

设施菜地养分累积现状及氮磷流失特征

杨涛^{1,6}, 陈院华¹, 陈锋^{2,5}, 徐昌旭¹, 庄艳华³, 涂香明⁴, 陈静蕊¹

(1. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 国家农业环境宜春观测实验站, 南昌 330200; 2. 新余市农业科学研究中心, 江西 新余 338000; 3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北省面源污染防治工程技术研究中心, 武汉 430077; 4. 江西省农业生态与资源保护站, 南昌 330046; 5. 江西农业大学, 南昌 330045; 6. 农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 耕地改良与质量提升江西省重点实验室, 南昌 330200)

摘要: [目的] 摸清江西省设施菜地当前土壤养分累积现状及氮磷流失特征, 为准确评估其环境的污染风险及全省设施蔬菜产业的健康发展提供数据支撑。[方法] 采用多点取样的方法对全省 11 个设区市不同种植年限设施菜地 0~100 cm 土层的养分累积量情况进行分析, 并通过原位监测的方法收集设施菜地氮磷流失的特征信息。[结果] 1) 设施菜地土壤酸化严重, 0~20、20~40 cm 土层 pH 分别为 5.44 和 5.56。2) 0~20 cm 土层土壤养分整体属中等肥力水平, 且在种植年限≤10 a 时土壤养分随种植时间的延长而增加, 在 11~20 a 种植年限时(速效磷除外)开始下降。3) 设施菜地地表径流的发生主要受降雨的驱动, 具有高流量、低浓度的特点; 径流量发生最多的时间集中在每年的 2—6 月, 该时段径流量占全年的 75% 以上, 氮磷流失量均占全年的 60% 以上。[结论] 6~10 a 是设施菜地耕层养分累积的时间“拐点”, 种植年限达到 10 a 后, 过量的养分投入并不能扩大土壤的库容, 反而增加速效养分在耕层的累积量, 进而增加环境的污染风险。设施菜地短时间高水量低浓度径流水的产生在当前沟塘调蓄净化功能严重退化的农田生态系统很难就地消纳。因此, 构建设施菜地-单季稻复合农田模式是解决南方红壤区设施菜地面源污染的有效手段。

关键词: 设施菜地; 种植年限; 养分累积; 氮磷流失; 污染风险

中图分类号: X52; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0082-10

Characteristics of Soil Nutrients Accumulation and Nitrogen and Phosphorus Loss of Greenhouse Vegetable Field

YANG Tao^{1,6}, CHEN Yuanhua¹, CHEN Feng^{2,5}, XU Changxu¹,
ZHUANG Yanhua³, TU Xiangming⁴, CHEN Jingrui¹

(1. Soil and Fertilizer and Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Nanchang 330200, China; 2. Xinyu Research Center of Agricultural Sciences, Xinyu, Jiangxi 338000, China; 3. Hubei Provincial Engineering Research Center of Non-Point Source Pollution Control, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 4. Jiangxi Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Nanchang 330046, China; 5. Jiangxi Agriculture University, Nanchang 330045, China; 6. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangxi Province Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Enhancement, Nanchang 330200, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the characteristics of soil nutrient accumulation and nitrogen and

收稿日期: 2024-09-17

修回日期: 2024-10-22

录用日期: 2024-11-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-11-18

资助项目: 江西省科技创新高端人才(青年)项目(jxsq2019201074); 国家自然科学基金项目(U21A2025)

第一作者: 杨涛(1983—), 男, 助理研究员, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: 51477229@qq.com

通信作者: 陈静蕊(1982—), 女, 副研究员, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: chenjr5526@163.com

涂香明(1975—), 男, 高级农艺师, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: 20478825@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

phosphorus loss for the greenhouse vegetable in Jiangxi Province, thereby providing scientific data for the accurate evaluation on pollution risk and promoting the healthy development of vegetable industry in this province. [Methods] Multipoint sampling was used for analysis cumulative amount of nutrients within the 0—100 cm depth soil layer in greenhouse vegetable throughout 11 cities and districts of this province, and in situ monitoring was used to analyze the characteristics of nitrogen and phosphorus loss. [Results] 1) The soil was severely acidified. The soil layers within 0—20 and 20—40 cm under surface showed pH values of 5.44 and 5.56, respectively. 2) The soil nutrient content in 0—20 cm soil layer was at the medium fertility level, and the soil nutrient increased with the extension of planting time when the planting years were less than 10 years, and began to decline when the planting years were 11—20 years (except for available phosphorus). 3) The runoff from greenhouse vegetable is mainly driven by rainfall and has the characteristics of high volume and low concentration; runoff occurs in the period from February to June accounts for more than 75% of the annual runoff amount and more than 60% of the annual nitrogen and phosphorus loss. [Conclusion] The 6—10 years might be a “turning point” for the cumulative contents of nutrients in greenhouse vegetable plots. Excessive use of nutrients after 6—10 years could not increase the storage capacity of the soil, but it might increase the risk of pollution caused by the accumulation of available nutrients. Due to the degenerated function of regulation, storage and purification of ditches and ponds, the generation of short-term, high-flow and low-concentration runoff water from greenhouse vegetable is difficult to be consumed in farmland ecosystem locally in at present. Therefore, the construction of greenhouse vegetable-single season rice composite farming model may be an effective means to solve the non-point source pollution of from greenhouse vegetable in red soil areas in southern China.

Keywords: greenhouse vegetable soil; cultivating years; nutrients accumulation; nitrogen and phosphorus loss; pollution risk

