DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.003
王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷累积、损失特征及阻控措施的研究进展. 土壤, 2021, 53(6): 1115–1124.

高投入菜地土壤磷累积、损失特征及阻控措施的研究进展①

王 瑞[1,2], 仲月明[1], 李慧敏[1,2], 施卫明[1], 李奕林[1*]

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: “大肥大水”已经成为我国蔬菜种植体系的生产特征, 这种生产方式导致大量磷流失到环境中, 通过地表径流和地下淋溶导致水体富营养化。目前菜地因其在农田磷污染排放中的占比最高已成为种植业磷损失的优先阻控对象。该研究在明确菜地磷赋存形态特征的基础上, 针对露天及设施菜地磷损失特征包括损失途径及其影响因素, 综述目前一些减少潜在磷污染负荷的源头管理措施、控制磷的迁移过程的生态工程措施以及末端治理, 同时评价其在菜地磷污染阻控中的效果。这些研究进展增强了对菜地磷循环的理解, 摸清高投入生产系统磷链条当中磷下游损失排放特征, 为有效阻控磷肥损失、实现蔬菜产业绿色可持续发展提供理论参考。

关键词: 磷; 菜地; 淋溶; 径流; 阻控措施

中图分类号: X522; S157.2 **文献标志码:** A

Research Progresses on Characteristics of Phosphorus Accumulation and Loss, as well as Loss Control Measures in High Input Vegetable Fields

WANG Rui[1,2], ZHONG Yueming[1], LI Huimin[1,2], SHI Weiming[1], LI Yilin[1*]

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture*, *Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The significant features of the current vegetable production system are massive phosphate fertilizer application and flood irrigation, which causes a large amount of phosphorus (P) into the environment, further, causing water eutrophication through surface runoff and leaching. At present, vegetable fields have become the priority objects of prevention and control of P loss in the planting industry because of the highest proportion of P pollution emissions from vegetable fields. The study was to clarify P morphology features in vegetable fields, distinguish P loss ways and the influencing factors in open and greenhouse vegetable fields, summarize some current source management measures to reduce potential P pollution load, process monitoring measures to P loss by ecological engineering, as well as end of pipe control and evaluate the effects of these measures on preventing and controlling P losses in vegetable fields. These research advances have strengthened the understanding of P cycle in vegetable fields, clarified the characteristics of P loss and emission in the downstream of P chain in high input production systems, and provided theoretical references for effectively preventing P loss and achieving green and sustainable development of the vegetable industry.

Key words: Phosphorus; Vegetable field; Leaching; Runoff; Prevent and control measures

蔬菜种植业在我国发展迅速, 1978 年我国蔬菜播种面积不足 3.33×10^6 hm^2, 人均占有量仅有 170 kg, 到 2015 年蔬菜播种面积达到 2.2×10^7 hm^2, 人均占有量为 600 kg, 我国蔬菜总产量在近 50 年增加了 2 倍[1]。目前我国蔬菜种植体系的生产特征是高量施肥以及大水漫灌, 这种生产方式导致大量肥料残留在土壤当中, 土壤残留养分随灌水径向流失或向下层土壤淋失, 从而导致环境风险加剧。2017 年《第二次全国污染源普查公报》[2]表明农业源污染物排放对水环境的影响较大, 其中种植业总氮和总磷排放量分别为 71.95 万 t 和 7.62 万 t, 分别占我国水污染氮磷排放总量的 23.66% 和 24.16%。笔者研究发现, 在种植业中以菜地氮磷损失最为严重, 以露天菜地为例, 尽管其种植面积远低于粮食作物, 但露天菜地氮磷径流排放量均

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200208)资助。

* 通讯作者(ylli@issas.ac.cn)

作者简介: 王瑞(1993—), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事蔬菜磷素高效利用生理机制及菜地磷面源污染研究。E-mail: rwang@issas.ac.cn

高于粮田，其中蔬菜氮磷排放分别占农田总排放量的 46% 和 66%[3]。以往对菜地环境风险研究多集中于非点源氮污染及重金属污染等，目前菜地磷污染排放及阻控也受到越来越多的关注，菜地已成为农田磷流失的优先控制对象[4]。磷素损失途径主要有地表径流、土壤侵蚀和地下渗漏淋溶 3 种方式。一般情况下持续时间较长的小雨易产生渗漏流失，而短时间暴雨冲击易产生地表径流[5]。土壤侵蚀是随着地表径流而发生的，使土壤中积累的磷素随水流发生迁移[6]。由于土壤胶体吸附磷素的能力有一定限度，当磷素超过饱和吸附点时，由于位点限制土壤无法继续吸附过量磷素，导致降雨和灌溉过程易产生磷素向下淋洗，从而造成淋溶损失[7]。菜地因其高施磷量及有机肥投入比重相对较大等导致土壤磷形态及转化与粮田相比有所不同，这些差异也将进一步影响菜地磷素损失。本文针对目前菜地体系普遍存在的磷高积累、高环境风险问题，综述了高投入菜地土壤磷素累积形态特征、菜地磷素损失途径及磷损失形态，分析菜地土壤磷损失的影响因素，并评价高投入菜地土壤磷素损失阻控措施及其效果，以期为通过阻控菜地磷损失来有效降低农业磷面源污染提供思路及理论支撑。

1 高投入菜地土壤磷素累积形态特征

据统计，我国露天菜地的磷肥投入年均为 P 117 kg/hm^2，设施菜地的磷肥投入年均为 P 571 kg/hm^2 [8]。菜地由于长期高量施肥而导致土壤理化性质发生改变以及大量磷在土壤中富集，而这种高磷环境又将进一步影响磷肥施入土壤后的物理化学行为。因此菜地土壤磷赋存形态以及转化等磷库特征也必然有别于粮田土壤，这些特性一方面直接影响蔬菜当季磷肥吸收利用，另一方面也将直接影响磷迁移导致的损失排放。

