4%	6.3%	18.0%	一片猕猴桃园和荒丛林
岭梅村 2(岭梅村 中部控制)	LM2	34°08′11.5″N, 108°02′31.2″E	529.7	4076	中游					两岸均有大片较平整的 猕猴桃园,有农户在此 洗衣服
岭梅村 3(岭梅村 出村控制)	LM3	34°08′58.3″N, 108°03′28.4″E	496	6359	中游					大面积猕猴桃园,附近 有主干道
杨家庄(流出控制)	YJZ	34°09′10.9″N, 108°03′29.5″E	488.5	6780	下游	16.6%	46.9%	6.6%	9.9%	猕猴桃园,随意倾倒的 垃圾

(晴天)的水样作为对照,4 月 1 日降雨为早春施基肥后的首次大雨,6 月 23 日降雨为盛夏追肥后的首次大雨,10 月 24 日降雨为果实收获后越冬肥的首次大雨。

1.4 监测指标及其分析方法

在每个采样点用浅层采水器采集的表层水样 2.5 L,装入聚乙烯塑料瓶带回实验室,静置后在 48 h 内分析。总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定;总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法(GB/T 8538—1995)测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用草酸钠滴定酸性高锰酸钾法(GB 11892—1989)测定。流量是采用浮标法测定流速,同时测定河宽和河深后计算得到。采用区段法,用污染

物浓度与对应河段流量的乘积来计算污染负荷。流量及相应污染负荷的计算公式为:

$$\bar{v}=L/t \tag{1}$$

$$q_v=K\times\bar{v}\times\bar{A} \tag{2}$$

$$\Phi=\bar{c}\times q_v \tag{3}$$

式中:L 为测量间距,m; $\bar{v}$ 为浮标平均流速,m·s⁻¹;A 为平均断面面积,m²;K 为浮标系数; Φ 为污染负荷,g·d⁻¹。

1.5 数据处理方法

采用 Excel 2003 软件进行数据处理,利用 SPSS 20.0 进行统计分析。相同天气状况下不同施肥期以及相同施肥期不同天气状况下的水体氮、磷、有机物浓

表 2 水样采集时间及相应降雨指标
Table 2 Time of water sample collection and corresponding rainfall indexes

采样日期	降雨量/mm	天气状况	降雨持续时间/h	平均雨强/mm·h ⁻¹	晴天间隔时间/d
2015.01.25	0	晴天	—	—	—
2015.03.17	0	晴天	—	—	16
2015.03.22	4.85	小雨	4.75	1.02	21
2015.04.01	49.2	大雨	10.13	4.86	10
2015.06.15	6.75	小雨	19	0.36	2
2015.06.23	48.1	大雨	20.88	2.10	8
2015.06.25	0	晴天	—	—	1
2015.10.11	0	晴天	—	—	8
2015.10.24	36.4	大雨	22.25	1.63	21
2015.11.14	3.2	小雨	5	0.64	7

度采用 S-N-K 检验法进行多重比较分析。雨强与污染物浓度的相关性分析采用 Pearson 系数法。采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征及施肥状况

当地的降雨信息和俞家河流量的全年变化如图 2 所示。2015 年俞家河小流域降雨总量为 633.7 mm, 3—6 月降雨 329.75 mm, 占全年降雨量的 52%, 7—9 月干旱少雨, 降雨量与往年同期相比有所下降, 仅为全年降雨量的 30%。俞家河流量随月份和降雨特性而变化, 全年平均流量 $0.097\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

流域内猕猴桃果园通常情况下每年共施肥 3 次: 第一次为早春 2—3 月, 以氮肥为主, 并配施少量磷肥、钾肥的基肥, 氮肥用量约为全年的 40%; 第二次是 6 月初, 盛夏追施肥以磷肥为主, 磷肥施加比例为全年磷肥施加量的三分之二, 并辅助进行叶面喷施氮肥; 第三次是采果后, 即 10 月上旬, 施以人畜粪肥为主的有机肥。路永莉等^[2]、高品波等^[3]对流域猕猴桃园的肥料投入量的调查结果如表 3 所示。流域果园氮肥、磷肥施用过量情况严重, 而有机肥投入明显不足, 2012 年和 2013 年分别有 46.6% 和 26.1% 的果园不施有机肥, 有机肥提供果园总养分的 27.3%。