Received: 2024-09-17

Revised: 2024-10-22

Accepted: 2024-11-02

Online(www.cnki.net): 2024-11-18

随着农业种植结构的深入调整,我国蔬菜的种植面积近20 a来呈逐年递增趋势,从2003年的1 795万 hm^2 增加到2021年的2 199万 hm^2 ,总产量也从54 032万t增加到77 548万 $\text{t}^{[1]}$ 。与露地蔬菜种植相比,设施栽培通过调控大棚内的微环境及小气候,打破季节更替引起的气温变化对蔬菜生长的限制,实现蔬菜的多茬种植和周年供应,受到越来越多种植户的青睐。“十三五”期间,我国设施蔬菜面积基本稳定在410万 $\text{hm}^2^{[2]}$,种植面积占全国蔬菜地面积的20%,产量和效益分别占全国的35%和60% $^{[3-4]}$ 。设施蔬菜短周期和高产高效是以高频高量的水肥投入为代价的。山东寿光设施大棚单季蔬菜生产投入的氮(N)、磷(P_2O_5)养分均在1 000 kg/hm^2 以上 $^{[5]}$;连云港市设施蔬菜地的氮(N)、磷(P_2O_5)养分投入量分别为2 650、2 550 $\text{kg}/\text{hm}^2^{[6]}$;陕西日光温室年平均氮(N)、磷(P_2O_5)养分投入量分别为1 933.3、1 587.2 kg/hm^2 ,氮磷表观盈余量分别为1 503.2、1 473.1 $\text{kg}/\text{hm}^2^{[7]}$ 。连续过量施肥造成氮磷等营养元素在设施菜地土壤中大量累积,部分设施菜地耕层土壤有效磷累积量每公斤高达数百毫克 $^{[8]}$,过量积累的氮磷养分通过地表径流、淋溶等方式进入周边水体,造成地表及地下水体的污染 $^{[9]}$,已成为影响蔬菜产业持续发展和区域生

态环境保护的热点问题。

长江流域亚热带多雨区设施蔬菜的种植面积占全国的20%。江西省作为亚热带多雨区的农业大省,设施蔬菜的播种面积也在逐年增加。截至2020年,全省蔬菜播种面积68.6万 hm^2 ,其中设施蔬菜面积约10万 $\text{hm}^2^{[10]}$,到2025年预计将达到14万 hm^2 ,是全国第2个实现全域对接粤港澳大湾区“菜篮子”的省份。设施蔬菜种植面积的不断增加意味着其对环境污染的风险也可能随之增大。受政府政策扶持和技术进步的双重影响,江西省近10 a来新建设的设施大棚和升级改造后的中型拱棚基本都配套滴灌、喷灌或水肥一体化设施设备,大棚蔬菜管理中大水漫灌的现象已较为少见。这种改变意味着由漫灌引起的棚内径流发生的频率将越来越低,但这种改变下设施菜地的氮磷流失将产生怎样的变化尚未有报道。因此,摸清当前江西省设施菜地养分累积现状及多年设施栽培模式下菜地的氮磷流失特征,制定合理的施肥技术体系和管理策略,可能是未来实现江西蔬菜产业高质量发展和农业生态环境保护双赢的关键。

江西省农业生产模式、土壤类型及气候条件与周边的湖南、湖北等南方多省相似,因此,该区域设施菜地土壤养分累积特征及污染风险的识别对南方其他

省份设施蔬菜产业的绿色发展具有重要的借鉴意义。本研究采用多点采样和原位监测相结合的方法,在江西省 11 个区市分别布点,收集连片种植区不同种植年限下设施菜地土壤剖面的养分累积信息,同时开展设施菜地地表径流的原位监测试验,以期对未来江西省设施蔬菜的绿色可持续生产及农业生态环境保护提供数据支持,同时也为南方红壤区其他省份未来设施农业的建设及面源污染防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省属亚热带季风气候区,年平均气温 16.3~25.0℃,年降水量 1 341~1 943 mm。本研究土壤样品的采集和施肥信息的调研涵盖全省 11 个地级市,为保证点位的代表性,点位选择依据为设施蔬菜种植连片且规模 2 hm² 以上区域。为避免当季施肥对土壤养分产生影响,土样采集均集中在 2021 年和 2022 年 6—8 月的休闲期进行。通过与地市农业农村局对接,选择每个县市有代表性的设施蔬菜种植区进行施肥信息的收集和土壤样品的采集。施肥信息的采集采用入户调研的方式,调查对象为土壤样品采集乡镇从事设施蔬菜种植的农户、合作社成员或种植企业园区的技术人员。对调研区域内的设施大棚按照 3~5、6~10、10~20、>20 a 4 种不同种植年限区间分类。土壤的采集深度为 0~100 cm,每 20 cm 为 1 个土层,分层采集。土壤样品剔除杂物后混合均匀,然后等分取样,部分鲜样过 2 mm 筛于 4℃ 保存,剩余土样自然风干后保存,进行土壤理化性质测定。设施菜地的土壤养分分级参照沈汉等^[11]的分类标准。

1.2 试验设计与样品采集

设施菜地地表径流的监测工作在新余市农业科学研究所试验基地(115°E, 28°N)开展,监测时段为 2022—2023 年。土壤类型均为潴育型水稻土,土壤基础肥力为:pH 6.11,有机质质量分数 29.46 g/kg,全氮、全磷、全钾质量分数分别为 1.43、0.33、29.46 g/kg,速效氮和速效磷质量分数分别为 135.0、95.30 mg/kg。设施大棚建于 2008 年,主体为钢架结构,占地面积 0.33 hm²,共包含 11 个蔬菜大棚,棚内灌溉采用滴灌和喷灌相结合的方式。主要蔬菜种植类型为叶菜和瓜果类,单个大棚长×宽×高为 30 m×8 m×3 m,棚间排水沟宽度为 0.7~1.3 m,沟深 0.5 m。棚内灌溉采用控水灌溉模式,监测期棚内无径流产生,本研究收集的径流水均来源于降雨形成的地表径流。通过微调沟渠,将设施大棚区所有径流水汇至同一排水口外排,排水口安装下沉式地表径流监测设备监测径流量。地表产流后,1 h 采集径流样品 1 次,每次同时采

集 3 瓶,−20℃ 冷冻后低温运至实验室备测。

1.3 样品测定

土壤样品中,pH(2.5:1)采用酸度计电位法,有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法测定,全氮(TN)和全磷(TP)分别采用半微量凯氏法和钼锑抗比色法测定,碱解氮(AN)和有效磷(Olsen-P)(AP)分别采用碱解扩散法测定和钼锑抗比色法测定。水样中 TN 和 TP 分别采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定和碱性过硫酸钾消煮-钼蓝比色法测定。

1.4 数据处理与分析

TN 和 TP 流失量:监测周期中每次径流水中 TN (TP)浓度与径流水体积乘积之和。计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i / 1\,000$$

