

李盟军, 艾绍英, 宁建凤, 等. 不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 33-42.

LI Meng-jun, AI Shao-ying, NING Jian-feng, et al. Runoff characteristics of phosphorus and potassium from a perennial vegetable field under different nutrition managements[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 33-42.

不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征

李盟军, 艾绍英*, 宁建凤, 王荣辉, 姚建武, 余丹妮

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室/广东省农业面源污染监测评估与防控工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要:为研究不同养分管理措施下菜地磷、钾养分径流流失特征,采用田间小区试验方法,设置对照(CK)和有机肥配施不同用量化肥处理(N0,化肥氮空白;CON,习惯施肥;OPT,优化施肥;OPT+N,优化增氮;OPT+P,优化增磷;OPT+NPK,优化增氮磷钾)。结果表明,不同处理下可溶性总磷、颗粒态磷和总磷径流浓度分别为0.015~0.500、0.004~0.623 mg·L⁻¹和0.093~0.876 mg·L⁻¹,施磷明显增加径流水可溶性磷浓度,对总磷和颗粒态磷浓度影响较小。不同处理径流水总磷浓度均不同程度超地表水Ⅴ类标准(GB 3838—2002),且施磷量最高的OPT+NPK处理总磷超标率高达56%。总磷年流失负荷为4.37~4.93 kg·hm⁻²,施肥处理磷流失负荷均低于对照,不同处理间总磷流失负荷无明显差异。不同处理的钾径流浓度为4.7~83.0 mg·L⁻¹,年流失负荷为176.9~331.7 kg·hm⁻²,流失系数为4.5%~15.7%。施钾显著增加菜地钾的流失负荷,施钾量最高的OPT+NPK处理钾流失负荷最高,肥料N/K₂O比例最高的OPT+N处理钾流失负荷最低。研究表明,不同养分管理措施下菜地磷径流损失无明显变化,而OPT+N处理钾流失负荷及流失系数均最低,蔬菜实际生产中氮、钾合理配施有利于降低钾的流失。

关键词:常年菜地;珠三角;磷流失;钾流失;养分管理

中图分类号:S19;X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)01-0033-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0091

Runoff characteristics of phosphorus and potassium from a perennial vegetable field under different nutrition managements

LI Meng-jun, AI Shao-ying*, NING Jian-feng, WANG Rong-hui, YAO Jian-wu, YU Dan-ni

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation/Guangdong Engineering Research Center for Monitoring and Prevention of Agricultural Non-point Source Pollution, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A plot experiment with treatments of different combinations of organic and inorganic fertilizers was conducted in a perennial vegetable field. Seven treatments in this experiment including control (CK) and OM combined with different rates of inorganic fertilizers i.e. no fertilization of inorganic nitrogen (N0), conventional fertilization (CON), optimum fertilization (OPT), nitrogen addition upon OPT level (OPT+N), phosphorus addition upon OPT level (OPT+P), synchronous addition of nitrogen, phosphorus and potassium upon OPT level (OPT+NPK). The concentration of dissolved phosphorus, particulate phosphorus and total phosphorus were 0.015~0.500, 0.004~0.623 mg L⁻¹ and 0.093~0.876 mg L⁻¹, respectively. Application of phosphorus fertilizer increased the content of dissolved phosphorus in the runoff, whereas it showed little effect on the particulate phosphorus and the total phosphorus. The total phosphorus concentration in different treat-

收稿日期: 2018-04-19 录用日期: 2018-07-23

作者简介: 李盟军(1980—),男,陕西武功人,副研究员,主要从事农业面源污染研究。E-mail: li-mengjun@139.com

*通信作者: 艾绍英 E-mail: shaoyingai@21cn.com

基金项目: 广东省科技计划项目(2014B020206001, 2016B020240009); 广东农业面源污染控制创新团队项目(2016B070701009)

Project supported: Science and Technology Project of Guangdong Province(2014B020206001, 2016B020240009); Agricultural Non-point Source Pollution Control Innovation Team of Guangdong Province(2016B070701009)

ments exceeded grade V (GB 3838—2002) in some runoff events. In particular, it was estimated that 56% of runoff samples in the OPT+NPK treatment exceeded the grade V standard, which was higher than that in other fertilizer treatments although a general exceeding phenomenon were also observed. The runoff load of total phosphorus in vegetable field was 4.37~4.93 kg·hm⁻². There was no significant difference among different treatments. Unusually, runoff load of total phosphorus in fertilizer treatments were less than that in the control treatment. Runoff concentration of potassium in different treatment was 4.7~83.0 mg L⁻¹. The runoff load of potassium ranged from 176.9 to 331.7 kg·hm⁻², with corresponding runoff coefficients of 4.5%~15.7%. Application of potassium fertilizer increased the runoff load of potassium. The highest and the lowest runoff load of potassium was recorded in the treatment of OPT+NPK and OPT+N, respectively. It is worthy noted that the highest N/K₂O ration in OPT+N treatment instead of other treatments was found. In summary, no significant variations of phosphorus runoff losses occurred under different nutritional managements. However, a lower potassium runoff load and runoff coefficient were found in the OPT+N treatment. A suitable N/K₂O ration should be adapted in the agricultural production in order to reduce the runoff loss of potassium.

Keywords: perennial vegetable field; Pearl River Delta; phosphorus runoff loss; potassium runoff loss; nutritional managements

随着农业产业结构的调整,蔬菜业已成为珠江三角洲地区种植业的主导产业之一,常年菜地是本地区主要的种植模式,适宜的水、热及气候条件,使蔬菜多茬连作现象十分普遍。由于化肥的长期持续性高投入,其增产效应明显降低,而土壤中养分尤其是磷素的富集现象突出。据报道,我国部分地区菜地土壤速效磷含量已高达300 mg·kg⁻¹。众所周知,磷是引起水体富营养化的主要元素之一。Sim^[2]指出,当土壤速效磷含量达到作物生长的适宜水平时(Olsen-P为25 mg·kg⁻¹,Bray-P为30 mg·kg⁻¹),从保护水质角度来讲已处于过高水平。农田土壤中的磷主要通过径流流失途径进入周边水体^[3]。据报道,太湖水体中来自附近农田流失的磷的污染贡献率占19.2%^[4]。滇池周边高磷土壤是滇池磷污染的重要途径之一^[5]。相比氮和磷,目前国内外针对农田土壤钾流失规律的研究和报道甚少^[6]。珠三角地区的地带性土壤为赤红壤,是我国最为缺钾的土带之一^[7]。近年来,随着平衡施肥、测土配方施肥技术的开展及推广应用,本地区菜地钾素营养状况有所改善。但我国作为钾素资源短缺的国家,大量施用钾肥的同时,钾矿资源也在不断消耗。因此,研究、关注菜地土壤钾素的径流损失情况,对于菜地合理施肥、提高钾肥利用效率具有重要意义。基于珠三角地区常年菜地化肥不合理施用现状,开展不同养分管理措施下菜地磷、钾养分径流流失特征研究,以期为本地区农田面源污染防治提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于广州市白云区钟落潭镇(113°25′38.9″E, 23°23′38.1″N),属亚热带季风气候,年均气