2.2 俞家河水体氮、磷与 COD_{Mn} 浓度的时间变化特征

如图 3a 所示, 在所选的监测时段里总氮浓度

的变化范围是 $4.53\sim11.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $6.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 所有监测数据均超标 ($\text{TN}>2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 处于地表水质量标准 (GB 3838—2002) 劣 V 类水质, 表明俞家河流域受氮素污染较为严重。早春施基肥期和盛夏追肥期, 河水中总氮的平均浓度在大雨时极显著高于晴天和小雨, 晴天和小雨差异不显著; 秋冬越冬肥期, 河水总氮的平均浓度在晴天、小雨、大雨时期差异不显著。河水中总氮的平均浓度在三个施肥期的同一天气状况下没有显著差异。可见, 俞家河流域水体总氮浓度受大雨的影响较大。

总磷平均浓度的变化范围是 $0.004\sim1.377\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.312\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3b)。晴天水样总磷平均浓度的变化范围是 $0.056\sim0.152\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在地表水 III 类水质标准内。除 3 月 22 日 (小雨) 的监测数据外, 小雨时期总磷平均浓度的变化范围是 $0.179\sim0.460\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于晴天水样总磷的平均浓度, 但差异不显著。三个施肥时期, 水体总磷平均浓度在大雨条件下都显著高于晴天和小雨。在三种天气状况下, 盛夏追肥期水体总磷的平均浓度 ($0.663\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 均显著高于早春基肥期 ($0.101\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和秋冬越冬肥期 ($0.295\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。可见, 水体磷素的高低与降雨和施肥期有关, 盛夏追肥期的大雨后, 流域水体总磷的平均浓度增加显著。

高锰酸盐指数反映河水中有有机物的污染状况, 常用 COD_{Mn} 来表示。流域内河水中 COD_{Mn} 浓度在监测期间的变化范围为 $0.89\sim11.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $3.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3c), 除早春基肥和秋冬越冬肥后两次大雨超过 III 类水水质标准外, 其余时段水质较好, 符合 III 类水水质标准要求。早春施基肥期, 大雨后 ($11.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于晴天 ($2.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和小雨 ($1.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 晴天和小雨差异显著; 盛夏追肥期, 晴天 ($1.91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 高于大雨 ($1.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和小雨 ($1.73\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 但三者无显著差异。秋冬追施肥期, 大雨 ($4.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于晴天 ($3.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和小雨 ($1.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 晴天和小雨无显著差异。流域 COD_{Mn} 浓度在不同施肥期差异明显。早春施基肥期 COD_{Mn} 平均浓度高达 $7.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著高于盛夏追肥期 ($1.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和秋冬越冬肥期 ($3.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。可见, 流域水体在早春施肥期大

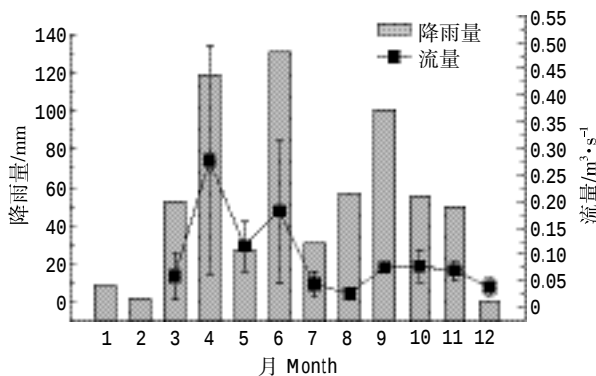


图 2 2015 年降雨量和流量特征
Figure 2 Rainfall characteristics and monthly mean flux

表 3 俞家河流域猕猴桃果园施肥情况统计^[2-3]
Table 3 Statistics of fertilization in kiwifruit orchards of Yujia River watershed

养分	施用量范围/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	平均值/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	合理范围/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	施肥比例/%				
				过低	偏低	合理	偏高 h	过高
N	189~2541	1047	375~500	—	—	5	22.7	59.1
P_2O_5	0~2430	386	186~266	16.1	12.8	19.4	36.8	14.9