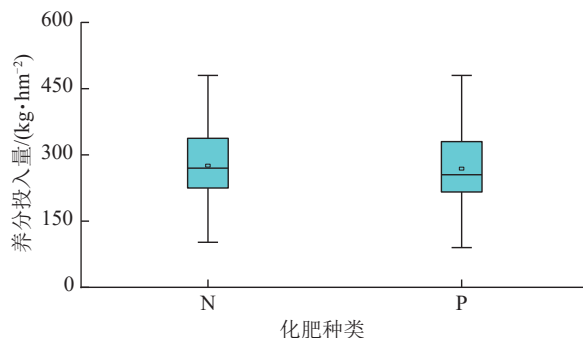
式中: P 为氮(磷)素流失量,kg/hm²; C_i 为第 i 次径流水中氮(磷)的浓度,g/m³; V_i 为第 i 次径流水的体积,m³/hm²; n 为径流水样采集次数。

采用 Microsoft 2013 和 Origin 2021 软件处理数据与作图,利用 SPSS 18.0 软件进行数据差异显著性和相关分析。

2 结果与分析

2.1 设施蔬菜地的养分投入情况

调研结果表明,设施菜地化肥投入以复合肥为主,养分以 N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15 和 18-18-18 居多。少数农户在底肥施用加入钙镁磷肥,一季多茬收获的叶菜及茄果类蔬菜中多选择尿素作为追肥。复合肥的用量因蔬菜类型和施肥习惯的不同差异较大,用量为 15 000~30 000 kg/hm²。折纯后 N、P₂O₅ 施用量分别为 102.0~480.0、102.0~607.5 kg/hm²,平均用量分别为 275.6、286.0 kg/hm²(图 1)。



注:上下须表示最大值和最小值,□表示平均值,箱体的下、中、上三条水平线分别表示下四分位数、中位数和上四分位数。下同。

图 1 化肥氮磷养分投入量

Fig. 1 Chemical nitrogen and phosphorus input

有机肥一般作为基肥一次性投入,种类主要有猪粪、鸡粪、鸭粪、谷壳、饼肥和商品有机肥。小农户

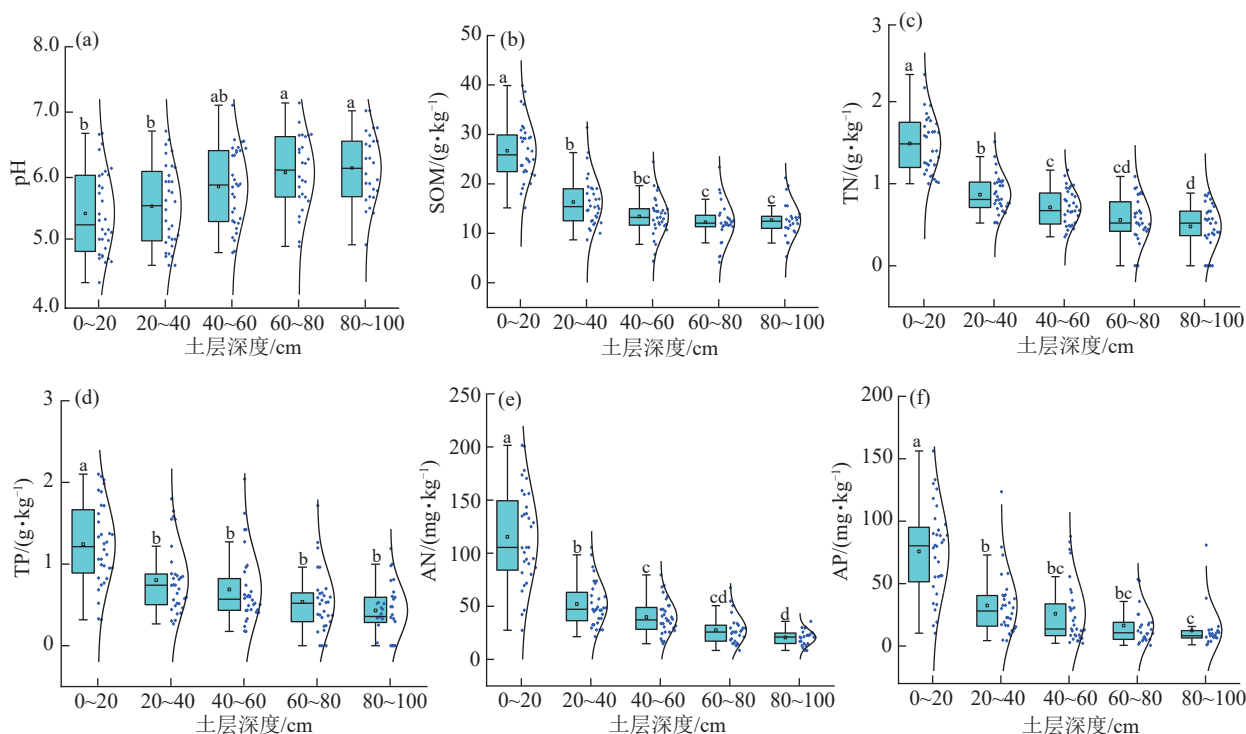
和中小型农业合作社为节约成本,有机肥种类以饼肥和新鲜畜禽粪自主堆沤的有机肥为主,施用量为15 000~30 000 kg/hm²。由公司、大户经营,以省外蔬菜供应为目的设施菜地,有机肥类型主要为品质和货源较为稳定的商品有机肥,用量相同。

2.2 不同土层土壤养分变化

从图2a可以看出,随土层深度的增加,土壤pH呈逐步升高趋势。设施菜地土壤酸化现象在0~40 cm土层更加显著,0~20、20~40 cm土层土壤pH分别为5.44和5.56,二者显著低于60~80、80~100 cm土层的6.07和6.14($p<0.05$)。

0~20 cm土层的SOM平均值为26.7 g/kg,20~40 cm土层则迅速降至16.3 g/kg,40 cm以下各土层SOM均低于15.0 g/kg,且各土层之间差异不显著(图2b)。土壤TN在0~60 cm随土层深度的增加呈梯级