温21.8℃,年均降雨量1694.1 mm,其中80%雨量集中于4—9月^[8]。试验区供试土壤成土母质为河流冲积物形成的赤红壤砂质壤土。土壤基本理化性质:pH 6.36,有机质16.5 g·kg⁻¹,全氮0.92 g·kg⁻¹,全磷0.53 g·kg⁻¹,全钾7.94 g·kg⁻¹,速效磷33.9 mg·kg⁻¹,NO₃-N 0.58 mg·kg⁻¹,NH₄⁺-N 1.01 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设对照(CK,不施肥)、化肥氮空白(N0,不施化学氮肥)、农户习惯施肥(CON)、优化施肥(OPT)、优化施肥增施氮肥(OPT+N)、优化施肥增施磷肥(OPT+P)和优化施肥同时增施氮磷钾(OPT+NPK),共7个处理,每处理3次重复,随机排列。试验中,化肥采用尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%),有机肥采用商品有机肥。小区面积为18.72 m²(5.2 m×3.6 m),每个小区对应一个水泥径流池,用于收集降雨径流液。径流池容积为2.71 m³(长2.55 m,宽1.06 m,高1.0 m),采用塑料波浪瓦覆盖水泥池顶部,防止雨水等进入池内。每个小区排水口处理设有1支内径10 cm的PVC塑料管道,用于连通小区和水泥池。降雨产生径流后,用塑料尺量取径流池水面高度,用于计算径流液体积。然后,将径流水搅匀,采集3 L径流液于洁净塑料桶内,带回实验室放入冰箱4℃冷藏,并于1周内完成样品分析测试。每次采集径流液后,用抽水泵将径流水抽干,并清洗径流池,便于下次径流液的收集。

试验采用甘蓝-茄子-甘蓝的轮作模式,均为育苗移栽种植方式。其中,第一茬甘蓝于2011年10月28日播种,12月14日移栽,2012年4月8日收获。第二茬茄子播种时间为2012年3月31日,5月16日移栽,9月12日收获。第三茬甘蓝于2012年9月23日播种,10月23日移栽,2013年1月22日收获。甘蓝施

基肥1次,追肥3次。有机肥和磷肥做基肥一次施用。基肥尿素20%,氯化钾40%,尿素分三次追肥,分别是25%、30%和25%,钾肥第1次和第2次追肥分别是40%和20%,第一茬甘蓝基肥2011年12月14日,追肥施用时间分别是2012年1月9日、2012年1月21日、2012年2月11日。第三茬甘蓝基肥2012年10月21日,追肥施用时间分别是2012年11月9日、2012年11月23日、2012年12月9日。茄子施基肥1次,追肥5次。有机肥做基肥一次施用,磷肥分两次施用,基肥70%,第3次追肥30%,氮肥第1~5次追肥比例分别是10%、20%、25%、20%和15%,钾肥第1~5次追肥比例分别是10%、20%、25%、20%和15%。基肥施肥时间2012年5月15日,追肥时间分别是2012年5月29日、2012年6月14日、2012年7月9日、2012年7月31日和2012年8月24日。各处理氮、磷、钾养分用量情况如表1所示。甘蓝和茄子的灌水、喷药等均采用常规管理方式。采用流量计和雨量计记录田间灌溉量和降雨量。整个试验期间,降雨量1603 mm,灌溉量116 mm,不同处理小区径流量1101~1094 mm,处理间径流量无明显差异。

1.3 径流液养分含量测定

采用《水和废水监测分析方法》^[9]分析测定径流液总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)和钾浓度。其中,总磷浓度采用过硫酸钾消化-钼锑抗分光光度法测定;可溶性总磷浓度用0.45 μm滤膜过滤后采用过硫酸钾消化-钼锑抗分光光度法测定;颗粒态磷(PP)浓度由总磷含量减去可溶性总磷含量获得。钾浓度采用火焰光度计测定。

养分径流负荷($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=[小区径流养分浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) \times 径流水体积(L)/1000] \times 10 000 m^2 /小区面积(m^2)。养分流失系数=(施肥处理养分流失负荷-不施肥处理养分流失负荷)/养分施用量 \times 100%

1.4 数据处理

使用Excel 2003和SAS 9.0软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 菜地可溶性总磷径流浓度

不同施肥处理下菜地可溶性总磷径流浓度变化如图1所示。从图1可知,18次径流事件中不同处理的径流液可溶性总磷浓度不高于 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。前两次径流发生在第一茬甘蓝生长期,由于甘蓝试验的磷肥均一次性基施,第1次和第2次径流发生在施磷后94 d和102 d,不同处理的地表径流中可溶性总磷浓度较低,在 $0.015\sim 0.071\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。发生在第一茬甘蓝收获后第二茬茄子移栽前的5次径流(第3~7次),其可溶性总磷浓度明显高于第1次和第2次径流。这5次径流样品的可溶性总磷浓度为 $0.03\sim 0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可溶性总磷浓度的增加与此段时间土壤耕翻、菜地无作物覆盖等因素有关。第8~14次径流样品于第二茬茄子生长期采集,这7次径流发生在施磷(基肥或追肥)后6~50 d,其中第9次径流可溶性总磷出现浓度峰值,施肥处理浓度在 $0.144\sim 0.347\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,明显高于对照的 $0.098\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。之后,由于磷肥的追施(总施磷量的30%),第11次径流液可溶性总磷浓度较第10次样品有一定程度增加,浓度范围为 $0.061\sim 0.316\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,施磷处理可溶性总磷浓度明显高于对照。第15次径流发生在茄子收获后、第三茬甘蓝移栽前,由于发生在第三茬甘蓝磷肥施用后2 d,径流液可溶性总磷浓度较之前并未出现明显降低,保持在 $0.082\sim 0.335\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。第三茬甘蓝移栽后的3次径流分别发生在施磷后14、36 d和43 d,施磷处理可溶性总磷浓度在 $0.10\sim 0.288\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于对照的 $0.041\sim 0.094\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总体上,18次径流事件中,施肥处理可溶性