雨后存在较高的 COD_{Mn} 污染风险,应注重监管。

2.3 俞家河水体氮、磷、 COD_{Mn} 负荷的空间分布特征

2.3.1 不同河段在不同施肥时期氮、磷、 COD_{Mn} 负荷的空间分布特征

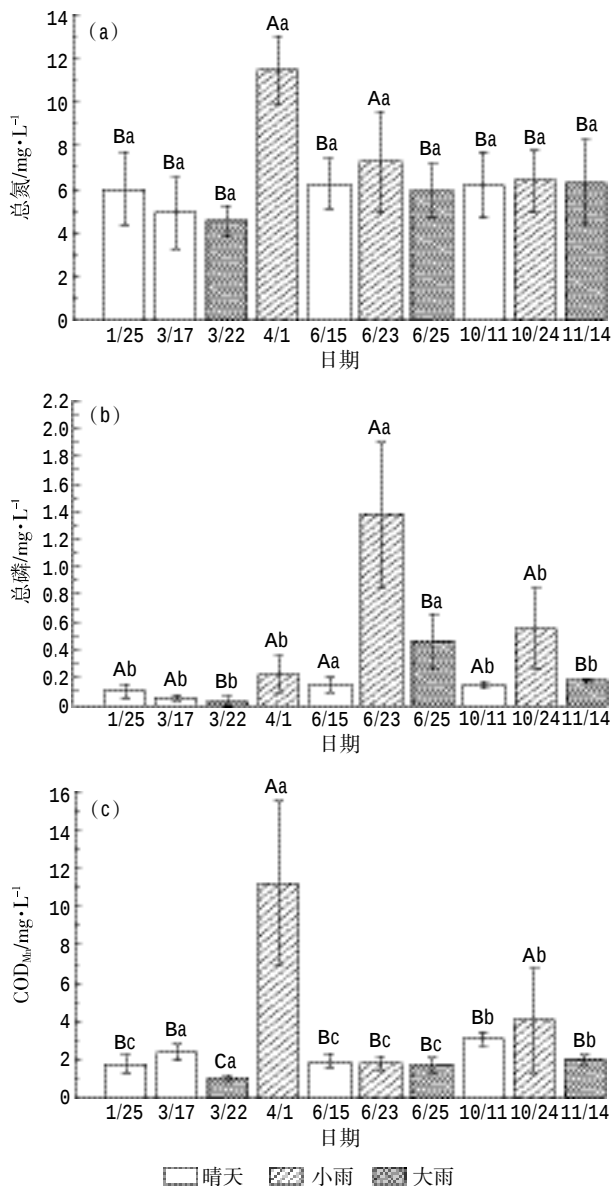
污染负荷与地区的地理环境、水文、气象等因素有关,可以较全面地显示面源污染情况。俞家河流域地形狭长,由西南向东北倾斜,河水从海拔较高的白仙沟上面的天然集水区流经白仙沟、丹阳(上游)、岭梅(中游)和杨家庄(下游)等行政村域,汇入最低点仰天河西水库,污染物质也随水体的迁移向下游输送和

累积。不同施肥期流域内水体负荷结果如图4所示。早春基肥期总氮平均负荷为 $227.03 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别是盛夏追肥期和秋冬越冬肥期水体总氮负荷的 2.3 倍和 6.0 倍。早春基肥期 COD_{Mn} 平均负荷为 $222.30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别是盛夏追肥期和秋冬越冬肥期水体总氮负荷的 8.1 倍和 11.7 倍。盛夏追肥期总磷平均负荷为 $11.36 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别是早春基肥期和秋冬越冬肥期水体总氮负荷的 2.3 倍和 5.1 倍。

总氮负荷的高峰段为丹阳和岭梅段,白仙沟和杨家庄的总氮负荷较低(图4a)。早春施肥期,丹阳和岭梅的总氮负荷分别高达 188.4 、 $373.2 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 是杨家庄的 2.4 倍和 4.8 倍。盛夏追肥期,丹阳总氮负荷最高,其值达到顶峰,为 $121.92 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 岭梅略低,为 $107.14 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 仍为杨家庄的 2 倍。秋冬越冬肥期,丹阳和岭梅的总氮负荷较前两个施肥期有所下降,其均值仅为 $42.34 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 但仍高于杨家庄。三个主要施肥期,流域从源头到出口总氮负荷分别增加了 73.34%、-14.96% 和 45.30%。可见早春施肥是流域水体氮素超标的一个重要来源。

俞家河流域总磷负荷空间分布特征与总氮大致相同(图4b),丹阳和岭梅仍为主要的污染输入区域。早春施肥期,丹阳和岭梅的总磷负荷分别高达 3.46 、 $8.64 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 是杨家庄的 3.1 倍和 8.1 倍。盛夏追肥期,岭梅总磷负荷最高,为 $17.28 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 丹阳略低,为 $10.37 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别是杨家庄的 2.6 倍和 4.3 倍。秋冬越冬肥期,岭梅总磷负荷($3.46 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)高于其他地区。三个主要施肥期,流域总磷负荷从源头到出口分别增加了 95.06%、117.36% 和 36.88%。与总氮负荷的时间分布不同,总磷平均负荷在各施肥期差异显著,表现为盛夏追肥期($8.64 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)显著高于早春基肥期($3.46 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)和秋冬越冬肥期($1.73 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)。虽然总磷负荷增加量较小,但磷素环境临界值低,超过临界值会引起严重的环境问题,因此盛夏追施肥会增加水体磷素污染风险。