下降趋势,60 cm以下2个土层的TN差异不显著(图2c)。TN质量分数在0~20 cm土层为1.47 g/kg,20~40、40~60 cm土层则分别降至0.87、0.73 g/kg,3个土层之间差异显著($p<0.05$)。TP质量分数在0~20 cm土层为1.32 g/kg,并显著高于其他土层($p<0.05$)。20 cm以下土层TP质量分数均在0.80 g/kg以下,且不同土层之间差异不显著($p>0.05$)(图2d)。土壤AN质量分数随土层的变化趋势与TN一致,随土层深度的增加AN质量分数也呈现梯级降低的趋势,60 cm深度以下2个土层之间AN差异不显著($p>0.05$)(图2e)。AP质量分数随土层的变化与TP相似,但略有差异(图2f)。AP质量分数在0~20 cm土层为75.8 mg/kg,20~40 cm土层迅速降至32.4 mg/kg,40 cm以下各土层之间AP无显著差异,但80~100 cm土层AP质量分数显著低于20~40 cm土层。



注:图柱上方不同字母表示不同土层之间差异显著($p<0.05$)。

图2 不同土层土壤pH及养分累积情况

Fig. 2 Soil pH and nutrient accumulation of different soil depth

2.3 不同种植年限土层养分累积量随土层的变化

不同种植年限土壤pH均随土层深度的增加呈逐步升高趋势,在同一土层深度条件下,pH并未随种植年限的增加而降低(图3a)。0~40 cm 2个土层的pH在3~5 a种植年限下均低于其他3个种植年限。0~20 cm土层SOM、TN、TP和AN质量分数在0~10 a内随种植年限的增加而升高(图3b~3e),4个指标在6~10 a内分别较3~5 a增加10.6%、8.9%、51.0%和13.9%,并均在11~20 a内迅速降低。不同土层中AP质量分数均表现为在0~20 a内随种植时间的延长而

逐步升高,超过20 a后又迅速降低(图3f)。

方差分析结果表明,种植年限除对土壤AN的累积影响不显著外,显著或极显著影响土壤其他指标的累积($p<0.05$),而土层深度极显著影响各指标在土壤中的累积($p<0.001$),二者的交互效应显著影响AN在土壤中的累积(表1)。

2.4 设施菜地降雨及地表径流量的月尺度分布

由表2可以看出,2022—2023年,降雨量较大的时段主要集中在每年的2—6月,单月降雨量均超过100 mm。2022年月降雨量超过200 mm的分别为

3 月的 206.6 mm 和 4 月的 288.0 mm,2023 年月降雨量超过 200 mm 的分别为 4 月的 218.3 mm、5 月的 205.5 mm 和 6 月的 249.7 mm。2022 年和 2023 年全年产流次数分别为 22 次和 26 次,其中 2—6 月共计发

生次数分别为 20 次和 22 次,分别占全年的 90.9% 和 84.6%。2022 年和 2023 年产流量较多的时段也主要集中在 2—6 月,该时段的产流量在全年的占比分别为 78.9% 和 85.4%。

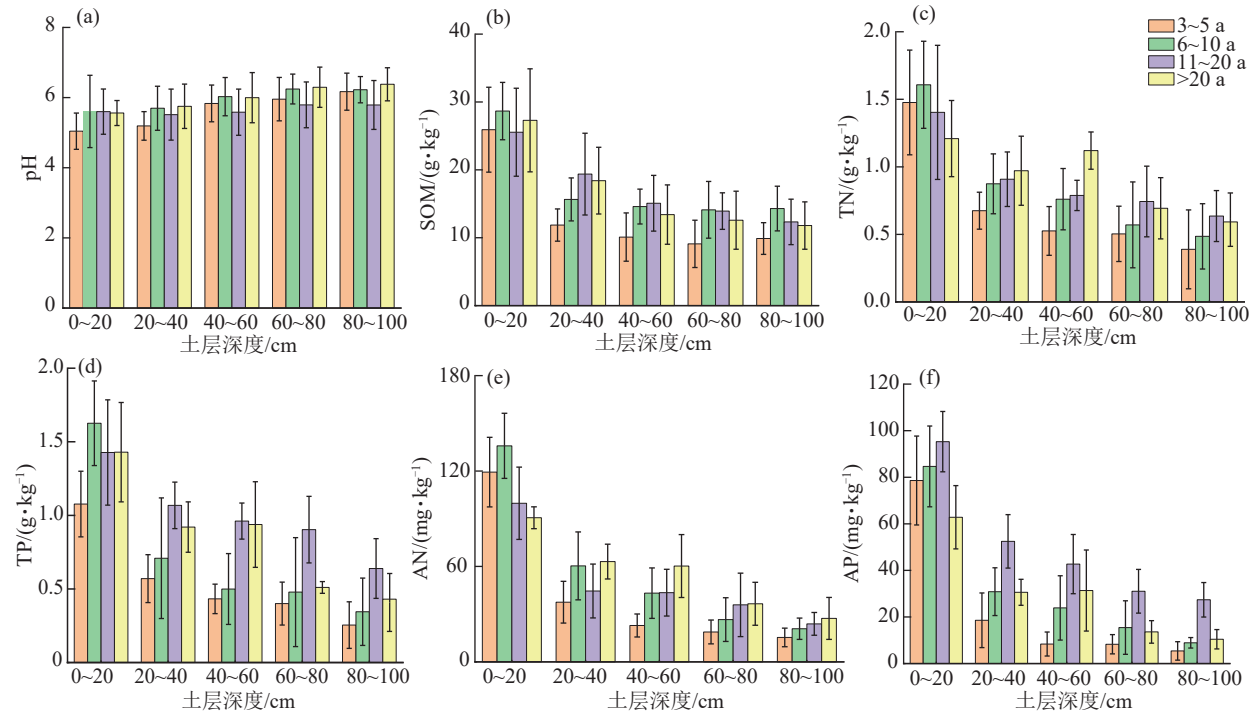


图 3 不同种植年限下各土层养分积累量

Fig. 3 Nutrient accumulation of different soil depth under different cultivating years

表 1 种植年限、土层深度及二者的交互效应对土壤养分累积的影响

Table 1 The impacts of cultivating years, soil depth and their interaction effects on soil nutrient accumulation

影响因素	pH	SOM	TN	TP	AN	AP
种植年限	*	***	*	***	ns	***
土层深度	***	***	***	***	***	***
种植年限×土层深度	ns	ns	ns	ns	*	ns

注:ns 表示不显著;*、**、***分别表示 0.05、0.01、0.001 的显著水平。

表 2 2022—2023 年降雨量、产流次数及产流量的逐月分布

Table 2 Monthly distribution of rainfall, frequency and yield of runoff from 2022 to 2023

