

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.001

王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷素环境与农学阈值研究进展. 土壤, 2022, 54(1): 1–8.

高投入菜地土壤磷素环境与农学阈值研究进展^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: 维持适宜的土壤有效磷水平对保障蔬菜产量和水体安全具有十分重要的作用。而当前蔬菜种植体系磷肥投入的显著特征是大量、高频次, 导致大量磷素累积在土壤中会增加磷素移动性从而引发高环境风险。一般认为菜地磷的环境阈值高于农田, 但菜地的灌水和磷肥投入均远高于农田, 因此磷流失程度仍高于农田。综合文献调研结果发现, 我国不同地区的菜地土壤 Olsen-P 的环境阈值存在较大差异, 集中在 P 60.0 ~ 80.0 mg/kg。菜地有效磷水平通常高于环境阈值, 而农田有效磷水平普遍低于环境阈值, 表明菜地磷损失风险更大。同时蔬菜磷的农学阈值高于粮食作物的现象普遍, 反映蔬菜对磷的高需求, 而仅通过减少磷肥施用达到降低菜地磷损失风险的目的可能会导致蔬菜减产。因此, 了解磷素在菜地土壤中的累积现状及特征, 在明确蔬菜高产和环境友好的土壤有效磷农学和环境阈值的基础上, 通过优化施磷量将土壤有效磷维持在既能满足蔬菜高产需求又能降低磷流失风险的合理水平, 才能实现菜地磷养分的最佳管理。

关键词: 菜地; 磷素; 环境阈值; 农学阈值; 养分管理

中图分类号: X820.4; S19 **文献标志码:** A

Research Progresses on Environmental and Agriculture Thresholds of Soil Phosphorus in High-input Vegetable Fields

WANG Rui^{1,2}, ZHONG Yueying¹, LI Huimin^{1,2}, SHI Weiming¹, 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: Maintaining an appropriate soil available phosphorus (P) level is vital to ensure vegetable production and water safety. The significant feature of the current vegetable production system's phosphate fertilizer input is massive and frequency, which causes a large amount of P accumulated in the soil, further, increasing the movement of P and causing environmental risks. It is generally believed that soil P environmental threshold of vegetable fields is higher than that of farmland, however, the irrigation and phosphate fertilizer application of vegetable fields were much higher than those of farmland. Therefore, P is still easier to loss from vegetable fields than farmland. Results of literature investigation showed that, environmental thresholds of vegetable fields varied among different regions in our country, mainly within P 60.0 – 80.0 mg/kg. The available P contents in vegetable fields were usually higher than their environmental thresholds, while the available P contents in croplands were usually lower than their environmental thresholds, which meant the vegetable fields had higher environmental risks than croplands. Furthermore, we found that there was a common phenomenon that the agriculture threshold of vegetable P is higher than that of cereal crops, reflecting high P requirement of vegetables. Therefore, only reducing the amount of phosphate fertilizer to mitigate the risk of P loss in vegetable fields might lead to vegetable production decline. Accordingly, on the basis of understanding the current status and characteristics of P accumulation in vegetable fields, and clarifying the agriculture and environmental threshold of soil available P for high vegetable yield and sustainable development of vegetable production, soil available P can be maintained at a level that meet the high-yield demand of vegetable plants and low P loss by optimizing the amount of P, thus achieving the best P management in vegetable fields.

Key words: Vegetable production system; Phosphorus; Environmental threshold; Agriculture threshold; Phosphorus management

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31872957)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