俞家河流域 COD_{Mn} 负荷空间分布特征与总氮、总磷一致(图4c),岭梅段污染尤为突出。早春施肥期,丹阳和岭梅的 COD_{Mn} 负荷分别高达 184.90 、 $382.75 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, 是杨家庄的 13.4 倍和 27.7 倍。盛夏追肥期与秋冬越冬肥期 COD_{Mn} 在空间分布差异不显著,盛夏追肥期 COD_{Mn} 平均负荷($26.78 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)略高于秋冬越冬肥期($16.42 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)。三个主要施肥期,流域 COD_{Mn} 负荷从源头到出口分别增加了 77.54%、37.95% 和 20.52%。早春施肥期 COD_{Mn} 远远高于其他两个时期,污染较重。



不同大、小写字母分别表示天气、施肥期间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

图3 2015年不同时期俞家河河水污染物平均浓度变化特征
Figure 3 Characteristics of average pollution variation in different periods of Yujia River in 2015

2.3.2 不同河段在不同天气状况氮、磷、 COD_{Mn} 负荷的空间分布特征

不同天气状况下流域水体污染负荷结果(图 5)显示,降雨将增加河流的污染负荷,大雨的增加程度最为显著,但不同污染物被降雨携带进入水体的程度有所差别,流域大雨时期水体总氮平均负荷为 $228.10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别为晴天($19.87 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)和小雨($65.66 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)的 11.5 倍和 3.5 倍;总磷平均负荷为 $9.94 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别为晴天($0.432 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)和小雨($3.72 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)的 23 倍和 2.67 倍; COD_{Mn} 平均负荷为 $174.53 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别为晴天($6.91 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)和小雨($20.74 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)的 24.5 倍和 8.2 倍。流域整体污染负荷增加量在晴天和小雨时差异不显著,大雨对流域水体污染负荷的增加作用显著。

不同天气状况下,水体污染负荷空间分布差异显著。总氮、总磷负荷的高污染区集中在岭梅段。总氮负荷(图 5a)在大雨时,岭梅段最高($412.08 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$)、丹阳段次之($236.32 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$),显著高于白仙沟和杨家庄,分别是后二者的 4.1 倍和 2.4 倍;小雨时,岭梅段最高,达 $88.14 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 、丹阳段次之,为 $77.92 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别是杨家庄总氮负荷的 1.8 倍和 1.6 倍。晴天时,岭梅段仍为最高($31.22 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$),是杨家庄的 2.4 倍。流域在大雨、小雨、晴天的总氮负荷从源头到出口分别增加了 35.93%、8.41% 和 30.39%。俞家河流域总磷负荷空间分布特征与总氮大致相同(图 5b),丹阳和岭梅仍为主要的污染输入区域。大雨时,岭梅总磷负荷最高,为 $21.90 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,丹阳略低,为 $11.60 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别是杨家庄

的 2.9 倍和 5.4 倍。小雨时,丹阳和岭梅的总磷负荷分别高达 $3.51 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $7.30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,分别是杨家庄的 1.5 倍和 3 倍。晴天时,流域总磷负荷显著低于降雨时期,岭梅总磷最高仅为 $0.61 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。流域在大雨、小雨、晴天的总磷负荷从源头到出口分别增加了 84.31%、45.42% 和 -27.42%。大雨时期岭梅段的 COD_{Mn} 负荷较大,高达 $393.43 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,是杨家庄的 15.5 倍。小雨和晴天时期,丹阳和岭梅的负荷相差不多,分别为杨家庄的 2.7 倍和 0.86 倍。流域在大雨、小雨、晴天的 COD_{Mn} 负荷从源头到出口分别增加了 69.65%、65.30% 和 23.32%。

3 讨论

3.1 降雨和施肥对污染物流失的影响

俞家河流域水体来源主要有三部分,上游天然集水区向下游的输送、农业灌溉用水的汇集,以及降雨径流和壤中流的汇入。降雨是除人为因素干扰外导致污染物流失进入水体的主要自然因素,是污染物流失的先决条件^[5],降雨特征(降雨量、降雨强度和雨前晴天天数等)对污染物的流失存在显著影响^[20]。