表1 不同处理下肥料养分用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Application rates of chemical fertilizers under different treatments($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	第一茬甘蓝 The first crop cabbage			第二茬茄子 The second crop eggplant			第三茬甘蓝 The third crop cabbage		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N0	58.6	170.7	229.7	135	404	384	112.5	224.9	275.1
CON	396.1	170.7	229.7	540	404	384	449.5	224.9	275.1
OPT	283.6	170.7	229.7	405	404	384	337.5	224.9	275.1
OPT+N	508.6	170.7	229.7	675	404	384	562.5	224.9	275.1
OPT+P	283.6	238.2	229.7	405	514	384	337.5	292.4	275.1
OPT+NPK	508.6	238.2	379.7	675	514	604	562.5	292.4	425.1

总磷浓度高于对照,且OPT+NPK处理的浓度较高。

2.2 菜地颗粒态磷径流浓度

不同处理下菜地径流液中颗粒态磷浓度变化特征(图2)与可溶性总磷存在较大差异。第一茬甘蓝生长期内发生的两次径流事件,第1次径流各处理颗粒磷浓度在0.171~0.623 mg·L⁻¹,随着蔬菜生育期的推进,受降雨量(第1次径流的降雨量为113.1 mm,第2次径流的降雨量为31.8 mm)及蔬菜地上部对地表覆盖作用等因素影响,第2次径流不同处理的颗粒态磷浓度明显降低至0.021~0.097 mg·L⁻¹,对照处理浓度高于部分施肥处理。第3~7次径流事件中,对照处理浓度在0.308~0.508 mg·L⁻¹,其他各施肥处理间颗粒态磷浓度变化无明显规律性,浓度范围为0.08~0.553 mg·L⁻¹,除第5次径流外,其他4次径流事件中对照处理颗粒磷浓度均高于施肥处理。第二茬茄子生长期发生的7次径流事件(第8~14次),颗粒态磷浓度出现明显的升降变化。第8次径流发生在基施磷肥后6 d,但施肥处理的颗粒磷浓度(0.24~0.461

mg·L⁻¹)低于对照(0.547 mg·L⁻¹),分析其原因,与施肥相比,可能颗粒态磷受降雨(55 mm)影响更大。之后,第9次径流中不同处理的颗粒磷均大幅降低,之后第10次径流浓度又有所升高。第11次径流发生在磷肥追施后10 d,与基施磷肥的作用类似,此次磷肥追施后对照处理颗粒磷浓度(0.564 mg·L⁻¹)均高于施肥处理(0.229~0.475 mg·L⁻¹)。第12次径流事件中,颗粒磷浓度又出现明显下降。不同施肥措施下,菜地颗粒磷浓度升降变化与降雨量、蔬菜覆盖度等多种因素有关。发生于第二茬茄子收获后第三茬甘蓝移栽前的第15次径流,各处理颗粒磷浓度在0.258~0.485 mg·L⁻¹。第三茬甘蓝生长期共采集3次径流,与施肥时间间隔最短(14 d)的第16次径流,各处理颗粒磷浓度低于时间间隔较长的第17次(36 d)和18次(43 d),一定程度上说明施磷对地表径流中颗粒磷浓度的影响较小。

2.3 菜地总磷径流浓度

图3中,不同处理下菜地地表径流液总磷浓度变

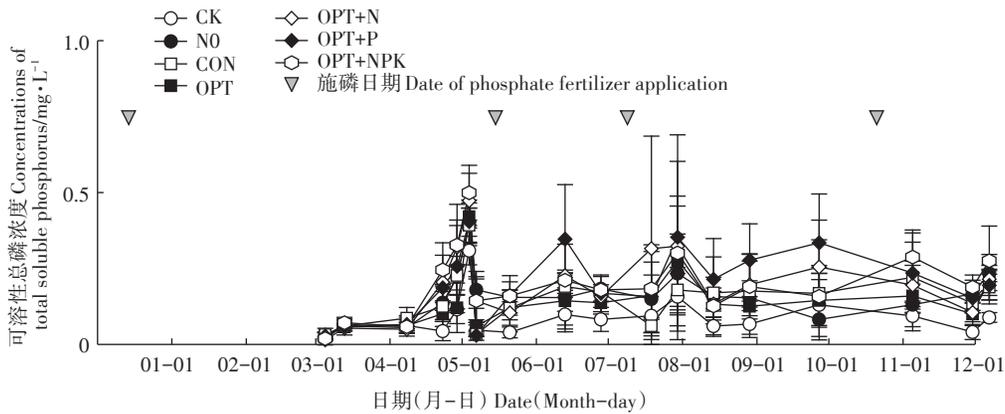


图1 不同施肥处理下菜地径流液可溶性总磷浓度

Figure 1 Concentrations of total soluble phosphorus in runoff from vegetable fields under different fertilizer treatments

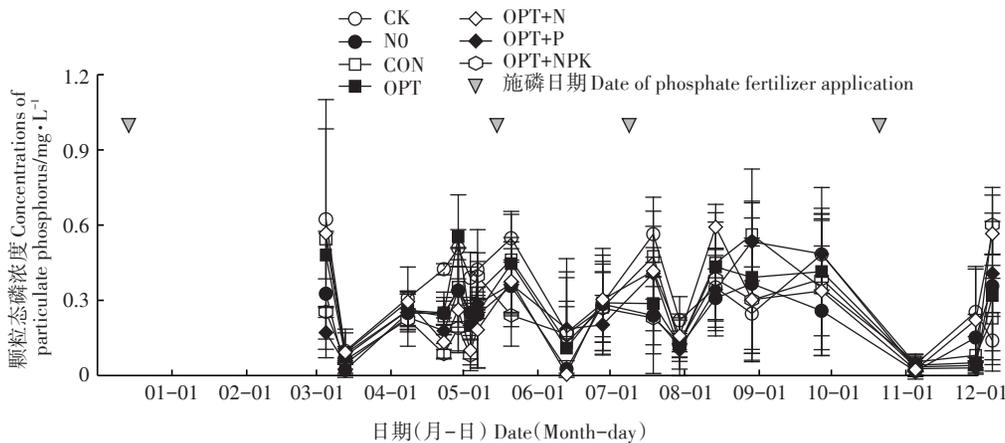


图2 不同施肥处理下菜地径流液颗粒态磷浓度

Figure 2 Concentrations of particulate phosphorus in runoff from vegetable fields under different fertilizer treatments