与粮食作物相比,蔬菜具有更高的养分需求量,农民为追求持续高产往往会投入大量肥料,尤其是磷肥。黄绍文等^[1]在对我国蔬菜种植区进行为期 3 年的大规模调研中发现,设施菜地单季肥料磷(化肥+有机肥)平均用量为 317 kg/hm^2 (本文涉及的磷肥用量、土壤磷含量和阈值均以纯 P 计),是设施菜地推荐量的 5.40 倍;而露天菜地单季肥料磷(化肥+有机肥)平均施用量为 142 kg/hm^2 ,达到露天菜地磷肥推荐用量的 5.90 倍。Yan 等^[2]的研究表明,我国露天菜地的磷肥投入(117 kg/hm^2)远远大于作物带走的磷(25.0 kg/hm^2),从而导致磷的大量盈余,年盈余量达 92.0 kg/hm^2 ,占总投入量的 78.6%。因此,无论从单位面积磷养分投入,还是磷投入过量程度来考虑,设施及露天栽培,均属于高投入农业生产模式。菜地磷肥“供远大于求”的高量投入势必导致菜地磷素的大量盈余,且随着种植年限而不断增加;而大量磷肥在土壤中的累积会增加磷素的移动性,从而加剧磷环境污染的风险。《第二次全国污染源普查公报》^[3]结果显示,与第一次全国污染源普查相比,尽管农业源总磷(TP)排放量削减了 25.5%,但其依旧是我国 TP 污染排放的主要源头,占 TP 排放量的 67.2%。南京郊区菜地地下水中 TP 和可溶性磷(DP)的浓度分别为 0.16 和 0.03 mg/L ^[4],远超地表水富营养化的磷素临界值(TP 0.02 mg/L ; DP 0.01 mg/L)^[5]。刘方谊等^[6]对湖北省库区不同类型农田磷损失负荷的研究发现,露天菜地磷流失量高达 5.51 kg/hm^2 ,是稻油轮作土壤的 14.0 倍,占三峡库区农田总流失量的 43.3%。笔者^[7]研究发现,相较于粮田,菜地磷径流单位面积损失量以及周年总排放量均高于农田,菜地单季 TP 径流损失量为 3.45 kg/hm^2 ,周年 TP 径流排放量为 0.33 Tg/a ,分别是旱地作物的 2.75 倍,稻田的 6.60 倍。基于此,明确菜地磷素环境损失风险阈值,从而科学评估高投入体系磷素排放特征及流失风险,对于削减我国磷面源污染至关重要。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时空特征、菜地磷素环境阈值研究方法,探讨了菜地磷素环境阈值特征及其与农田土壤磷素环境阈值的差异,并基于蔬菜的农学效率评估菜地磷的环境风险,以期通过磷养分管理措施维持菜地土壤合理磷素含量,协调菜地高磷投入带来的蔬菜高产和菜地土壤磷流失高风险之间的矛盾,从而保障菜地可持续发展。

1 高投入菜地土壤磷素累积时空特征

1.1 不同种植年限菜地土壤磷素累积特征

由于目前蔬菜当季磷携出量显著低于施磷量,菜地土壤全磷含量显示明显的累加效应,即土壤中全磷含量随种植年限增加而不断增加。费超等^[8]调查山东省寿光市不同种植年限的设施菜地土壤磷素累积状况发现,随着种植年限增加,设施菜地 0 ~ 30 cm 耕层土壤全磷含量不断增加,种植年限 9 年以上土壤全磷平均含量为 2.17 g/kg ,其分别是种植年限 0 ~ 4 年和 4 ~ 9 年土壤的 1.95 倍和 1.37 倍。菜地土壤有效磷含量也随种植时间增加呈现累加趋势。种植 20 年的设施菜地表层土壤(0 ~ 20 cm)有效磷含量达到了 345 mg/kg ,比种植 5 年的设施菜地土壤高 37.0%^[9]。新疆 3 年、10 年和 14 年棚龄的设施菜地表层土壤有效磷含量分别为 32.5、387 和 585 mg/kg ^[10]。在潮褐土上连续进行 11 年 21 茬露地蔬菜的长期定位试验结果表明,随着种植年限的增加,菜地磷积累主要以钙结合态磷(Ca-P)和铁铝结合态磷(Fe-P、Al-P)为主^[11]。

1.2 菜地不同剖面土壤磷素空间累积特征

不同种植类型农田土壤剖面磷素累积量存在差异,菜地作为一种高度集约化利用条件下的种植体系,具有高磷投入和高复种指数的特征,土壤磷的累积量普遍高于粮田;而在菜地土壤中,设施菜地磷素的累积量明显高于露天菜地。王新军等^[12]调查发现,河北藁城日光温室菜地土壤表层有效磷含量在 $124 \sim 400 \text{ mg/kg}$,是周边粮田土壤的 15.5 倍。菜地土壤磷素在土壤剖面中并不是均质存在的,一般随土层深度的增加而大幅下降;但随着种植年限的增加,磷素向下迁移距离不断增加^[2, 13]。胡明芳等^[10]研究新疆大棚菜地的土壤磷素剖面分布特征的结果显示,土壤有效磷在 0 ~ 20 cm 表土层大量积累,在 0 ~ 180 cm 土层中,菜地土壤有效磷含量呈明显的上高下低型垂直分布。刘兆辉等^[14]的研究发现,山东寿光的设施菜地土壤有效磷含量比露天菜地土壤有效磷含量高 4.00 倍 ~ 20.0 倍,这种差异随土壤剖面深度的增加而变小,并且土壤有效磷存在随种植年限的增加向下层移动的现象。造成这种现象的主要原因是设施菜地的施肥量远远高于露天菜地^[10, 14-15]。这也就意味着设施菜地,尤其是高棚龄菜地磷素淋溶损失风险更大。菜地土壤磷素主要积累于耕作层,但耕作层以下也有一定数量磷积累,无论是耕作层还是耕作层以下土壤均以无机磷形态为主。有研究表明,母质为潮土的大棚菜地