流域水体氮、磷、 COD_{Mn} 的浓度以及不同天气状况下的空间分布特征均表现出大雨显著增加了水体的污染程度,说明降雨量的大小与水体的污染程度密切相关。但降雨量并不是唯一的影响因素,盛夏追肥时期的大雨(6 月 23 日)与早春施基肥后的大雨(4 月 1 日)降雨量虽接近,但前者总氮浓度为 $7.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显著低于后者($11.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。这是由于 4 月 1 日的大

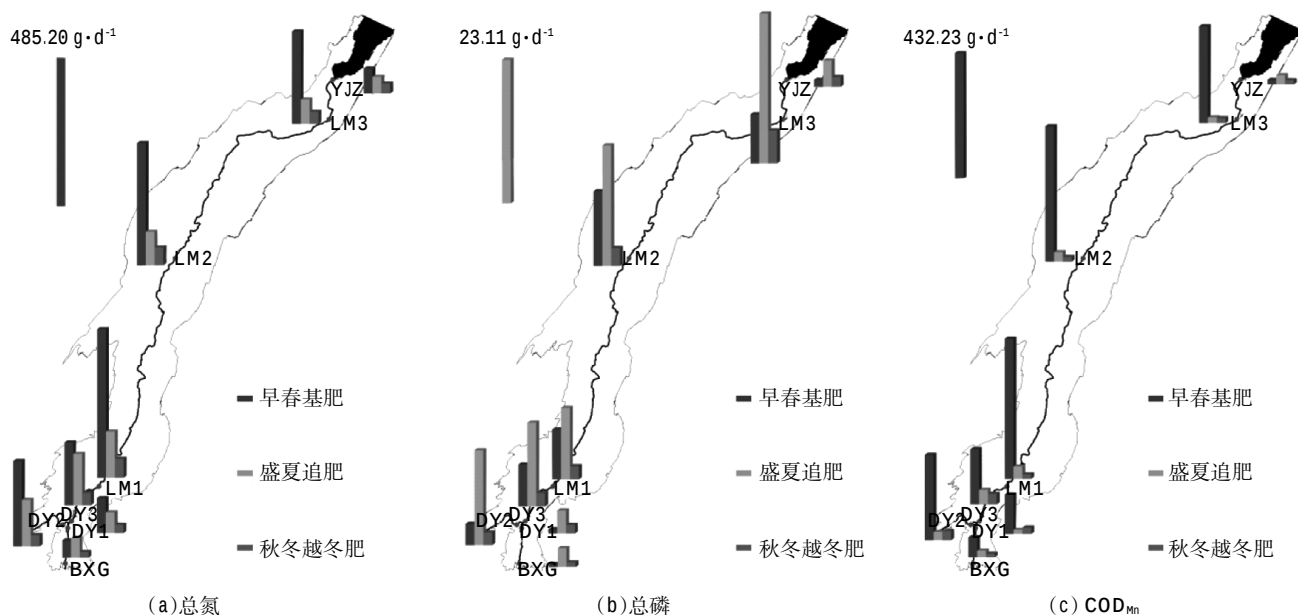


图 4 各样点不同施肥期总氮、总磷和 COD_{Mn} 负荷

Figure 4 Load of total nitrogen, total phosphorus and COD_{Mn} at different points in different fertilization periods