化与颗粒态磷相似。第一茬甘蓝生长期发生的两次径流事件,对照处理总磷浓度分别为 $0.642 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,部分施肥处理总磷浓度低于对照处理。第一茬甘蓝收获后、第二茬茄子移栽前发生的5次径流事件(第3~7次),施肥处理总磷浓度在 $0.282 \sim 0.674 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,低于对照处理 $0.371 \sim 0.699 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度水平。相比第1、2次径流,这5次径流事件的总磷浓度明显增加,说明地表植物覆盖对于降低总磷径流流失具有积极作用。第二茬茄子生长期产生的7次径流中,施肥处理总磷浓度变幅较大,为 $0.18 \sim 0.811 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照处理总磷浓度为 $0.269 \sim 0.658 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与前几次径流事件中总磷浓度变化较为相似,部分施磷处理径流水总磷浓度出现低于对照处理的现象。第二茬茄子收获后、第三茬甘蓝移栽前发生的第15次径流事件中,各处理总磷浓度均高于第14次径流浓度,为 $0.340 \sim 0.820 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第三茬甘蓝生长期共发生3次径流事件,对照处理总磷浓度为 $0.138 \sim 0.294 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,施肥处理总磷浓度变幅较大,为 $0.148 \sim 0.876 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。连续三茬蔬菜共18次径流事件,同一次径流事件中,随磷用量增加,径流液总磷浓度并未出现相应增加现象。径流水总磷浓度对施磷无明显影响。对比地表水环境质量标准中V类水标准($0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),不同处理的总磷径流浓度均存在超标现象,其中,OPT+NPK处理有10次径流事件总磷浓度高于 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标率达56%。其他各处理的超标率在38.9%~44.4%之间。

2.4 菜地钾素径流浓度

第一茬甘蓝生长期发生的两次径流中,钾浓度变化较大(图4),其中,第1次径流施肥处理除OPT+N处理的钾浓度为 $26.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其余 $13.9 \sim 16.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

明显低于对照的 $19.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第2次径流各处理的钾浓度均较相应处理的第1次浓度大幅增加,是第1次浓度的2.4~5.4倍。发生于第一茬甘蓝收获后第二茬茄子移栽前的第3~7次径流,钾浓度基本呈降低趋势,为 $9.4 \sim 31.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但总体上低于第2次径流的钾浓度,随着距最后一次施钾间隔时间增大,径流水中钾浓度逐渐降低,说明径流产生与施钾间隔时间是影响钾流失的因素之一。第二茬茄子生长期所发生的7次径流,距离最近一次施用钾肥的时间间隔为6~25 d,其中多数处理在第9次径流事件中钾浓度出现峰值,之后下降并趋于平缓。不施化学氮肥处理分别在第9次和第11次径流出现两次峰值,浓度为 $60.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $52.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总体上,第二茬茄子生长期前期追施钾肥明显增加径流水钾浓度,后期追施钾肥对钾径流流失的影响较小。发生在第二茬茄子收获后第三茬甘蓝移栽前的第15次径流,除习惯施肥处理的钾浓度($42.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和OPT+NPK浓度($41.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)相对较高外,其他各处理之间浓度变幅较小,为 $18.8 \sim 27.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与第14次径流相比,多数处理的钾浓度出现增加现象。第三茬甘蓝生长期,3次径流(第16~18次)的钾浓度基本呈降低趋势,由第16次的 $10.4 \sim 60.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至第18次的 $5.8 \sim 36.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照处理的钾浓度均低于施肥处理,且施肥处理中OPT+NPK处理的钾浓度最高。

2.5 菜地养分流失负荷及流失系数

表2为全年共18次径流样品磷、钾流失负荷的计算分析结果。施肥各处理间磷径流流失负荷及其与对照之间均无明显差异。总体上,施肥对菜地磷径流流失负荷无明显影响。施钾显著增加菜地钾径流流失负荷。除OPT+N处理的钾流失负荷显著低于NO

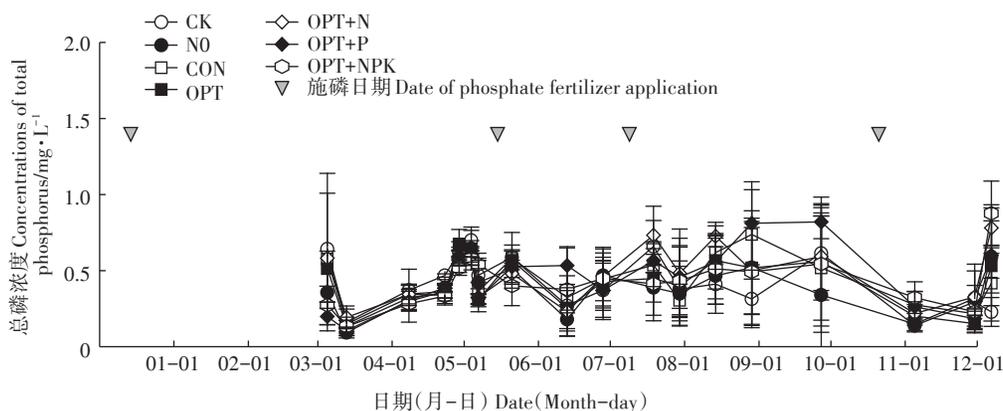


图3 不同施肥处理下菜地径流液总磷浓度

Figure 3 Concentrations of total phosphorus in runoff from vegetable fields under different fertilizer treatments

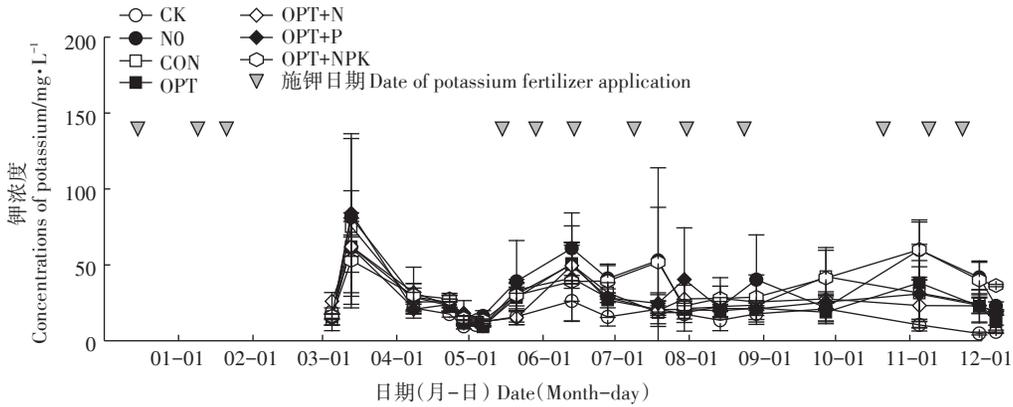


图4 不同施肥处理下菜地径流液钾浓度

Figure 4 Concentrations of potassium in runoff from vegetable fields under different fertilizer treatments