月份	2022 年			2023 年		
	降雨量/mm	产流次数/次	产流量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	降雨量/mm	产流次数/次	产流量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	44.3	0	0	37.3	0	0
2	155.2	1	223	150.4	3	348
3	206.6	5	1 292	174.8	6	1 206
4	288.0	5	1 533	218.3	5	697
5	138.6	7	775	205.5	2	993
6	162.5	2	491	249.7	6	1 550
7	71.9	1	527	154.2	2	316
8	0.1	0	0	89.0	1	275
9	0.2	0	0	44.3	0	0
10	7.6	0	0	176.9	1	228
11	160.3	1	624	107.1	0	0
12	35.9	0	0	28.2	0	0
合计	1 271.2	22	5 465	1 635.7	26	5 613

2.5 径流水氮磷质量浓度的月度变化及其流失风险

2022 年,除 1 月、8 月、9 月、10 月和 12 月外,各月都有产流的发生(表 3)。径流 TN 质量浓度月平均值变幅为 1.22~3.04 mg/L,TP 质量浓度的月平均值变

幅为 0.23~0.85 mg/L。2023 年无产流发生的月份为 1 月、8 月、9 月、11 月和 12 月,径流 TN 质量浓度月平均值变幅为 2.08~4.50 mg/L,TP 质量浓度的月平均值变幅为 0.05~0.76 mg/L。

表 3 2022—2023 年不同月份径流水氮磷质量浓度的变化

月份	2022 年		2023 年	
	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
1	-	-	-	-
2	1.49±0.14	0.37±0.02	2.54±1.09	0.31±0.25
3	3.04±1.12	0.23±0.10	2.26±1.53	0.11±0.07
4	1.95±0.89	0.35±0.16	2.71±0.83	0.08±0.05
5	1.22±0.73	0.29±0.21	2.17±0.84	0.07±0.04
6	1.73±0.23	0.45±0.05	2.08±1.57	0.53±0.54
7	2.51±0.07	0.85±0.06	3.72±2.81	0.77±0.36
8	-	-	4.50±0.33	1.10±0
9	-	-	-	-
10	-	-	2.39±0.27	0.05±0.03
11	2.33±1.22	0.62±0.29	-	-
12	-	-	-	-

注:-表示无数据。

2022 年和 2023 年度设施菜地氮磷流失量逐月分布见图 4。2022 年和 2023 年 TN 全年流失量分别为 13.20、12.80 kg/hm²,TP 流失量分别为 2.28 kg/hm²、1.73 kg/hm²;2022 年 TN 流失量最大值为 3 月的 5.09 kg/hm²,其次为 4 月的 3.23 kg/hm²,其余时段 TN 的月流失量均<1.50 kg/hm²。2023 年度

TN 流失量最高值为 6 月的 3.46 kg/hm²,其次为 3 月的 2.19 kg/hm²,其余时段 TN 的月流失量均<2.00 kg/hm²。2022 年 TP 流失量最大值为 4 月的 0.53 kg/hm²,其次为 7 月的 0.44 kg/hm²;2023 年 TP 流失量的 2 个最高值分别为 6 月的 0.84 kg/hm²和 8 月的 0.30 kg/hm²。

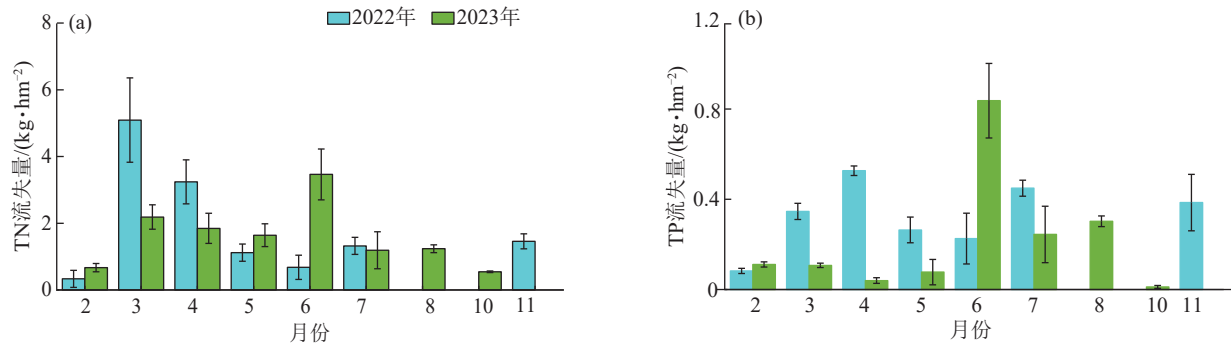


图 4 不同年份设施菜地氮磷流失量的月度分布

Fig. 4 Monthly distribution of nitrogen and phosphorus loss in greenhouse vegetable in different years

为进一步明确降雨与产流量之间的关系,对 2022 年和 2023 年的产流降雨量与产流量之间进行相关分析(图 5),并基于拟合曲线计算出设施菜地发生产流的最小降雨量为 15.0 mm。

3 讨论

3.1 设施菜地土壤 pH 及养分累积现状及影响因素

尽管设施菜地土壤 pH 整体随土层深度的增加而升高(图 2a),但 0~20 cm 土层土壤 pH 属强酸性等级且 0~60 cm 3 个土层的 pH 之间无显著差异

($p<0.05$),表明设施菜地的土壤酸化有向耕层以下延伸的趋势。土壤酸化的主要原因是 Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻等酸根阴离子在土壤中的积累^[12],北方设施菜地酸根离子的迁移主要受灌溉的影响^[13],而南方设施菜地由于地下水埋深较浅,在上半年降雨较多的情况下,耕层以下土壤干湿交替频繁,地下水位的频繁波动加上重力的影响可能较灌溉更易使酸根离子向土壤深层迁移。由图 3a 可以看出,3~5 a 种植年限时 0~20 cm 土层中 pH 最低,与前人^[14]报道的

蔬菜大棚 0~20 cm 土层 pH 随着种植年限的延长呈先下降再增高的趋势不一致。其原因可能是,目前种植年限为 3~5 a 的设施大棚多为灌溉条件较好的稻田改造而来,水稻种植长期少施甚至不施有机肥,导致其在同样成土母质及种植年限下土壤酸化程度较长期使用有机肥的设施菜地更甚,“水改旱”后短期内投入的大量有机物料在更高频度的耕作条件下更易分解矿化而非改善土壤的酸度状况。