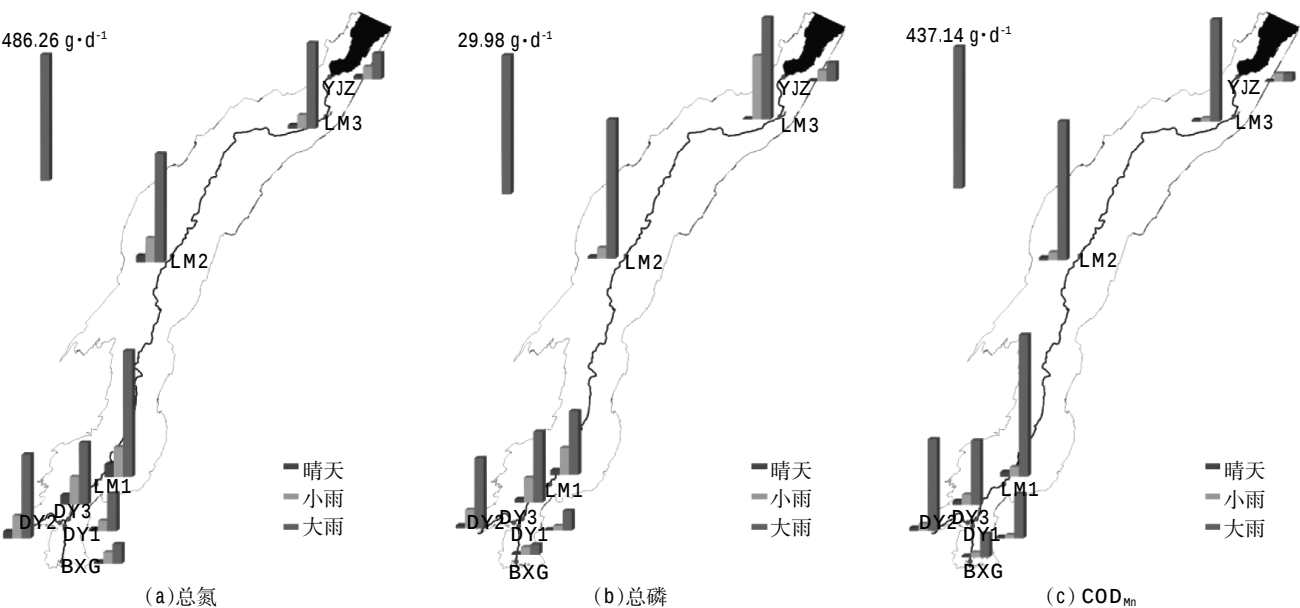


图 5 各样点不同天气状况总氮、总磷和 COD_{Mn} 负荷
Figure 5 Load of total nitrogen、total phosphorus and COD_{Mn} at different points in different weather

雨历时短、强度大,破坏了较大颗粒的土壤团聚体,使得团聚体分散,污染物流失量大为增加^[24]。分析平均雨强与水体总氮、总磷、COD_{Mn}浓度的相关关系可知,总氮、COD_{Mn}与雨强显著相关(表 4),与潘忠成等^[10]的研究一致,说明雨强是造成俞家河流域氮素流失的主要气象参数。另一个原因是雨前的晴天天数不同(表 2)。李立青等^[20]分析降雨时间间隔对城市径流污染负荷的影响指出,随着晴天天数的累积,降雨径流污染负荷存在增加的趋势。2015 年秦岭地区的雨季分布与往年不同,主要集中在 4—6 月,早春施基期降雨频率小,降雨间隔时间长,大量含氮污染物在地表富集;盛夏追肥期恰逢雨季,降雨频繁,土壤表面氮素大多已被冲刷进入水体,含量较低,导致两个时间段地表污染物累积程度存在差异,进而影响到可被降雨径流冲刷、携带污染物的数量。秋冬越冬施肥期晴天间隔天数虽与早春期较为接近,但降雨量以及雨强明显低于早春期和盛夏期,可见雨前晴天天数并非影响污染产生的主要因素。因此,秦岭北麓俞家河流域污染物浓度在大雨期显著高于晴天和小雨期,且差异较大,表明污染物浓度受降雨量和雨强影响较大。

为了满足猕猴桃的生长需求,三次主要施肥期的施肥量、施肥种类以及施肥比例均有差别。不同施肥期水体中总氮、总磷、COD_{Mn}浓度和负荷显示早春施基肥期主要污染物是总氮,盛夏追肥期的主要污染物是总磷,这也是导致早春施基肥后的首场大雨后水体

总氮浓度很高的主要原因。这与汪丽婷等^[22]和谢真越等^[23]分别在稻田和菜地得出增施肥料加大了污染物随地表径流流失风险的结果一致。且王莉^[19]研究发现该区域内畜禽养殖数目较少,畜禽粪便不是氮素和有机物的主要来源。因此果园施加氮肥是水体总氮污染的主要来源。盛夏追肥,水体总氮浓度虽仍为主要污染物,但与早春期相比浓度下降,总磷污染显著,流域整体上总磷负荷高于其他两个时期。夏季正值猕猴桃磷素营养吸收的最大效率期^[24-25],果农追求利益最大化,集中施加磷肥,导致盛夏俞家河水体总磷污染。而总氮浓度降低是由于夏季氮肥主要采用叶面喷施的方式,植物通过叶面气孔吸收氮素的方式进行生长,间接说明不同的施肥方式对水体氮素浓度也存在影响,肥料直接施于土壤表面易在降雨集中期流失。秋冬越冬肥期,以施用人畜粪肥为主,部分施用油渣、菌肥等有机肥,氮、磷、COD_{Mn}负荷均低于前两个施肥期,由于果园地表的枯枝落叶大大减少了雨滴的溅蚀性能^[26],加之气温较低,降雨较少,河流长期枯竭,使土壤颗粒及其附着污染物的流失量降低,在一定程度