处理外,其他施肥处理与N0处理间均无显著差异。总体上,OPT+NPK处理的钾流失负荷最高。本试验中,对照处理未施用钾肥,而不施化学氮肥处理的钾完全由有机肥提供,其他有机无机处理的钾用量相同,分别来自于有机肥和化肥。

表2中,钾肥的流失系数均为正值,而磷肥流失系数为负值。钾肥流失系数明显较高,且N0处理的钾流失系数最高,OPT及OPT+N处理的钾肥流失系数显著低于其他处理,且OPT+N处理的流失系数最低。

2.6 菜地磷流失形态构成

径流液中不同形态磷组成比例如图5所示。对照处理的可溶性总磷百分率(21.7%)明显低于颗粒态磷(78.3%)。施肥明显降低径流液颗粒态磷百分比的同时,增加可溶性总磷百分比。其中,N0处理的可

溶性总磷百分比为42.6%。颗粒态磷百分比为57.4%,其他处理的可溶性总磷百分比为36.3%~56.9%,颗粒态磷百分比为43.1%~63.7%。

2.7 不同降雨强度对养分流失的影响

以CON处理为例,不同降雨强度对总磷和钾流失量的影响如图6和图7所示。全年108d降雨,小雨、中雨、大雨和暴雨降雨天数分别是53、37、12d和6d,其中,小雨有25d,中雨有6d,未产生径流,大雨和暴雨均产生径流。小雨、中雨、大雨和暴雨累积降雨量分别是226.1、564.7、425.1mm和386.8mm,分别占全年降雨量14.1%、35.3%、26.5%和24.1%。小雨、中雨、大雨和暴雨条件下,每次径流总磷流失量分别是0.003~0.045、0.017~0.338、0.066~0.466kg·hm⁻²和0.055~0.906kg·hm⁻²,全年累积流失量分别是0.33、1.29、1.30kg·hm⁻²和1.78kg·hm⁻²。暴雨和大雨共18d,占总降雨天数的16.7%,占总降雨量50.6%,总磷流

表2 不同施肥处理下菜地养分流失负荷和流失系数
(平均值±标准差, n=3)

Table 2 Runoff loads and coefficients of nutrients in the vegetable field under different fertilizer treatments (Mean±SD, n=3)

处理 Treatments	养分流失负荷 Runoff loads of nutrients/ kg·hm ⁻²		养分流失系数 Runoff coefficients of nutrients/%	
	P	K	P	K
CK	4.93±0.42a	176.9±33.4d	—	—
N0	4.51±0.98a	316.1±71.1ab	-0.05±0.12a	15.7±8.0a
CON	4.69±0.40a	264.0±25.3bc	-0.03±0.05a	9.8±2.8b
OPT	4.42±0.56a	238.7±57.1bc	-0.06±0.07a	6.9±6.4c
OPT+N	4.37±1.02a	217.6±53.9c	-0.07±0.12a	4.5±6.0c
OPT+P	4.87±0.42a	274.2±10.9b	-0.01±0.14a	11.0±1.2b
OPT+NPK	4.50±0.77a	331.7±81.4a	-0.04±0.07a	11.0±5.8b

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05, LSD法)

Note: Different letters in a row indicate significant differences among treatments (P<0.05, LSD)

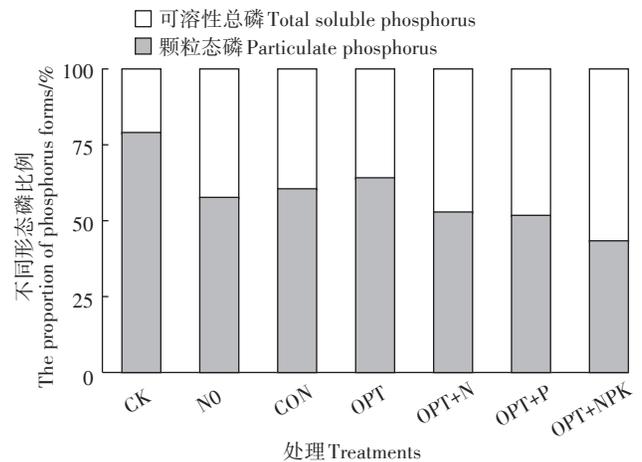


图5 不同施肥处理下菜地径流液磷形态比例

Figure 5 The proportion of phosphorus forms in runoff from vegetable fields under different fertilizer treatments

流失分别占全年37.9%和27.6%。小雨、中雨、大雨和暴雨条件下,每次径流钾流失量分别是0.2~14.5、0.4~24.2、4.3~33.3 kg·hm⁻²和1.4~22.6 kg·hm⁻²,年度累积流失量分别是30.7、101.7、79.1 kg·hm⁻²和52.5 kg·hm⁻²。中雨和大雨条件下,钾流失量分别占全年38.5%和30.0%。不同降雨等级下,总磷和钾流失量特征不同,总磷流失量在暴雨条件下占比最大,钾流失量在中雨条件下占比最大。

3 讨论

磷是引起水体富营养化的限制因子。导致农田土壤磷养分流失的因素包括降雨量、降雨强度、土壤母质、地形地貌、植被覆盖、土壤利用方式和施肥措施等^[10-11]。谢真越等^[12]的研究显示,磷肥用量对菜地径流水总磷和可溶性磷浓度影响较小。本文研究结果与之有所不同,施磷后菜地径流水可溶性总磷浓度均不同程度升高,而磷肥对颗粒态磷和总磷径流浓度的影响较小,其中原因有待进一步深入研究。整个试验