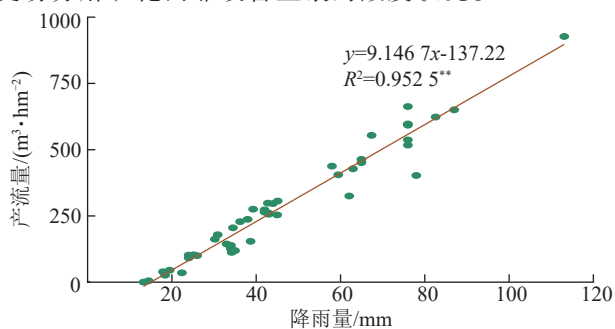


图 5 产流量与产流降雨量回归分析

Fig. 5 Regression analysis of runoff yield and rainfall

全省设施菜地土壤养分的累积主要集中在上部的耕层土壤(图 2b~2f),与前人^[14]研究结果一致。尽管部分点位设施菜地的种植年限较长,但土壤中 SOM、TN、TP 等全量养分整体水平并不高,属于中等肥力水平,仅 AN 及 AP 累积量相对较高。一方面可能受土壤母质(多为红壤发育)的影响,土壤基础肥力较差且对养分的固持能力也较弱;另一方面,全省化肥氮(N)、磷(P_2O_5)年平均投入量仅分别为 275.6、286.0 kg/hm²(图 1),且有机肥的投入水平也不高,再加上大棚内长期高温高湿的环境还可能加速外源添加的高碳氮比有机物料的矿化分解^[15]和氮肥的气态损失^[16]。因此,即便是种植年份较长的设施菜地土壤的 SOM、TN、TP 养分累积量也不高。而受劳动力资源短缺和有机物料投入成本上升的影响,设施菜地化肥氮磷养分投入的占比越来越高,可能是导致当前设施菜地耕层土壤中全量氮磷等养分水平中等而速效养分过量积累的主要原因。

种植年限是影响土壤养分累积的一个重要因素,但土壤养分的累积量并不随种植年限的延长而持续升高(图 3、表 1)。在种植年限<10 a 或略高于 10 a 时,设施菜地耕层养分的累积基本均随种植年限的增加而升高^[17-18]。当种植年限在 10 a 以上,甚至 20 a 以上时,土壤养分则多数在 10 a 最高,随后随种植年限的增加而降低^[19]。本研究中,耕层土壤中 SOM、TN、TP、AN 等养分(除 AP 外)的累积量在 6~10 a 也高于其他年份。因此,10 a 可能是设施蔬菜土壤养分持续累积的年份上限,种植年限超过 10 a

后,因盐渍化、酸化等原因导致土壤养分库容饱和,更多的养分投入不再增加土壤对养分的固持能力,最终土壤养分保持相对稳定或呈下降趋势。

本研究中 0~20 cm 土层中 AP 累积量的最高值出现在 11~20 a 而非 6~10 a,其原因可能与研究区域的土壤类型有关。磷肥施入红壤中 3 h 约有 1/2 以上的 AP 被固定,成为不易被作物利用的形态^[20],而土壤中 AP 除受土壤理化性质、环境因子、种植方式等因素影响外,主要受施磷肥量的影响^[21]。江西省设施菜地的磷肥施用量并不高,AP 累积量达到土壤容纳的极限较其他养分需要更长时间。由于磷肥的利用率在作物当季加上后效一般不超过 25%,而占施肥总量 75%~90% 的磷滞留在土壤中^[22],这也可能是 TP 比 AP 在更短的种植年限内达到累积量极限的原因。

土壤对磷的吸持能力有限,土壤吸持磷的饱和程度随吸磷量的增多逐渐提高,但土壤中磷质量分数存在上限^[23],因此设施菜地土壤中的 TP 及 AP 并不随种植年限的增加而无限升高(图 3d~3f)。当土壤有效磷(Olsen-P)超过某一临界值时,土体排入水中的磷浓度直线增加^[24]。长沙^[25]、杭州^[26]、太湖^[27]等地典型菜园土壤磷素的临界值为 60~80 mg/kg(以 Olsen-P 计)。本研究中,不同年限下 0~20 cm 土壤中 AP 的平均值均在 60 mg/kg,11~20 a 种植年限下甚至接近 100 mg/kg,意味着本区域设施菜地对周边环境具有较高的污染风险。农田土壤磷素流失造成环境污染的主要途径有地表径流和地下淋溶。江西省属亚热带季风气候区,年平均降雨量为 1 600 mm,设施菜地由于地表多覆棚膜,地表径流产生量不容小觑。摸清设施菜地地表径流发生特点及影响因素,进而采取相应的防控措施是未来实现设施蔬菜绿色健康发展的重要举措。

3.2 设施菜地养分流失特征分析

当大棚使用到一定年限时,土壤有机质、全氮等养分趋于相对稳定状态^[19],此后持续过量的养分投入已经无法使土壤持续增容,这些多余的养分便以径流、淋溶等形式进入周边环境造成地表及地下水体污染。

设施菜地氮磷养分的流失主要有 2 条途径:其一是蔬菜种植过程中大水漫灌引起的地表径流的损失;其二是棚内土壤中高浓度的氮磷通过侧渗等途径迁移至棚外的沟渠,在降雨的驱动下引起的地表径流的损失。近 10 a 来,在政府引导支持和市场调控的双重作用下,江西省的设施蔬菜大棚及升级改造后的中小拱棚中多数已配备滴灌/喷灌/水肥一体化

相关的设施设备,由大水漫灌引起的设施菜地的氮磷流失占比较少,而由降雨驱动的地表径流成为本区域设施菜地氮磷流失的主要源头。尽管地表径流的产生量与降雨量呈极显著相关关系($p < 0.01$),但雨量并不是决定地表径流量的唯一因素。在同等降雨量条件下,降雨强度越高,起始产流所需的时间越短,产流量也越大^[28]。降雨除影响径流量外,还影响径流水的水质。相同雨量条件下,径流中的溶解磷随雨强的增大而降低,全磷质量分数与流失量以小雨强时为最大^[29]。