土壤中磷素按照形态可分为无机磷和有机磷两大类，菜地土壤耕作层土壤磷素组成中通常以无机磷形态为主[9-10](表 1)。这是由于水溶态磷进入土壤后，很容易发生化学固定或吸附固定，无机磷在土壤中移动性较差，菜地土壤耕作层无机磷积累率通常高于有机磷[11]。黄运湘等[12]研究发现，湖南省长沙市菜地无机磷占全磷比例高达 74.96% ~ 95.86%。当磷肥施入土壤后很快转化为不同化学形态的无机磷酸盐，而不同形态磷酸盐的有效性存在很大差异。Chang 和 Jackson[13]提出了土壤无机磷的分级体系，可以较清楚地区分不同化学性质的土壤无机磷，包括铝磷酸盐(Al-P)、铁磷酸盐(Fe-P)、钙磷酸盐(Ca-P)、闭蓄态磷(O-P)，但此方法只适用于酸性土壤。蒋柏藩和顾益初[14]提出了石灰性土壤无机磷的分级体系，将 Ca-P 按其化学活性分为 Ca_2-P、Ca_8-P 和 Ca_{10}-P，其中 Ca_2-P 有效性最高，是作物磷营养的主要来源[15]。研究表明，我国南方酸性土壤以 Fe-P、Al-P 为主，由于受雨水淋溶作用较强，土壤含磷量低，有效磷含量更低；北方的石灰性土壤呈碱性，形态以 Ca-P 为主，同时雨量少，淋溶作用较弱，土壤磷含量较高[16]。王劲松等[17]在北方菜地土壤中也发现了这种现象，设施菜地无机磷主要以 Ca-P 为主，随着种植年限的增加显著提高了土壤中 Ca_2-P、Ca_8-P 和 Al-P 占无机磷总量的比例；经过 15 a 的种植，Ca_8-P 占无机磷的比例达到 50%，Ca_2-P 占无机磷的比例提高到 8% 左右，之后趋于稳定。

土壤中有机磷占全磷的比例变幅较大，在高有机质土壤中甚至高达 90%[18]。菜地有机肥的投入量极高，尤其是在有机蔬菜种植体系中。据统计南京有机蔬菜种植体系每年粪肥投入大约为 2 000 ~ 20 000 kg/hm^2[19]，这就意味着菜地土壤有机磷含量要比我们想象中高得多。设施菜地有机磷含量约占全磷的 16.5% ~ 29.8%，露天菜地有机磷占比略低于设施菜地，平均为 14.6%(表 1)。这种差异可能是由于设施菜地土壤常处于碳源匮乏状态而影响微生物生理活性，并且随着种植年限增长，设施菜地土壤微生物区系发生紊乱，因而导致有机磷矿化速率较低而积累量高[20]。有机磷以正磷酸酯形式存在于土壤中，分为活性、中度活性、中度稳定、高度稳定 4 个组分[21]。黄运湘等[22]以湖南省 3 种典型的菜园土(第四纪红土发育的红菜园土、河流沉积物发育的冲积菜园土、洞庭湖湖积物发育的潮菜园土)为研究对象，结果表明，3 种母质类型发育的菜园土有机磷组分均以中活性有机磷含量最高，占土壤有机磷总量的 50% ~ 70%，中稳性有机磷和高稳性有机磷分别占有机磷总量的 20% ~ 30% 和 10% ~ 15%，活性有机磷含量最低。杨艳菊等[23]在陕西栗钙土也发现同样的现象，中活性有机磷和中稳性有机磷是栗褐土有机磷的主体，约占有机磷总量的 70%，活性有机磷所占的比例较小。

无机磷和有机磷可以吸附在土壤胶体上形成胶体磷。研究表明，菜地胶体磷含量为 12.3 mg/kg，是茶园和稻田的 1.23 倍和 5.06 倍，占土壤全磷含量的 1.75%[24]。胶体态磷的移动性显著大于颗粒态磷和真溶态磷，是磷素从土壤向河流、湖泊等地表水体运移的重要形式之一[25]。并且有研究表明，在河流水域中，大部分磷素与释放到河流中的土壤胶体有关[26-27]。因此菜地胶体磷的运移在今后磷损失阻控中应受到进一步的关注。

表 1　不同土壤类型菜地无机磷和有机磷含量

Table 1　Contents of inorganic phosphorus (Pi) and organic phosphorus (Po) in vegetable fields of different soil types

种植类型	土壤/母质类型	全磷(g/kg)	无机磷(g/kg)	无机磷/全磷(%)	有机磷(g/kg)	有机磷/全磷(%)	参考文献
露天菜地	灌淤土	0.86	0.73	84.88	0.12	13.96	[9]
露天菜地	灌淤土	0.79	0.67	84.81	0.12	15.19	[9]
设施菜地(5 a)	潮土	1.76	1.42	80.68	0.34	19.32	[10]
设施菜地(10 a)	潮土	2.68	2.15	80.22	0.53	19.78	[10]
设施菜地(14 a)	潮土	3.22	2.69	83.54	0.53	16.46	[10]
设施菜地(2 ~ 3 a)	褐土	1.19	0.86	72.22	0.33	27.78	[17]
设施菜地(5 ~ 6 a)	褐土	1.74	1.22	70.17	0.52	29.83	[17]
设施菜地(14 ~ 16 a)	褐土	2.44	1.81	74.30	0.63	25.70	[17]
菜地	河流沉积物	2.04	1.82	89.22	0.22	10.78	[22]
菜地	湖积物	1.18	1.01	85.59	0.17	14.41	[22]
菜地	第四纪红土	1.28	1.04	81.25	0.25	19.53	[22]

2　高投入菜地土壤磷素损失途径及形态

2.1　高投入菜地土壤磷素损失途径

蔬菜生产体系不同于粮食作物，蔬菜生产又分为设施和露天种植。设施菜地属于封闭式体系，而露天菜地相当于开放式体系，受外界环境的影响更大。明确这两种不同体系的土壤磷损失途径及特征对于有针对性地削减我国菜地磷面源污染至关重要。