期间,施肥及对照处理不同形态磷浓度总体低于1.0 mg·L⁻¹,这与华元刚等^[13]针对橡胶园土壤磷径流流失特征的研究结果相似。径流水磷浓度水平一定程度上与磷在土壤中的化学行为特征相关。诸多研究证明,施入土壤的磷很快被吸附到土壤颗粒表面或与土壤物质作用形成难溶性的磷酸盐,导致土壤中的磷不易被释放和迁移^[13]。实际生产中,通常将磷肥与氮、钾肥或有机肥进行配施。氮、钾肥与磷肥配施会影响磷的土壤化学行为。杜振宇等^[15]研究表明,氯化铵、氯化钾与磷酸二氢钙配施显著降低肥际微域的土壤pH,增加肥际微域酸溶性磷和有效磷含量,促进磷从磷酸二氢钙向土壤中迁移,增加磷的迁移量。本试验中,不同氮、磷、钾和有机肥配施的养管理措施对菜地径流水总磷和颗粒态磷浓度的影响较小,而OPT+NPK处理的可溶性总磷浓度相对高于其他处理,一定程度上说明适量氮钾肥配施促进了可溶性总磷在土壤中的径流流失。除施肥外,地表植被覆盖和降雨也是影响土壤磷径流流失的重要因素。Gao等^[16]研究表

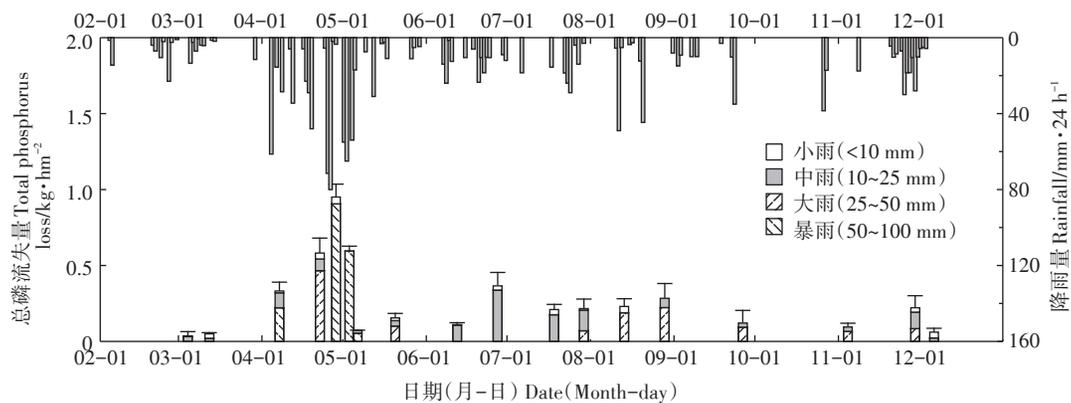


图6 不同降雨强度对农户习惯施肥处理总磷流失量的影响

Figure 6 Effects of different rainfall intensity on total phosphorus losses from conventional fertilization

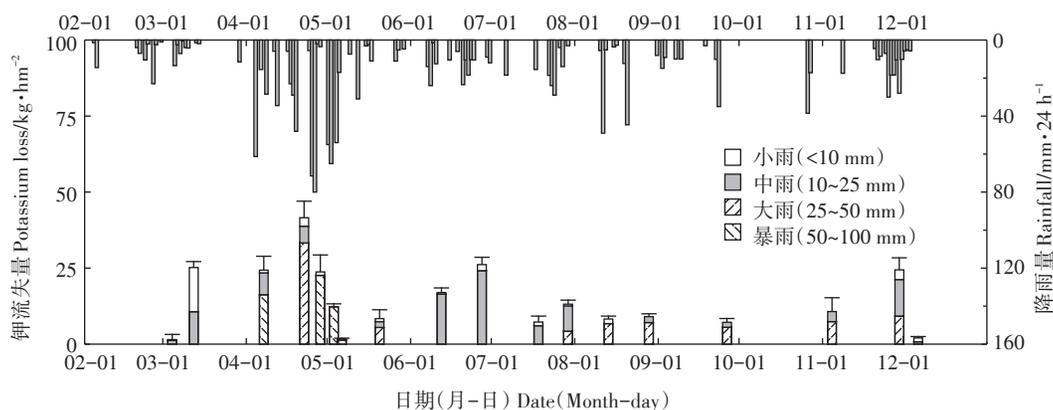


图7 不同降雨强度对农户习惯施肥处理钾流失量的影响

Figure 7 Effects of different rainfall intensity on potassium losses from conventional fertilization

明,随着地表覆盖度增加,土壤磷流失呈降低趋势。McDowell等^[17]也有类似的研究结果。降水与地表土壤的共同作用下,土壤中溶解态磷和颗粒态磷发生迁移和流失,流失量与降雨量和降雨强度均成显著正相关关系^[18]。本试验中,总磷流失量在暴雨时的占比最大。这主要是因总磷的流失以颗粒态磷和泥沙携带的磷素为主^[19-21],而随着降雨强度的增加,雨水对土壤表面的冲击能量增加,相对小雨、中雨和大雨,暴雨对土壤表面的冲击能量更大,径流液中的颗粒态磷含量较高,暴雨产生的径流量大。本试验中,在前茬蔬菜收获后、后茬蔬菜尚未移栽的这一时段发生的径流事件中,不同形态磷浓度均较高,应主要归因于地表无植被覆盖,降雨冲击作用下导致磷的径流流失量增加。

对菜地全年磷流失负荷进行分析显示,不同处理磷流失负荷为4.37~4.93 kg·hm⁻²。段亮等^[22]研究表明,常规管理措施下太湖流域典型旱地磷向水体的迁移负荷为4.05 kg·hm⁻²。张玉树等^[23]针对闽西北烟-稻轮作系统的研究显示,不同养分管理措施下农田总磷流失负荷在0.5~2.5 kg·hm⁻²之间。黄满湘等^[24]估算官厅流域农田磷的径流负荷达2.67 kg·hm⁻²。潘根兴等^[25]根据土壤磷素质量平衡计算得出太湖流域水稻土磷素年流失负荷为2~8 kg·hm⁻²。滇池流域农田磷年流失负荷为0.15~10.14 kg·hm⁻²^[26]。总体上,本研究结果中不同处理的总磷流失负荷在目前已报道的研究结果范围内,但由于不同地区磷肥投入量、降雨量及耕作措施等条件的差异,试验结果存在一定的差异性。通常,施用磷肥会增加土壤磷的径流损失。本试验中,施肥处理磷流失负荷为4.37~4.89 kg·hm⁻²,低于不施肥对照处理的4.93 kg·hm⁻²,导致磷的流失系数均为负值(-0.07%~-0.01%)。径流液中CK处理的颗粒态磷含量占总磷78.3%,除OPT+NPK处理为43.1%外,其他施肥处理占50.5%~63.7%,基本上以颗粒态磷为主。这与陈红日等^[19]研究结果相一致,颗粒态磷为径流磷损失的主要成分,土壤磷素流失以泥沙携带的磷素为主^[20-21],植物覆盖度是影响土壤养分流失的主要因素之一^[11]。雨滴击溅能够很快改变土壤颗粒大小,使吸附在土壤小颗粒和微团聚体上的结合态磷解吸,同时径流的冲刷作用加剧了土壤侵蚀,颗粒态磷随泥沙侵蚀进一步流失,使径流中总磷质量浓度升高^[27]。CK处理不施肥,相比施肥处理,不能有效降低雨滴对土壤表面冲击能量、减少土壤入渗,雨水及形成的径流对土壤冲刷较重,使径流水中泥沙量