与稻田^[30]、露地蔬菜^[31]和果园^[32]相比,设施菜地径流水中TN和TP的质量浓度(TN浓度的月平均值变幅为1.22~4.50 mg/L,而TP的月平均值变幅为0.05~0.85 mg/L)远低于其他农田生态系统,但其单位面积TN及TP的年流失量与稻田相当^[30]。由此可见,设施菜地地表径流具有高水量、低浓度特点。因此,控制外排水量才是防控设施农业面源污染的关键。当前减少农田径流水外排的措施主要是建立与农田配套的生态沟塘系统,利用生态沟塘自身的存蓄和净化功能来实现小区域内面源污染的防控。沟田协同控制灌排技术较非控排模式可分别减少稻田59.7%和66.7%的TN和TP负荷^[33],生态塘对稻田径流水中TN和TP的去除率均可达到50%以上^[34]。尽管生态沟塘系统对农田地表径流水中TN和TP具有较高的去除率,但其需要定期维护才能保证自身的长期高效运转,而当前农田生态系统中用于调蓄功能的沟塘占比正在不断缩小且连通性差,而重建沟塘系统又挤占良田空间,因此,构建设施菜地-稻田复合农田生态系统可能是解决这一两难困境的有效方案。

当前南方多地设施菜地面积的不断扩张多是由“水改旱”而来^[35],设施菜地与稻田并存是当前较为常见的农田布局。受劳动力不足及农业生产经济效益低下的影响,冬闲—季稻模式呈逐年增加趋势^[1]。2年的监测结果表明,2—6月的产流量在全年的占比均超过75%(表1),TN和TP流失量在全年的占比均超过60%(图4),该时段是设施菜地面源污染防控的关键管控期。一季稻移栽时间一般集中在6月中下旬,收获时间在当年的9月下旬至10月中旬,为稻田在时间和空间上存蓄设施菜地高量径流水提供可能。在稻田休闲期可充分发挥其本身作为湿地生态系统的存蓄净化功能,既可为设施菜地多余的径流水提供存蓄空间,同时这些水肥资源又可在稻季实现再利用。

受田埂高度的影响,稻田存蓄库容有限,如何基

于当地气候条件、农田布局、设施菜地产流特征等因素,筛选适宜的设施菜地-稻田配比,构建复合农田生态系统的面源污染综合防控模式,是南方地区实现设施菜地经济效益及区域生态效益双赢的最佳出路。

4 结论

1) 设施菜地土壤养分并不随种植年限的增加而增加,而是在种植年限为6~10 a达到最大,继而随种植年限的增加而降低或保持相对稳定。

2) 全省设施菜地耕层土壤中全量养分属于中等肥力水平,但速效氮磷养分在耕层土壤中累积量则相对较高。

3) 在当前大水漫灌越来越少的形势下,以降雨驱动的地表径流成为设施菜地氮磷流失的主要来源,该类型的地表径流显现出高流量低养分浓度的新特点。因此,控制径流外排是设施菜地面源污染防控的重要之举。

参考文献:

- [1] 国家统计局:国家数据[EB/OL].(2004-2022)[2024-08-10]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>. National Bureau of Statistics: National data [EB/OL]. (2004-2022) [2024-08-10]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>. National Bureau of Statistics. National data [EB/OL]. (2004-2022) [2024-08-10]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>. National Bureau of Statistics: National data [EB/OL]. (2004-2022) [2024-08-10]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>.
- [2] 张真和,马兆红.我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点:中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J].中国蔬菜,2017(5):1-5.
ZHANG Z H, MA Z H. General situation of protected vegetable industry in China and development focus in the 13th Five-Year Plan: Interview with Zhang Zhenhe, Vice President of China Vegetable Association[J]. China Vegetables, 2017(5):1-5.
- [3] 梁宝忠.我国设施农业年产值达9 800亿元[J].中国食品,2019(18):156.
LIANG B Z. The annual output value of facility agriculture in China reaches 980 billion yuan[J]. Chinese Food, 2019(18):156.
- [4] LIANG L, RIDOUTT B G, LAL R, et al. Nitrogen footprint and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato production in North China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 285-296.
- [5] 石宁,李彦,井永苹,等.长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J].农业环境科学报,