表 4 降雨平均雨强与污染物浓度的相关性分析(n=6,P<0.05)
Table 4 Relation analysis between average raininess and pollution concentration during rainfalls(n=6,P<0.05)

分析项目	线性回归方程	相关系数	显著性
雨强-TN	Y=1.310X+4.702	0.844	显著相关
雨强-TP	Y=0.046X+0.338	0.849	显著相关
雨强-COD _{Mn}	Y=2.149X-0.126	0.022	无相关

上阻碍拦截了进入水体的污染物数量。

3.2 流域污染负荷空间差异分析

流域通过水循环构成自然连接,污染物的输出与流域环境内的土地利用结构、地表植被类型、整地措施以及地形、地势等有着密切联系。

俞家河流域的土地利用结构以耕地、居住地、林地为主,通过遥感图像识别获得流域内各样地的土地利用结构面积比(表1)。从白仙沟至杨家庄,耕地、林地比例逐渐减少,耕地和林地面积分别减少19.3%和3.8%,而以种植猕猴桃为主产的园地面积比例逐渐增加,幅度达17.8%。不同施肥期和不同天气状况下的污染负荷输出情况均显示,丹阳和岭梅段是流域污染物的集中输出区域。这是由于:一方面,流域的中游遍布着大小不同、不同年龄层次、不同品种的猕猴桃园。果农为最大化追求经济利益,过量施用化肥,施用量是推荐量的3倍之多^[27-29],肥料使用后并不能马上被植物所吸收,肥料的低利用效率导致大量养分残留在土壤表面,也为面源污染的发生提供了物质基础。另一方面,岭梅段是俞家河流经的主要区域,也是当地乡镇政府所在地,人口密度较大,农户居住地大多分布在河流两侧,居民在河流两侧肆意倾倒生活垃圾。当地农家有机肥还田率低,且经济基础相对落后,缺乏处理生活垃圾和污水的基础设备,这种空间布局以及缺乏人为管理可能加重了污染物的输出。因此,俞家河流域污染负荷较高的区域集中于中部的岭梅段,污染主要是由这一段猕猴桃园施肥所致,同时,居民的生活污染也有一定贡献。

4 结论

(1)俞家河流域的主要污染物是总氮和总磷。早春基肥期果园施加氮肥是水体总氮污染的主要来源。盛夏追施肥可能增加俞家河流域水体磷素污染风险,早春施肥期大雨后存在较高的 COD_{Mn} 污染风险。俞家河流域水体污染是降雨和施肥的叠加效应导致的。

(2)俞家河流域水体总氮、总磷浓度与降雨密切相关,雨强越大,浓度和负荷增加越显著。雨强是造成俞家河流域氮素、有机物流失的重要气象参数。

(3)俞家河流域的主要污染区域集中在流域中游,污染主要由猕猴桃园的施肥导致,居民生活污染也有一定贡献。

参考文献:

[1] 陕西省统计局. 2014年陕西省果业发展统计(监测)公报[EB/OL].

<http://www.shaanxi.gov.cn/0/1/65/365/370/192956.htm>.

Bureau of Statistics of Shaanxi. The 2014 statistics (monitoring) bulletin of the fruit industry development in Shaanxi province[EB/OL]. <http://www.shaanxi.gov.cn/0/1/65/365/370/192956.htm>.

[2] 路永莉, 康婷婷, 张晓佳, 等. 秦岭北麓猕猴桃果园施肥现状与评价:以周至县俞家河流域为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2):380-387.

LU Yong-li, KANG Ting-ting, ZHANG Xiao-jia, et al. Evaluation of current fertilization status in kiwifruit orchards on the northern slope of Qinling Mountains: A case study of Yujiahe catchment, in Zhouzhi County[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2):380-387.

[3] 高晶波, 路永莉, 陈竹君, 等. 猕猴桃园氮素投入特点及硝态氮累积和迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):322-328.

GAO Jing-bo, LU Yong-li, CHEN Zhu-jun, et al. Nitrogen inputs and nitrate accumulation and movement in soil of kiwifruit orchards[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 35(2):322-328.

[4] Kakuturu S, Chopra M, Hardin M, et al. Total nitrogen losses from fertilized turfs on simulated highway slopes in Florida[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2013, 139(6):829-837.

[5] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20):6664-6676.

ZHANG Yi-tao, LIU Hong-bin, WANG Hong-yuan, et al. Abibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20):6664-6676.