淋溶损失主要由于降水和灌溉的作用，使农田土壤表层未被植物吸收的氮磷养分随水分向下层土壤运移，使植物根系难以接触吸收，是土壤养分的主要损失方式之一，也是造成地下水污染的重要原因之一[28-29]。设施菜地磷肥年均施肥量为 P 571 kg/hm^2，是露天菜地的 4.8 倍；过量的磷肥投入导致有效磷的大量累积。0 ~ 20 cm 表层土壤 Olsen-P 平均含量，设施菜地为 P 179 mg/kg，露天菜地为 P 100 mg/kg[8]。土壤磷素的淋溶受土壤磷水平的影响较大，由此可见，设施菜地较露天菜地更易发生磷素淋溶损失。设施菜地在传统“大水大肥”施肥灌溉模式下磷素淋溶风险极大。研究表明，西红柿–甜瓜轮作周年磷素淋失量可达 P 4.91 kg/hm^2[30]。露天菜地作为一个开放式种植体系受外界降雨等环境因素影响较大，更易发生地表径流。胡志平等[31]通过连续监测上海菜园灰潮土径流中侵蚀泥沙的磷流失情况发现，当季径流磷损失量为 P 8.08 kg/hm^2，其中侵蚀泥沙为 P 7.85 kg/hm^2，并且流失的磷素中有 26.9% 来自当季施用的化肥磷。露天菜地耕层土壤中磷素养分也存在一定的淋失风险。广东佛山露天菜地在常规施肥水平下，表层土壤总磷淋溶平均质量浓度为 10 mg/L；随土层深度增加，淋溶浓度呈先上升后下降趋势，20 cm 深度总磷淋溶浓度最高为 12.7 mg/L[32]。虽然目前的研究还难以明确量化地表径流和淋溶导致的磷流失在露天菜地和设施菜地的贡献率，但研究表明，菜地磷的淋溶损失小于径流损失。例如湖南菜地磷素径流流失率在 2.23% ~ 3.24%，而磷素淋失率不超过 0.1%[33]。

2.2　高投入菜地土壤磷素损失形态

一般认为磷素的迁移转化存在于稳定的固相和可移动的水相。目前的研究将磷流失的形态分为颗粒态磷和溶解态磷，以粒径 0.45 μm 作为界限区分这两种形态的磷。杨丽霞等[34]通过研究太湖流域菜地磷素径流流失特征发现，土壤磷素径流的主要形态是颗粒态磷，占总磷含量的 68% ~ 80%。溶解态磷是设施菜地淋溶损失的主要形态，并且随耕层深度呈先升高再下降的趋势，其中以 20 cm 耕层中溶解态磷的淋溶液浓度最高(11.8 mg/L)[35]，远超水体富营养化的磷素临界值(0.05 mg/L)[36]。然而，胶体作为第三相，也是地表径流和土壤溶液中磷迁移的形态之一。但在实际研究中，由于测定方法和条件的限制，对于胶体磷取样和检测方法缺乏统一的标准。陈丁等[37]研究表明，水体中胶体磷(粒径范围在 10 kDa ~ 0.2 μm)能够向活性磷和真溶态磷(小于 10 kDa)转化，和颗粒态磷一样属于潜在生物可利用磷。胶体磷在湖泊营养盐循环中可能起着重要作用。孙小静等[38]首次报道了太湖水体胶体磷(1 kDa ~ 1 μm)含量范围在 0.017 ~ 0.029 mg/L，占总磷 20.8% ~ 44.8%；真溶态磷(≤1 kDa)含量为 0.001 ~ 0.032 mg/L。研究表明，在浙江省稻田土壤中，胶体磷的流失量为 0.003 ~ 0.079 kg/hm^2，占总磷流失量的 7.32% ~ 10.8%，胶体磷的流失量随施磷量的增加而增加[39]。虽然不同研究报道的胶体磷流失量及流失占比之间存在较大差异，但胶体磷是

磷向地表和地下水体迁移过程中不可忽视的一个重要磷组分，菜地作为高磷投入种植体系，研究菜地土壤胶体磷的有效管控对于流域水体富营养化控制至关重要。

3 高投入菜地土壤磷损失影响因素

笔者最新研究发现[3]，菜地氮素径流损失的主控因素是径流量，而磷肥投入量则是磷径流损失的主要影响因素，同时土壤磷库中的 Olsen-P 对其也有较大的影响。菜地土壤磷素损失还因磷源种类、种植模式、种植年限、生长季节、蔬菜种类、土壤类型等不同，存在较大差异。

3.1 磷源种类及用量

许多研究表明，当季施肥量是影响磷流失的重要因素。当季施用化肥的地表径流总磷流失量为 P 5.5～8.1 kg/hm^2，随径流排出菜地的磷素中有 20%～26.9%是当季施用的化肥磷素，且磷的流失量随施肥量增大而增加[40]。但也有研究表明，磷的流失负荷并不会随施肥量的增加而增加。谢真越等[41]在常规施肥的基础上分别减少 20% 和 30%，结果表明，常规施肥、减肥 20% 和减肥 30% 施肥处理在监测期内的总磷累积流失负荷分别为 P 1.7、2.4 和 2.9 kg/hm^2。可能是因为在较短的监测期内，施肥不是影响菜地径流中磷素流失的主要因子，长期施肥才是造成菜地径流中磷素流失加剧的根本原因[42]。

有机肥磷和无机肥磷对菜地磷素流失的影响不同。谢国雄等[43]通过土柱培养试验研究杭州市菜地磷的淋溶发现，淋出液中磷浓度及磷的淋失量随化肥和有机肥用量的增加而增加，但有机肥处理的总磷浓度明显高于化肥处理，可能与有机磷比无机磷难固定且易发生垂直迁移有关。相对于无机肥和复合肥，有机物料释放的有机酸会和正磷酸盐竞争土壤铁、铝化合物的位点，减弱了土壤对磷的吸附[44]。研究表明，动物粪肥中有机磷的含量占全磷的 10%～80%，当其施用于田间时，正磷酸盐和低分子量有机磷(肌醇)更易溶解而发生淋溶损失[45]。但也有研究表明，菜地施用有机肥不会增加菜地磷的损失。孙倩倩等[46]在紫色土上单施化肥以及增施有机肥(泥炭或菜籽粕)后发现，泥炭和菜籽粕处理的菜地土壤 Olsen-P 的含量分别为 P 61.3 和 55.5 mg/kg，均低于菜园土壤磷素淋溶临界值(P 76.2 mg/kg)，在大幅增产的基础上也不会增加磷素环境风险。这是由于土壤磷与有机质中功能团如羟基等发生螯合作用，降低了磷在土壤溶液中的迁移能力[47]。有机肥对菜地磷淋失正面与负面影响的差异可能主要在于有机肥的种类和土壤类型的不同。不同磷肥品种对菜地磷损失的影响也存在很大差异。庄远红等[48]通过土柱淋溶模拟试验研究不同磷肥种类施用对磷素淋失的影响，研究表明，在福建省酸性菜园土中，磷铵和过磷酸钙这两种水溶性磷肥导致菜地磷的淋失量最大，总磷的累积损失量分别为 2.02 mg 和 1.81 mg，且施用钙镁磷肥不仅可以减少磷素淋失，还可以改良土壤 pH，提供蔬菜生长所需的钙、镁营养。