- 2018,37(11):2434-2442.
- SHI N, LI Y, JING Y P, et al. Effect of long-term fertilization on spatio-temporal changes and risk of nitrogen and phosphorus loss in intensive vegetable production system soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018,37(11):2434-2442.
- [6] 王蓉,王礼焦,孙潇潇.连云港市设施蔬菜施肥与土壤养分状况分析[J].*山西农业科学*,2016,44(2):204-208.
- WANG R, WANG J L, SUN X X. Analysis on the fertilization and soil nutrient status of facilities vegetables in Lianyungang City [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016,44(2):204-208.
- [7] 蔡红明,王士超,刘岩,等.陕西日光温室养分平衡及土壤养分累积特征研究[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2016,44(9):83-91.
- CAI H M, WANG S C, LIU Y, et al. Nutrient balance and accumulation in soil of solar greenhouse in Shaanxi [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016,44(9):83-91.
- [8] 王新军,廖文华,刘建玲,等.菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J].2006,21(4):67-70.
- WANG X J, LIAO W H, LIU J L, et al. Phosphorus leaching from vegetable fields and impact factors [J]. 2006,21(4):67-70.
- [9] ZHANG J, LI H, DENG J, et al. Assessing impacts of nitrogen management on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from greenhouse vegetable systems using a biogeochemical model [J]. *Geoderma*, 2021, 382: e114701.
- [10] 江西省统计局.江西省统计年鉴(2021) [EB/OL]. [2024-08-20]. <http://tjj.jiangxi.gov.cn/resource/nj/2021CD/indexch.htm>.
- Jiangxi Provincial Bureau of Statistics. Jiangxi statistical yearbook (2021) [EB/OL]. [2024-08-20]. <http://tjj.jiangxi.gov.cn/resource/nj/2021CD/indexch.htm>.
- [11] 沈汉,邹国元.菜地土壤评价中参评因素的选定与分级指标的划分[J].*土壤通报*,2004,35(5):553-557.
- SHEN H, ZOU G Y. Parameters selection for evaluation of vegetable soil quality and its gradation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004,35(5):553-557.
- [12] 陈碧华,杨和连,李亚灵,等.不同种植年限大棚菜田土壤水溶性盐分的变化特征[J].*水土保持学报*,2012,26(1):241-245.
- CHEN B H, YANG H L, LI Y L, et al. Variation characteristics of soil water-soluble salts of large plastic house vegetable field for different cultivating years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012,26(1):241-245.
- [13] 范凤翠,张立峰,李志宏,等.日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水量指标[J].*农业工程学报*,2010,26(10):83-89.
- FAN F C, ZHANG L F, LI Z H, et al. Tomato irrigation index for soil water leakage control in greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(10):83-89.
- [14] 杨亚红.不同种植年限果蔬温室大棚土壤理化性质的演变规律[D].陕西延安:延安大学,2019.
- YANG Y H. Evolution of physical and chemical properties of soil in greenhouse of fruit and vegetable in different planting years [D]. Yan'an, Shaanxi: Yan'an University, 2019.
- [15] BURAGIENE S, SARAUSKIS E, ROMANECKAS K, et al. Relationship between CO₂ emissions and soil properties of differently tilled soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,662:786-795.
- [16] 任天婧.养分管理对设施菜地含氮气体排放及产量和品质的影响[D].北京:中国农业科学院,2022.
- REN T J. Effect of nutrient management on nitrogen-containing gas emission and yield and quality of greenhouse vegetable [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.
- [17] 王辉,董元华,李德成,等.不同种植年限大棚蔬菜地土壤养分状况研究[J].*土壤*,2005,37(4):460-464.
- WANG H, DONG Y H, LI D C, et al. Nutrient variation in plastic greenhouse soils with the years of cultivation [J]. *Soils*, 2006,37(4):460-464.
- [18] 王学霞,陈延华,王甲辰,等.设施菜地种植年限对土壤理化性质和生物学特征的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2018,24(6):1619-1629.
- WANG X X, CHEN Y H, WANG J C, et al. Effects of vegetable planting ages on the physical and chemical and biological properties of greenhouse soils in Beijing [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018,24(6):1619-1629.
- [19] 任强,孙瑞玲,郑凯旋,等.不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险[J].*环境科学*,2022,43(2):421-429.
- REN Q, SUN R L, ZHENG K X, et al. Soil properties, heavy metal accumulation, and ecological risk in vegetable greenhouses of different planting years [J]. *Environmental Science*, 2022,43(2):421-429.
- [20] 鲁如坤,时正元,钱承梁.磷在土壤中有有效性的衰减[J].*土壤学报*,2000,37(3):323-329.
- LU R K, SHI Z Y, QIAN C L. Decline of phosphorus availability with time in soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000,37(3):323-329.
- [21] 王永壮,陈欣,史奕.农田土壤中磷素有效性及影响因素[J].*应用生态学报*,2013,24(1):260-268.
- WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013,24(1):260-268.

- [22] 王庆仁,李继云.论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J].环境科学进展,1999,7(2):116-123.
WANG Q R, LI J Y. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China [J]. Advances in environmental science, 1999, 7(2): 116-123.
- [23] 刘海,邹冬生,吴金水,等.亚热带稻田土壤有效磷饱和容量及氮磷淋失[J].湖南生态科学学报,2017,4(2):1-8.
LIU H, ZOU D S, WU J S, et al. Efficient P saturation content and N, P Leaching in subtropical paddy field[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2017, 4(2): 1-8.
- [24] Blake L, Hesketh N, Fortune S, et al. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 18: 199-207.
- [25] 秦红灵,全智,刘新亮,等.长沙市郊不同种植年限菜地土壤磷状况及淋失风险分析[J].中国农业科学,2010,43(9):1843-1851.
QIN H L, QUAN Z, LIU X L, et al. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soil of different planting years in suburbs of Changsha[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1843-1851.
- [26] 姜波,林咸永,章永松.杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2008,34(2):207-213.
JIANG B, LIN X Y, ZHANG Y S. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science, 2008, 34(2): 207-213.
- [27] 王彩绒,胡正义,杨林章,等.太湖典型地区蔬菜地土壤淋失风险[J].环境科学学报,2005,25(1):76-80.
WANG C R, HU Z Y, YANG L Z, et al. Risk of phosphate leaching loss from soil of vegetable plot in the typical region of Taihu Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(1): 76-80.
- [28] 张佳琪,王红,张瑞芳,等.雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):42-51.
ZHANG J Q, WANG H, ZHANG R F, et al. Effect of rain intensity on nutrient loss of runoff in sloping gneiss area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 42-51.
- [29] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J].农业工程学报,2007,23(4):39-46.
LI Y Y, SHAO M A, ZHENG J Y, et al. Experimental study on the impacts of rainfall intensity on phosphorus loss from loessial slope land [J]. Transaction of the CSAE, 2007, 23(4): 39-46.
- [30] 缪杰杰,刘运峰,胡宏祥,等.不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2020,3(5):86-93.
MIAO J J, LIU Y F, HU H X, et al. Effects of different fertilization models on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 3(5): 86-93.
- [31] 李进,李佰重,王伟.南方湿润平原区露天菜地氮磷流失特征及其防控[J].湖南农业科学,2024(6):61-65.
LI J, LI B Z, WANG W. Characteristics and control of nitrogen and phosphorus loss in open vegetable fields in moist southern plains [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(6): 61-65.
- [32] 孙辉,黄煜琪,傅煜,等.太湖流域果园种植面源氮磷输出强度及其定量评估方法[J].中国环境监测,2021,37(5):133-139.
SUN H, HUANG Y Q, FU Y, et al. Output intensity and quantitative evaluation method of non-point source nitrogen and phosphorus in orchard in Taihu Lake basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(5): 133-139.
- [33] 朱成立,郭相平,刘敏昊,等.水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J].农业工程学报,2016,32(3):86-91.
ZHU C H, GUO X P, LIU M H, et al. Reduction of nitrogen, phosphorous and runoff by coordination controlled drainage with basin and ditch in paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 86-91.
- [34] 王晓玲,李建生,李松敏,等.生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究[J].水利学报,2017,48(3):291-298.
WANG X L, LI J S, LI S M, et al. Study on the interception effects of ecological pond on nitrogen and phosphorus in the rainfall runoff of rice field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 291-298.
- [35] 李铁球,戴力,夏胜平,等.湖南省稻区种植结构调整研究Ⅲ:水稻改旱作[J].湖南农业科学,2019(7):105-109.
LI T Q, DAI L, XIA S P, et al. Planting structure adjustment in rice growing areas of Hunan Province alternation from paddy field to upland [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019(7): 105-109.