[6] Yoon S W, Chung S W, Oh D G, et al. Monitoring of non-point source pollutants load from a mixed forest landuse[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6):801-805.

[7] Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6):946-952.

[8] 张亚丽, 李怀恩, 杨素勤, 等. 模拟降雨条件下黄土坡地土壤溶质迁移特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):113-117.

ZHANG Ya-li, LI Huai-en, YANG Su-qin, et al. Traits of soil solute transport on loess slope land under condition of simulation rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4):113-117.

[9] 郝利朋. 辽宁省浑河流域降雨径流中氮磷流失特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.

HAO Li-peng. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses of rainfall runoff in Liaoning Hunhe Basin[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.

[10] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):9-13.

PAN Zhong-cheng, YUAN Xi, LI Min. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1):9-13.

[11] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1):96-101.

YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source

- pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1):96-101.
- [12] 奚姗姗, 周春财, 刘桂建, 等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2):542-547.
- XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, et al. Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2016, 37(2):542-547.
- [13] 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 2013, 34(2):547-554.
- ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, et al. Spatial heterogeneity and classified control of agricultural non-point source pollution in Huaihe River basin[J]. Environmental Science, 2013, 34(2):547-554.
- [14] 陈志良, 程炯, 刘平, 等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5):30-33.
- CHEN Zhi-liang, CHENG Jiong, LIU Ping, et al. An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in river basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5):30-33.
- [15] 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.
- JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jia-liang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2008, 27(4):1353-1358.
- [16] 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 Guang-hua, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, et al. Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng Mountainous area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6):120-125.
- [17] 李振伟, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1152-1158.
- LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, et al. Output characteristics of non-point phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountainous area under the special rainfall[J]. Environmental Science, 2012, 33(4):1152-1158.
- [18] 韦安胜, 陈竹君, 康婷婷, 等. 秦岭北麓周至县俞家河小流域土壤养分空间变异研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):128-132.
- WEI An-sheng, CHEN Zhu-jun, KANG Ting-ting, et al. Spatial variability of soil nutrients of Yujia Catchment in Zhouzhi at the northern piedmont of Qinling Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2):128-132.
- [19] 王莉. 秦岭北麓俞家河流域农业面源污染特征及种植业污染途径分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- WANG Li. Analysis of agricultural non-point source pollution characteristic and pathway of planting pollution of Yujia River basin in the north of Qinling Mountains[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [20] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(10):2287-2293.
- LI Li-qing, YIN Cheng-qing, KONG Ling-li, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load[J]. Environmental Science, 2007, 28(10):2287-2293.
- [21] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):81-85.
- LIANG Fei-fei, JIANG Xian-jun, YUAN Jun-ji, et al. Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4):81-85.
- [22] 汪丽婷, 马友华, 储茵, 等. 巢湖流域不同施肥措施下稻田氮磷流失特征与产量研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5):40-43.
- WANG Li-ting, MA You-hua, CHU Yin, et al. Study of nitrogen and phosphorus losses and yield of rice in different fertilizations of Chaohu Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5):40-43.
- [23] 谢真越, 卓慕宁, 李定强, 等. 不同施肥水平下菜地径流氮磷流失特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1423-1427.
- XIE Zhen-yue, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from vegetable fields under different fertilization levels[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8):1423-1427.
- [24] Kang J, Amoozegar A, Hesterberg D, et al. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources[J]. Geoderma, 2011, 161:194-201.
- [25] Neumann A, Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen and phosphorus leaching losses from potatoes with different harvest times and following crops[J]. Field Crops Research, 2012, 133:130-138.
- [26] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(3):16-19.
- ZHANG Xing-chang, LIU Guo-bin, FU Hui-fang. Soil nitrogen losses of catchment by water erosion as affected by vegetation coverage[J]. Environmental Science, 2000, 21(3):16-19.
- [27] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥养分志[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:44-45.
- National agricultural technology extension and service centre. China organic fertilizer records[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999:44-45.
- [28] 王建, 同延安. 猕猴桃树对氮素吸收、利用和贮存的定量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6):1170-1177.
- WANG Jian, TONG Yan-an. Study on absorption, utilization and storage of nitrogen of kiwifruit tree[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6):1170-1177.
- [29] 乔继红, 张斌, 杨苏鲜. 户县猕猴桃测土配方施肥技术[J]. 中国农业推广, 2009, 25(10):41-42.
- QIAO Ji-hong, ZHANG Bin, YANG Su-xian. The kiwifruit trees soil-testing and fertilization recommendation in Huxian county[J]. China Agricultural Technology Extension, 2009, 25(10):41-42.