3.2 种植模式

不同种植模式下，磷素流失量差异较大。相对于板栗园和竹园，太湖流域菜地磷的损失量最高，年均流失量为 P 2.79 kg/hm^2，是板栗园和竹园的 4.23 倍和 9.96 倍[49]。这是由于板栗和竹园相对于菜地来说人为扰动少，地表凋落物丰富，表土层的有机质积累较多，有利于雨水下渗同时降低地表径流的流速[50]，因而侵蚀量和径流量都低于菜地，所以磷的流失量也少；另一方面，板栗园和竹园的磷肥年施用量低，分别为菜地磷肥年施用量的 28.5% 和 0.84%[49]，相对于其他种植模式，蔬菜单作的磷损失量最大。朱晓瑞等[51]通过对不同种植模式下菜地土壤磷淋溶监测的研究结果表明，茄子单作下土壤磷淋溶损失量是茄子/白菜间作的 1.7 倍。

3.3 种植年限

大量研究表明，种植年限越长，土壤磷素淋失风险越大。研究表明，长沙市超过 30 a 的菜地(Olsen-P 平均为 P 224.96 mg/kg)和种植年限为 15 a 的菜地(Olsen-P 平均为 P 146.93 mg/kg)均存在高强度磷淋失风险，磷淋失风险系数分别为 3 和 2.93；种植年限为 1～2 a 新垦菜地磷淋失风险系数为 0.06，基本不存在淋失风险[52]。造成这种现象的原因可能是：①随着种植年限的延长，菜地磷含量累加效应明显，磷素淋洗风险随种植年限增加而增强[20]。②随蔬菜种植年限的延长，表层土壤磷最大吸附量和磷最大缓冲容量明显降低，而土壤磷吸附饱和度和解吸率明显提高。如种植年限 15～20 a、25～30 a 菜地土壤磷的解吸率明显高于 3～5 a 土壤[53]。因此，蔬菜种植年限越长，土壤磷素淋失风险越高。

3.4 生长季节

研究表明，在不考虑湿沉降和径流泥沙的情况下，种植季露天菜地磷素流失总量整体呈夏秋季高于冬春季，夏秋季磷素流失量为 P 7.32 kg/hm^2，磷素流失比例高达 1.31%[54]。高超等[49]通过连续 3 a 观测太湖流域菜地土磷径流发现，菜地磷径流损失主要集中

在 6—8 月降雨集中分布的梅雨和台风季节期间，菜地平均地表径流深度为 79.9 mm，占全年的 57.8%；11 月均没有发生径流事件，1 月、2 月和 10 月的径流量也很小。姜佳燕等[55]也发现，不同土壤类型，旱地、林地、水田的磷素流失的季节性变化均表现为地表径流中总磷和溶解态磷浓度：夏季>秋季>春季>冬季，总的来说，夏秋季是土壤磷素流失最高的季节。菜地磷素淋失除了受降雨的影响，还受到施肥等农事活动的影响，若施肥之后立即有降雨发生，也会导致磷的大量流失。设施菜地磷排放污染也是主要集中在 6—9 月的雨季，污染负荷占全年总量的 90%，但设施菜地因有大棚覆盖，阻挡了雨水对土壤的直接冲刷，因此设施菜地的磷流失量低于露天菜地[56]。因此，在降雨较为集中的季节应特别注意减少和避免那些会加剧土壤侵蚀和磷流失的农事活动。

3.5　蔬菜种类

菜地磷损失因种植蔬菜种类不同存在显著差异。研究表明，太湖流域果菜(茄子)磷损失量高于叶菜(青菜)，果菜每季磷径流量 P 3.21 kg/hm^2，是叶菜类的 9.7 倍[57]。汤宏等[58]研究洞庭湖不同蔬菜类型对菜地磷径流的研究发现，茄子地磷的损失显著高于白菜地和甘蓝地，其磷损失量是白菜地和甘蓝地的 3 倍以上。目前设施蔬菜磷肥施用量普遍高于露天蔬菜：我国设施黄瓜肥料磷年均用量(416.9 kg/hm^2)>设施番茄(347.4 kg/hm^2)>设施茄子(281.2 kg/hm^2)>设施辣椒(224.2 kg/hm^2)；露天辣椒、白菜、大白菜和甘蓝磷肥年均用量分别为 P 165.8、140.3、150.1 和 111.4 kg/hm^2[59]。导致这种显著的磷损失差异的主要原因是蔬菜种类间磷肥用量差异很大，磷素携出量也不同导致土壤中磷素盈余量不同，因此磷损失风险存在差异。除此之外，菜地磷损失还与蔬菜的生长季节有关，在我国，瓜果类蔬菜多种植于夏秋季，磷肥施用量高并且雨水较为集中，因此瓜果类蔬菜磷素淋失风险最大[3]。

3.6　土壤类型

目前许多研究发现土壤 Olsen-P 含量与 $CaCl_2$-P 含量线性关系存在一个明显的“突变点”，并以此临界值表征土壤磷素流失潜能的阈值及其流失的潜力[60]。研究表明，不同土壤类型磷素环境阈值存在很大差异，主要是由土壤性质影响磷的吸附解吸能力造成的[61]。钟晓英等[62]对我国 23 个土壤磷素淋失的临界值进行了研究，结果表明，受土壤性质的影响，土壤磷素发生淋失临界值差异很大，临界值 Olsen-P 在 P 30.0 ~ 156.8 mg/kg。不同质地的菜地土壤，环境磷素淋失的阈值不同，与土壤黏粒含量呈正相关。王荣萍等[63]研究了广东省不同质地菜地土壤磷素流失潜能，结果表明，壤质黏土、黏壤土、砂质黏壤土和砂质壤土的磷素损失临界值分别为 79.74、51.08、43.99 和 8.63 mg/kg，即壤质黏土的磷淋失风险最小，砂质壤土的淋失风险最大。在滇池流域大棚种植模式下，渗漏总磷流失浓度的大小顺序为：砂质黏土(3.94 mg/L)>壤质黏土(2.43 mg/L)>黏壤土(1.35 mg/L)>粉砂质壤土(0.39 mg/L)，表明土壤黏粒含量越高，粉粒含量越低，总磷淋溶浓度越高[64]。研究表明，土壤 pH 影响径流液 pH，土壤 pH 越低则土壤中游离态离子含量越高，尤其是阴离子；阴离子不易被土壤吸附，极易受到降雨冲洗而从表层土壤流失，或产生径流或渗漏到地下[65]。PO_4^{3-} 是地表径流中溶解态磷的主要组成部分[66]，因此径流中磷浓度与土壤性质也有较大关系。