增加,使土壤中颗粒态磷含量增加,所以土壤中总磷含量较高。刘方等^[18]研究表明,影响土壤磷流失的首要因子是土壤的有效磷含量,即土壤有效磷含量越高,土壤磷素的流失潜能越大。本试验中,供试土壤有效磷含量为33.9 mg·kg⁻¹,属于二级水平,含量相对丰富。因此,即使不施肥情况下,对照处理土壤也存在较大的磷流失潜能。对于施肥处理下菜地土壤磷流失负荷并未明显增加现象,尚需结合施肥处理下植株对磷的吸收、利用、土壤磷的残留以及淋失等去向进行全面、深入分析后进行合理解释和评价。施用磷肥虽未明显增加菜地磷流失负荷,但对径流水中磷的流失形态的分配比例产生了明显影响。施肥明显降低径流液颗粒态磷百分比,增加可溶性总磷百分比。这与徐泰平等^[28]的研究结果相一致,即施磷量过大或者土壤磷长期累积严重的情况下,可加剧土壤可溶性总磷的迁移流失。

与氮、磷相比,针对农田钾流失的研究相对较少。土壤中钾主要来源于施肥,钾肥施入土壤后迅速溶解并以K⁺形式存在。因此,相比磷素,土壤中的钾更容易迁移和流失。彭浩等^[29]研究显示,氯化钾施入土壤后明显增加钾的径流流失量,且流失量随降雨量增大而增加,但随植被覆盖度增加而降低。本试验中,发生在前茬蔬菜收获后、后茬蔬菜移栽前这一时段的径流事件共计6次(第3~7次和第15次),此时地表无植株覆盖,土壤径流水钾浓度相对高于前次径流浓度。试验中,除OPT+NPK处理的钾用量较高外,其他处理的钾施用量均相同。OPT+NPK处理的钾径流浓度相对高于其他施肥处理。相同钾肥用量条件下,不同施肥处理的钾径流浓度表现出一定的差异变化。以第二茬茄子为例,生长前期施用的3次钾肥占总用量的40%,施钾后径流水钾浓度出现明显增加现象,而后期追施的3次钾肥占总用量的60%,除个别处理外,多数处理的钾浓度呈降低趋势,说明钾肥追施对径流水钾浓度影响无明显规律性。从地表覆盖角度分析,前期茄子处于营养生长期,地表覆盖度相对低于后期,因此,降雨作用下土壤中的钾容易随水迁移、流失。另外,不同生长阶段植株对钾的吸收能力、降雨量和降雨强度等都是影响地表径流钾浓度的重要因素。本试验中,钾流失量在中雨条件下占比最大。总体上,不同施肥处理下钾浓度的消长变化是植株吸收、降雨和施肥等因素综合作用的结果。

由于钾本身具有易迁移的特性,菜地土壤钾径流流失负荷明显高于相应处理的磷流失量,其中,OPT+

N处理的钾流失负荷明显低于其他施肥处理。钾肥流失系数也显著高于磷肥流失系数,且OPT+N处理的流失系数最低。植物对 NO_3^- -N和K的吸收存在协同作用,适宜的N/K比例可有效促进植物对氮、钾元素的吸收利用^[30-32]。从植物对养分吸收的角度来看,OPT+N处理中较为适宜的N/ K_2O 比例促进了植株对钾的吸收利用,从而降低了钾的流失。另外,合理的肥料施用比例对于提高植物地上部的植被覆盖度也有直接作用,一定程度上也有利于降低土壤钾的流失。

4 结论

(1)不同养分管理措施下常年菜地径流水可溶性总磷、颗粒态磷和总磷浓度分别为0.015~0.500、0.004~0.623 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.093~0.876 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,施磷明显增加径流水可溶性总磷浓度,但对总磷和颗粒态磷浓度影响较小。对比地表水V类水标准(0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),不同处理径流水总磷浓度均存在不同程度的超标现象,且施磷量最高的OPT+NPK处理总磷超标率最高。

(2)常年菜地总磷年流失负荷为4.37~4.93 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,不同养分管理措施下总磷流失负荷无明显差异。施肥处理磷流失负荷均低于对照,磷流失系数均为负值。施用磷肥明显增加径流水可溶性总磷比例,降低颗粒态磷比例。

(3)试验期间,菜地径流水钾浓度在4.7~83.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,钾肥追施对径流水钾浓度的影响无明显规律性。施钾显著增加菜地钾的流失负荷,施钾量最高的OPT+NPK处理钾流失负荷最高。适宜的N/ K_2O 比例有利于降低钾流失负荷,N/ K_2O 比值最高的OPT+N处理钾流失负荷最低,钾流失系数最小。

总体上,菜地磷、钾径流流失受施肥量、地表植被覆盖、降雨、植物吸收等多种因素影响,实际生产中采取合理的氮、钾配施比例有利于降低钾的流失。

参考文献:

[1] 郭亚芬,张忠学,许修宏. 菜园土壤氮磷钾硫养分状况的研究[J]. 东北农业大学学报, 1999, 30(3):221-224.
GUO Ya-fen, ZHANG Zhong-xue, XU Xiu-hong. Studies on nitrogen phosphorus potassium and sulphur fertilizer status of vegetable soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1999, 30(3):221-224.

[2] Sims J T. Phosphorous soil testing: Innovations for water quality protection[J]. *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(14):1471-1489.

[3] Covell D L. The role of phosphorus in the eutrophication of reviving water: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27:261-266.

[4] 金相灿,叶春,颜昌宙,等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5):1-5.
JIN Xiang-can, YE Chun, YAN Chang-zhou, et al. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5):1-5.

[5] 贝荣塔,周跃,何敏. 土壤中氮磷和滇池水体污染的潜在关系[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(2):30-34.
BEI Rong-ta, ZHOU Yue, HE Min. Potential relationship between soil nitrogen & phosphorus content and water pollution in Dianchi Lake[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(2):30-34.

[6] 谭家得,薛立,郑卫国,等. 湿地松林的地表径流及钾流失特征[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(4):57-60.
TAN Jia-de, XUE Li, ZHENG Wei-guo, et al. Characteristics of surface runoff and potassium export in a *Pinus elliottii* stand[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2009, 30(4):57-60.

[7] 谢建昌,周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. 土壤, 1999(5):155-157.
XIE Jian-chang, ZHOU Jian-min. The advance of soil potassium and potash fertilizer use[J]. *Soils*, 1999(5):155-157.

[8] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京:科学出版社, 1993.
Office of Soil Survey of Guangdong Province. Soil of Guangdong[M]. Beijing: Science Press, 1993.

[9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:243-250, 409-412.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:243-250, 409-412.

[10] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. *Catena*, 2012, 90:53-62.

[11] 王全九,杨婷,刘艳丽,等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):67-82.
WANG Quan-jiu, YANG Ting, LIU Yan-li, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):67-82.

[12] 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 Environment Sciences*, 2013, 22(8):1423-1427.

[13] 华元刚,潘长兵,贝美容,等. 橡胶园砖红壤中磷和钾素径流流失特征研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(9):1540-1547.
HUA Yuan-gang, PAN Chang-bing, BEI Mei-rong, et al. Studies on the phosphorus and potassium loss on rubber plantation soil[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(9):1540-1547.

[14] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展[J]. 土壤学进展, 1990, 18(6):1-5.
LU Ru-kun. Research progress on phosphorus transformation in soils [J]. *Research Progresses of Soil Science*, 1990, 18(6):1-5.

[15] 杜振宇,周健民,王火焰,等. 氮钾肥对磷在红壤肥际微域中迁移

- 转化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):497-502.
- DU Zhen-yu, ZHOU Jian-min, WANG Huo-yan, et al. Phosphorus movement and transformation in fertilizer microsites in red soil as affected by nitrogen and potassium application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3):497-502.
- [16] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: A case study in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85:263-273.
- [17] McDowell R, Sharpley A N. Phosphorus transport in overland flow in response to position of manure application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31:217-227.
- [18] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2):37-40.
- LIU Fang, HUANG Chang-yong, HE Teng-bing, et al. Phosphorus loss by runoff in various dryland from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2):37-40.
- [19] 陈红日, 张玉平, 刘强, 等. 玉米间套作模式对地表氮磷流失的影响与经济效益分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2):117-123.
- CHEN Hong-ri, ZHANG Yu-ping, LIU Qiang, et al. Effects of different intercropping on nitrogen and phosphorus runoff loss from dry land and crop production efficiency[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2018, 44(2):117-123.
- [20] 张晓艳, 李琴书. 不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5):1-8.
- ZHANG Xiao-yan, LI Qin-shu. Effects of land use type on soil erosion and soil nutrients loss in purple soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5):1-8.
- [21] 马悦, 郭年冬, 张瑞芳, 等. 片麻岩坡面花生不同生长期水土及养分流失规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):304-309.
- MA Yue, GUO Nian-dong, ZHANG Rui-fang, et al. Study on soil and nutrient losses on gneiss in different growth periods of peanut[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):304-309.
- [22] 段亮, 常江, 段增强. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):24-28.
- DUAN Liang, CHANG Jiang, DUAN Zeng-qiang. Surface managements and fertilization modes on phosphorus runoff from upland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):24-28.
- [23] 张玉树, 丁洪, 郑祥洲, 等. 闽西北烟-稻轮作系统地表氮、磷流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):969-976.
- ZHANG Yu-shu, DING Hong, ZHENG Xiang-zhou, et al. Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff in tobacco-rice rotation system in northwest of Fujian Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):969-976.
- [24] 黄满湘, 张国梁, 张秀梅, 等. 官厅流域农田地地表径流磷流失初探[J]. 生态环境, 2003, 12(2):139-144.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Guo-liang, ZHANG Xiu-mei, et al. Phosphorus export by surface runoff from agricultural field plots in Guanting watershed[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):139-144.
- [25] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(3):91-95.
- PAN Gen-xing, JIAO Shao-jun, LI Lian-qing, et al. Effect of long-term fertilization practices on mobility of phosphorus in a Huangnitou paddy soil receiving low P input in the Taihu Lake region, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):91-95.
- [26] 程文娟, 史静, 夏运生, 等. 滇池流域农田土壤氮磷流失分析研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5):52-55.
- CHEN Wen-juan, SHI Jing, XIA Yun-sheng, et al. Farmland runoff of nitrogen and phosphorus in Dianchi Watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):52-55.
- [27] 朱昊, 童菊秀, 夏传安, 等. 农田地表径流总磷流失特性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(8):709-714, 736.
- ZHU Hao, TONG Ju-xiu, XIA Chuan-an, et al. Characteristics of total phosphorus loss into surface runoff from farmland[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(8):709-714, 736.
- [28] 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.
- XU Tai-ping, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of balanced fertilization on phosphorus loss by runoff from slope cropland in purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):1055-1059.
- [29] 彭浩, 张兴昌, 邵明安. 黄土区土壤钾素径流流失试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1):70-73.
- PENG Hao, ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an. Study on soil potassium loss in loess area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1):70-73.
- [30] 宁运旺, 曹炳阁, 马洪波, 等. 氮肥用量对滨海滩涂区甘薯干物质积累、氮素效率和钾钠吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8):982-987.
- NING Yun-wang, CAO Bing-ge, MA Hong-bo, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation, nitrogen efficiency, and potassium and sodium uptake of sweet potato (*Ipomoea batatas*) in coastal north Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8):982-987.
- [31] 李伶俐, 房卫平, 马宗斌, 等. 施氮量对杂交棉氮、磷、钾吸收利用和产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):663-667.
- LI Ling-li, FANG Wei-ping, MA Zong-bin, et al. Effects of nitrogen fertilization on uptake and utilization of NPK and yield and quality of hybrid cotton[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):663-667.
- [32] Yu Q G, Ye J, Yang S N, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization[J]. *Rice Science*, 2013, 20(2):139-147.