4　高投入菜地土壤磷素损失阻控措施及效果

4.1　源头阻控

4.1.1　优化施肥　由上述可知，磷肥的当季施用量对菜地磷径流的影响最大，这就意味着减少磷肥投入可以直接有效地减少菜地磷的损失(图 1)。研究表明，茄子-豆角轮作模式中，在农户常规施磷肥的基础上减施 30% 可以有效地减少淋溶液中总磷质量浓度，较常规处理降低 45.4%，同时保证蔬菜不减产[67]。在华北平原，种植 3 a 以上的设施菜地，较农民常规减施磷肥 60%，可以显著改善磷素盈余，降低土壤磷素深层迁移量，并保证蔬菜产量处于中高产水平[68]。在河北栗钙土中，土豆生育期内，较常规施肥减量 25% 处理对磷素径流损失的削减效果最为明显，与常规施肥相比，可显著降低磷素径流损失量 59.64%[69]。由此可见，蔬菜生产减磷潜力较大。

由于菜地土壤中磷的盈余量大，通过一些措施使蔬菜能够高效地利用土壤残留磷，则可以减少磷肥投入，并减少磷从土壤向水体的转移[70](图 1)。由于大多数残留的磷不能被蔬菜直接吸收利用，因此可以考虑添加土壤磷素活化剂，如微生物肥料(溶磷微生物和磷酸酶)和有机物料(有机肥、生物质炭等)。研究表明，施用溶磷微生物能够将土壤中难溶性磷转化为可溶形态(可被植物吸收利用)，是一种环保、经济的提高蔬菜磷吸收利用的措施[71]。南方菜地田间试验中发现，施用微生物有机肥(鸡粪+铁还原菌微生物)不仅提高了小白菜的产量，而且活化了土壤中的磷，同时降低稳定态磷的含量，提高活性磷和中等活性磷(NaOH 提取态磷)的含量[72]。魏晓兰等[73]以安徽黄褐土种植小白菜，在减少常规施肥用量的 15% ~ 25%

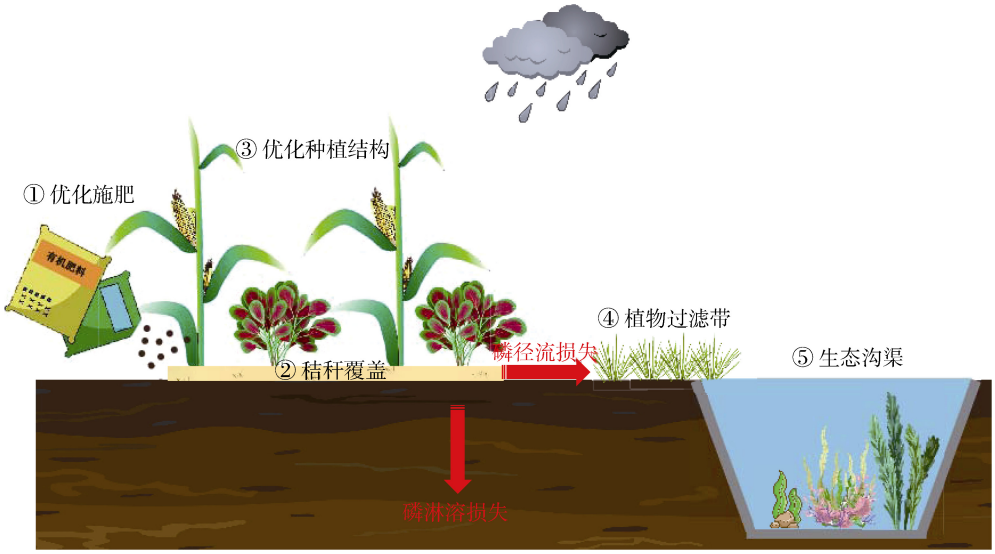

图 1 菜地土壤磷素源头阻控和生态工程阻控措施

Fig. 1 Preventing measures of source control and ecological engineering measures for phosphorus loss in vegetable soil

的条件下，配施生物有机肥(含功能菌≥2 亿个/g，有机质≥60%)，对小白菜的生物量、氮磷钾吸收量均不产生不利影响，可以活化土壤中的氮磷钾，提高肥料利用率，并且可减少农业面源污染和环境污染压力。研究表明，菜地秸秆还田配合优化氮肥处理可以有效地促进土壤磷的转化，同时减少磷淋溶损失[74]。生物质炭可以提高土壤阳离子交换能力，增强土壤保水保肥的能力[75]。在苏州设施菜地中添加竹炭，与对照相比，竹炭处理下蔬菜产量显著增加 21.5%，沟渠水总磷平均浓度显著下降 48.3%[76]。

除此之外，施肥模式也显著影响菜地磷损失量(图 1)。黄东风等[77]采用模拟土柱试验方法，研究不同施肥模式(化肥基施，化肥基施、追施各半，有机无机各半配施，有机肥基施，不施等)对灰黄泥菜园土随渗漏水淋溶损失的影响，有机无机配施的施肥模式磷损失量最小，淋失量为 0.17 kg/hm^2；化肥基追各半的施肥模式明显增加了模拟土柱渗漏水的水溶性磷淋失量，磷损失量为 0.23 kg/hm^2。因此在该地区的蔬菜生产中应采取有机无机配施的模式，避免使用化肥基追各半的模式。

4.1.2 保护性耕作 保护性耕作，如秸秆覆盖等措施，可以明显减缓水土流失，增加雨水入渗作用[78-79]。有研究表明，秸秆覆盖加免耕可以显著地减少径流，与秸秆覆盖单一措施相比，免耕使土壤结构和孔隙都保持良好，因而水分入渗性能好，径流量也相应减少[80](图 1)。青花秸秆覆盖、地膜覆盖、未覆盖对农田径流中总磷流失量的削减与裸地差异显著，与未覆盖及裸地相比，青花秸秆覆盖分别削减总磷损失 35.5% 和 70.8%[81]。

4.1.3 优化种植结构 当前种植业结构中粮食作物比例下降，而蔬菜瓜果类等经济作物的播种面积大幅度增长和复种指数的提高，是导致农业面源污染物排放量增加的重要原因[82]。合理的间套作模式可以有效地减少农田磷径流损失(图 1)。研究表明，在云南省砂质红壤农田中，菜–菜(油毛菜–西葫芦)轮作模式地表径流总磷流失量最高(P 0.54 kg/hm^2)，是玉米‖白菜–豌豆间作和玉米‖青花–马铃薯间作这两种间套作模式的 13.5 倍和 17 倍，其中玉米‖青花–马铃薯间套作模式削减农田地表径流总磷流失的效果最好[83]。湛方栋等[84]对滇池流域蔬菜(豌豆、西葫芦)单作与玉米套作蔬菜两种种植模式下地表径流特征的研究结果表明，豌豆和西葫芦单作种植模式下地表径流总磷流失量分别为 P 0.26 和 0.19 kg/hm^2，与单作种植模式相比，玉米/豌豆和玉米/西葫芦套作种植模式显著减少地表径流总磷的流失，其削减量分别为 46.4% 和 44.4%。合理的种植模式能有效减少地表径流产生和流失，主要原因是：①玉米和蔬菜间作模式保证了在蔬菜收获后仍有玉米地上部分覆盖地表，从而遮挡降雨，削弱雨滴对地面的溅击，起到了减少径流的作用[85]。②合理的间套作能够提高作物对养分的利用率，增强作物根系对土壤的固持作用[86]。

4.2 生态工程

4.2.1 植物过滤带 植物过滤带是控制非点源污染的“最佳管理措施”之一，在欧美等国家得到了较

多的研究和应用[87](图 1)。植被过滤带是位于污染源和水体之间的带状植被区域，可以使地表径流中的污染物通过植物吸收，土壤吸附达到对污染物的降解及转化、固定，从而减少对水体的污染[88]。李伟等[89]以狗牙根作为过滤带拦截植物，1.5 m 的过滤带宽度对菜地排水中总磷的去除效果为 85.9%。植物过滤带(香根草生物篱)可以有效地减少辣椒地的地表径流量，在自然降水情况下香根草生物篱种植小区(总产流量 446.5 t/hm^2)比对照的(总产流量 768.0 t/hm^2)径流量降低了 41.9%[90]。植物过滤带是一项有效减少面源污染的措施，但植物过滤带需要相对较大的空间，水力停留时间短，更适用于面源污染较为严重的地区[91]。

4.2.2 生态沟渠　生态沟渠是通过对自然排水沟渠进行生态改造以及功能强化，如在沟渠内种植水生植物，利用生物、化学以及物理手段对农田排水中的磷污染物进行吸附、降解，从而降低进入下游水体中的磷污染物浓度[92-94](图 1)。种植植物的沟渠比无植物的沟渠对磷的拦截吸收更为显著。单立楠等[95]对比了普通排水沟渠与生态沟渠对菜地磷径流的拦截效果后发现，2012 年强降雨 5 d 内生态沟渠对总磷的累计去除率达到了 80% 以上，为普通排水沟渠同时段累计去除率的 2 倍以上。主要是因为生态沟渠延长了水力停留时间，从而促进农田排水中颗粒态磷及吸附态磷的重力沉降和拦截沉降，同时沟渠内的植物通过吸收水体中溶解态磷，使得生态沟渠对农田排水中的磷污染物得以充分去除[96]。

4.3 末端治理

蔬菜种植模式常采用轮作方式，在菜地休闲期种植填闲作物可吸收土壤残留磷，并降低磷素损失。珠三角地区设施菜地休闲期种植短生育期玉米有效降低设施菜地土壤总磷浓度，阻控效率达到 31.0% ~ 64.7%；同时填闲玉米种植不会过度消耗耕作层中的土壤养分，对下茬芥菜产量无显著影响[97]。研究表明，蔬菜–水稻轮作模式(菜–稻模式)可以充分利用蔬菜和水稻在磷养分吸收强度上的生理差异，有效协调蔬菜持续高产与环境风险控制之间的矛盾[98]。菜–菜–稻轮作淋溶液中总磷平均浓度只有菜–菜连作的 42.6%，菜–菜–稻轮作可以大幅度降低农田土壤渗漏水总磷浓度，起到了减少磷淋失的作用[99]。菜地面源污染的末端治理除了采用填闲作物进行末端土壤磷素消耗等措施外，还包括末端污染水的治理。通过加强菜地灌溉排水的优化管理，并在污水流入河道前采取一些工程措施，如建立暴雨蓄积池或稳定塘，从而最大程度地减少径流污染水流入河道，是控制面源污染的关键措施之一[100]。

5 研究展望

随着种植结构的改变，粮田种植体系已不再是农田磷流失的最大来源，菜地来源的磷流失成为了目前种植业磷流失的优先控制对象。种植年限较长的老菜地，以及瓜果类蔬菜地在夏秋季的施肥管理也将成为降低菜地磷面源污染的主要控制对象。尽管菜地磷环境损失因其局部强度更高、总体损失量更大使其阻控方面研究需求变得更为迫在眉睫，但现实是当前对于农田磷环境损失阻控的研究仍是以粮田磷损失特征及阻控放于优先位置。结合菜地磷累积及损失特征，本文提出今后菜地磷损失阻控研究的几个重点方向：

5.1 合理利用土壤累积态磷

高投入菜地由于长期高量施磷肥导致菜地磷盈余量高，且土壤中残留的磷多以 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 等形态累积在土壤中。因此可以通过挖掘蔬菜高效利用磷资源生物学潜力，如通过育种手段培育蔬菜磷高效利用的品种，从而充分利用土壤累积态磷资源。有研究表明，在畜禽粪便堆肥过程中添加磷素钝化剂，如以化学沉淀为主的化学钝化剂或以物理吸附为主的物理钝化剂，有效降低有机肥中磷素的活性，从而降低有机肥投入带来的累积磷造成的环境风险[101]。因此，在今后的菜地磷素管理过程中，除直接投入添加钝化剂的肥料，可以考虑在蔬菜休闲期添加磷素钝化剂，将磷素固定在土壤中；在蔬菜种植期增施磷素活化剂活化土壤中被固定的磷素，研发磷素管理的新技术，以期达到在现有磷肥减量基础上进一步源头减施的目的。

5.2 在磷损失阻控中应充分考虑菜地磷流失形态特征

以往对农田磷素流失的研究只把关注点放在了颗粒态磷和溶解态磷上，这种分类方法忽略了粒径位于 1 nm ~ 1 μm 之间的胶体磷。胶体作为除固相及液相外的第三相，是向地表和地下水体迁移过程中不可忽视的一个重要磷组分。胶体磷作为一种潜在生物可利用磷在湖泊或海洋水体富营养化研究中受到较多的关注，但对于农田磷排放研究相对较少。尽管随着目前测定技术不断革新，如错流超滤、核磁共振、X 射线吸收近边结构光谱等技术在胶体磷形态及流失机制研究中的应用让我们对其在磷面源污染中的重要性有了更新的认识，但由于胶体磷的结构复杂性(有机、无机胶体以及有机–无机复合物胶体)以及菜地等农田土壤中存在的空间异质性加之目前现有测

试技术的局限性，均给目前胶体磷引起的面源污染防控技术研究带来重重困难。目前首先应该建立统一的取样及检测标准，从而明确不同形态磷，尤其是胶体磷对菜地磷素损失的贡献。同时针对不同损失形态的磷应建立不同的损失阻控措施，从多途径阻控磷素进入水体。

5.3 磷损失阻控技术集成

对于菜地磷阻控措施研究还比较单一，多以减施磷肥的手段达到阻控目的，生态工程等措施在菜地的推广应用相对较少。目前已有研究将一些技术集成用于阻控菜地氮径流损失，通过合理施用肥料、将传统的菜–菜轮作改为菜–豆轮作，同时匹配蔬菜种植区域建立生态沟渠和湿地稻田的组合，蔬菜生产的年度氮径流减少了 73%，技术集成的阻控率高于单一措施(23%～62%)[102]。因此今后将多个技术集成可能是菜地磷污染高效减排的新趋势。

参考文献：

[1] 陈鸿, 陈娟. 我国蔬菜产业现状分析与发展对策[J]. 长江蔬菜, 2018(2): 81–84.

[2] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[R]. 2020.

[3] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 971–979.

[4] 闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1230–1238.

[5] 王涛, 张维理, 张怀志. 滇池流域人工模拟降雨条件下农田施用有机肥对磷素流失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1092–1097.

[6] 王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 183–188.

[7] 张树金, 余海英, 李廷轩, 等. 温室土壤磷素迁移变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1534–1541.

[8] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982–989.

[9] 吕福堂, 张秀省, 董杰, 等. 日光温室土壤磷素积累、淋移和形态组成变化研究[J]. 西北农业学报, 2010, 19(2): 203–206.

[10] 张学军, 孙权, 陈晓群, 等. 不同类型菜田和农田土壤磷素状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(6): 649–654.

[11] 张永兰, 于群英. 长期施肥对潮菜地土壤磷素积累和无机磷组分含量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 243–247.

[12] 黄运湘, 张杨珠, 王翠红, 等. 菜园土肥力特征及蔬菜硝酸盐污染的控制技术 Ⅰ.长沙市郊专业蔬菜基地土壤磷素状况及无机磷形态的分级[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(2): 110–114.

[13] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84(2): 133–144.

[14] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58–66.

[15] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报, 1992, 29(1): 80–86.

[16] 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.

[17] 王劲松, 焦晓燕, 王立革, 等. 温室种植年限对山西石灰性土壤磷含量及无机磷形态的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(3): 203–207.

[18] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 等. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1290–1299.

[19] Wang Y L, Zhang H L, Tang J W, et al. Accelerated phosphorus accumulation and acidification of soils under plastic greenhouse condition in four representative organic vegetable cultivation sites[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 195: 67–73.

[20] 费超, 张士荣, 梁斌, 等. 不同种植年限设施菜地土壤微生物量磷变化特征及相关性分析[J]. 华北农学报, 2018, 33(1): 195–202.

[21] 贺铁, 李世俊. Bowman-Cole 土壤有机磷分组法的探讨[J]. 土壤学报, 1987, 24(2): 152–159.

[22] 黄运湘, 王翠红, 张杨珠. 湖南省几种主要母质类型菜园土壤的磷素状况[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4): 505–508.

[23] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施用不同肥料对栗褐土有机磷组分的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 426–429.

[24] 何霜, 李发永, 刘子闻, 等. 胶体磷在 3 种类型土壤中的迁移阻滞[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019, 45(2): 205–210.

[25] Hens M, Merckx R. Functional characterization of colloidal phosphorus species in the soil solution of sandy soils[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(3): 493–500.

[26] Gottselig N, Bol R, Nischwitz V, et al. Distribution of phosphorus-containing fine colloids and nanoparticles in stream water of a forest catchment[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(7): 1–11.

[27] Gottselig N, Nischwitz V, Meyn T, et al. Phosphorus binding to nanoparticles and colloids in forest stream waters[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(3): vzj2016.07.0064.

[28] Andrews M, Scholefield D, Abberton M T, et al. Use of white clover as an alternative to nitrogen fertiliser for dairy pastures in nitrate vulnerable zones in the UK: Productivity, environmental impact and economic considerations[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 151(1): 11–23.

[29] 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 126–129.
[30] 刘蕾, 王凌, 徐万强, 等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 197–203.
[31] 胡志平, 郑祥民, 黄宗楚, 等. 上海地区不同施肥方式氮磷随地表径流流失研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 310–313.
[32] 韦高玲, 卓慕宁, 廖义善, 等. 不同施肥水平下菜地耕层土壤中氮磷淋溶损失特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1023–1031.
[33] 李高明, 铁柏清, 李杰峰, 等. 湖南典型土壤类型和耕作方式的氮磷损失特征研究[J]. 湖南农业科学, 2009(4): 52–54.
[34] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1763–1769.
[35] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1434–1439.
[36] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 437–451.
[37] 陈丁, 郑爱榕, 刘春兰, 等. 天然胶体中磷的含量及分布[J]. 海洋学报(中文版), 2006, 28(3): 144–150.
[38] 孙小静, 张战平, 朱广伟, 等. 太湖水体中胶体磷含量初探[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 231–237.
[39] 金熠, 梁新强, 刘于, 等. 增施有机肥对稻田田面水磷素形态和径流流失量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 42–47.
[40] 黄宗楚, 郑祥民, 姚春霞. 上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19(1): 6–10.
[41] 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.
[42] 曾招兵, 李盟军, 姚建武, 等. 习惯施肥对菜地氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 34–38,43.
[43] 谢国雄, 胡康赢, 王忠, 等. 不同施肥对蔬菜地氮磷垂直淋移影响的研究[J]. 江西农业学报, 2020, 32(3): 1–7.
[44] Vanden Nest T, Ruysschaert G, Vandecasteele B, et al. The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 216: 23–33.
[45] Li G H, Liu Q, Li H G, et al. Comparison of analytical procedures for measuring phosphorus content of animal manures in China[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2019, 6(4): 431–440.
[46] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2539–2549.
[47] 李学平, 石孝均. 模拟条件下农田磷素渗漏淋失特征研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 32–36.
[48] 庄远红, 吴一群, 李延. 不同种类磷肥施用对蔬菜地磷素淋失的影响研究[J]. 漳州师范学院学报(自然科学版), 2009, 22(1): 97–100.
[49] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(11) : 1543–1549.
[50] Gao C, Zhu J G, Zhu J Y, et al. Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu lake area, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 199–207.
[51] 朱晓瑞, 郑向群, 张春雪, 等. 天津地区不同茄子种植模式对土壤氮磷淋溶损失的影响[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(10): 1160–1165,1169.
[52] 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.
[53] 高秀美, 汪吉东, 张永春, 等. 蔬菜种植年限对土壤磷素吸附解吸特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 706–710.
[54] 王子臣, 邱丹, 堵燕钰, 等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1501–1504.
[55] 姜佳燕, 吴颖琦, 顾国平, 等. 亚热带低丘区氮磷流失浓度和化学形态的季节性变化特点[J]. 现代农业科技, 2020(2): 159–161,165.
[56] 桂萌, 祝万鹏, 余刚, 等. 滇池流域大棚种植区面源污染释放规律[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 1–5.
[57] 王春梅, 蒋治国, 赵言文. 太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 36–40.
[58] 汤宏, 张杨珠, 龙怀玉, 等. 洞庭湖平原菜园土壤养分径流规律及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 111–120.
[59] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480–1493.
[60] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 105–110.
[61] 李学平, 石孝均, 刘萍, 等. 紫色土磷素流失的环境风险评估–土壤磷的“临界值”[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1153–1158.
[62] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估Ⅰ.淋失临界值[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2275–2280.
[63] 王荣萍, 丁效东, 廖新荣, 等. 华南地区蔬菜地不同质地土壤磷素淋失临界值研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(19): 246–250.
[64] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 13–17.
[65] 刘鸿雁, 黄建国, 郭艳娜. 不同植被类型及土壤对径流水化学特征的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 655–660.
[66] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 30–32,36.

[67] 骆晓声, 李艳芬, 寇长林, 等. 减量施肥对河南省典型设施菜田硝态氮和总磷淋溶量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(11): 61–65.
[68] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3944–3952.
[69] 刘蕾, 张国印, 郜静, 等. 减量施肥对崇礼区农业氮磷流失的削减效应[J]. 河北农业科学, 2019, 23(6): 82–87.
[70] Condron L M, Spears B M, Haygarth P M, et al. Role of legacy phosphorus in improving global phosphorus-use efficiency[J]. Environmental Development, 2013, 8: 147–148.
[71] Owen D, Williams A P, Griffith G W, et al. Use of commercial bio-inoculants to increase agricultural production through improved phosphorus acquisition[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 86: 41–54.
[72] 余炜敏, 梁嘉伟, 王荣萍, 等. 不同有机肥对菜地根际土壤磷素形态及蔬菜生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(32): 90–94.
[73] 魏晓兰, 吴彩姣, 孙玮, 等. 减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 40–44.
[74] Fei C, Zhang S R, Wei W L, et al. Straw and optimized nitrogen fertilizer decreases phosphorus leaching risks in a long-term greenhouse soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1199–1207.
[75] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W, et al. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. Field Crops Research, 2011, 121(3): 430–440.
[76] 陈重军, 刘玉学, 冯宇, 等. 添加竹炭对设施菜地土壤氮磷流失和微生物群落结构的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(1): 123–128.
[77] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及模拟土柱氮磷淋失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 68–73.
[78] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 85–88.
[79] 王晓燕, 高焕文, 杜兵, 等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6): 42–47.
[80] 赵君范, 黄高宝, 辛平, 等. 保护性耕作对地表径流及土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 16–19.
[81] 祖艳群, 杨静, 湛方栋, 等. 秸秆覆盖对玉米和青花农田土壤面源污染负荷的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 155–160.
[82] 肖新成, 谢德体, 何丙辉, 等. 基于农业面源污染控制的三峡库区种植业结构优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 219–227.
[83] 傅志兴, 杨静, 湛方栋, 等. 玉米与蔬菜间作削减农田径流污染的分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1269–1275.
[84] 湛方栋, 傅志兴, 杨静, 等. 滇池流域套作玉米对蔬菜农田地表径流污染流失特征的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 847–855.
[85] 刘玉民, 龙伟, 刘亚敏, 等. 不同种植模式下紫色土养分流失影响因子研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 81–84.
[86] 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.
[87] Koelsch R K, Lorimor J C, Mankin K R. Vegetative treatment systems for management of open lot runoff: Review of literature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 141–153.
[88] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074–2080.
[89] 李伟, 王建国, 王岩, 等. 用于防控菜地排水中氮磷污染的缓冲带技术初探[J]. 土壤, 2011, 43(4): 565–569.
[90] 聂军, 廖育林, 谢坚, 等. 自然降雨条件下香根草生物篱对菜地土壤地表径流和氮流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 12–16, 67.
[91] Wu M, Tang X Q, Li Q Y, et al. Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, 224(5): 1–18.
[92] 何军, 崔远来, 吕露, 等. 沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1872–1879.
[93] 彭世彰, 张正良, 罗玉峰, 等. 灌排调控的稻田排水中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21–26.
[94] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1371-1374.
[95] 单立楠, 丁能飞, 王洪才, 等. 蔬菜地面源污染生态拦截系统与效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 168–178.
[96] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 586–590.
[97] 萧洪东, 雷孝, 涂金智, 等. 玉米填闲种植对珠三角菜地土壤氮磷吸收淋失阻控及其对后茬蔬菜生产影响的研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2199–2205.
[98] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 不同磷肥用量对菜稻轮作土壤磷肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 952–955.
[99] 章明清, 李娟, 孔庆波. 土壤磷解吸特性对菜稻轮作田间渗漏水总磷浓度的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 120–127.
[100] 吴建强, 唐浩, 黄沈发, 等. 上海市农业面源污染控制BMPs 框架体系研究——(Ⅱ)工程性 BMPs[J]. 上海环境科学, 2011, 30(3): 120–123.
[101] 郜斌斌, 王选, 王珏, 等. 化学和黏土矿物钝化剂对牛粪秸秆堆肥磷形态转化的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 242–249.
[102] Min J, Shi W M. Nitrogen discharge pathways in vegetable production as non-point sources of pollution and measures to control it[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 123–130.