种植 15 年后 60 ~ 80 cm 土层中有机磷增加量占了磷素增加总量的 19.7%，且随种植年限增加，下层土壤有机磷占比不断增加^[16]。尽管有机磷在绝对数量上不占优势，对磷素迁移的贡献远不如无机磷素大，但由于其具有较强的移动性，因此菜地有机磷淋溶也是不容忽视的问题。

2 高投入菜地土壤磷素损失风险评价方法

2.1 测试磷法

测试磷法是通过化学方法测定研究主体的磷水平，主要分为土壤磷和水环境磷，是目前种植业磷素环境损失风险应用最普遍的方法。①土壤磷水平是影响土壤磷流失的重要因素，土壤磷包括土壤有效磷(Olsen-P、Bray1-P、Mehlich3-P)、全磷、有机磷、易解吸磷(H_2O -P(蒸馏水浸提的磷，表征土壤中最有效的磷源)、 $CaCl_2$ -P)等。②水环境磷是指径流或淋溶液中的 TP、DP 和颗粒态磷(PP)，这些指标与水环境质量和水体的富营养化密切相关。③除了上述这些指标，现在许多研究通过“突变点”法判断土壤磷素流失潜能的阈值及其流失的潜力。“突变点”法是 Hesketh 和 Brookes^[17]提出的，即用土壤 Olsen-P 含量与 $CaCl_2$ -P 含量分别为横轴和纵轴作相关曲线，曲线上的转折点相对应的 Olsen-P 含量即为该土壤的磷素淋溶的“突变点”；当土壤 Olsen-P 含量小于“突变点”时，不会发生磷素淋溶；反之，当土壤 Olsen-P 含量大于“突变点”时，就会发生磷素淋溶。

研究表明，当土壤中 Olsen-P 含量超过某一临界值(拐点值)时，土壤淋出液中磷含量呈线性增长^[18]。目前很多研究中用 0.01 mol/L $CaCl_2$ 浸提土壤中的磷($CaCl_2$ -P)，与径流或淋溶液中生物可利用磷呈正相关关系，表征土壤磷流失风险^[19]。还有一些研究表明，土壤有机磷含量与淋洗液 DP 含量的相关性仅次于 $CaCl_2$ -P，有机磷与土壤测试磷如 Olsen-P、 $CaCl_2$ -P、 H_2O -P、NaOH-P(用 0.1 mol/L NaOH 浸提，表征土壤生物有效性磷源)、Bray1-P 含量均达极显著相关关系($P < 0.01$)，表明土壤有机磷也可以作为评价蔬菜地土壤磷淋失风险的指标之一^[20]。土壤 Fe-P 与径流中藻类有效磷含量存在显著的线性关系，但 Fe-P 对反映土壤磷素淋失风险的敏感性还有待客观系统地进行评价^[21-23]。根据国家标准，水环境中 TP 含量超过 0.10 mg/L 即定义为水体富营养化。PP 虽然不能被水体中藻类直接利用，但在流失过程中会逐渐释放出有效态磷而被藻类吸收利用，是造成水体富营养化的主要因素^[24]。研究表明，土壤有效磷中 58.0% ~ 98.0% 的成

分可以转化为水中的 $DP^{[22]}$ ；Olsen-P、TP 等磷指标，与径流或淋溶液中 TP、DP 等水环境磷指标呈正相关关系^[17,25-26]，即土壤中磷累积量越高，磷的流失风险将越大。刘蕾等^[27]利用 Olsen-P 和 $CaCl_2$ -P，确定了北方设施菜地栗钙土的磷素淋溶阈值为 33.8 mg/kg，即当 Olsen-P 含量 < 33.8 mg/kg 时，土壤磷素淋失风险较低；当 Olsen-P 含量 > 33.8 mg/kg 时，淋失风险急剧上升。当前也有一些研究通过土-水磷素间的线性关系来确定土壤磷素的流失阈值。罗泉达等^[20]采用连续淋洗模拟土壤磷素淋失，以 DP 浓度为 0.05 mg/L 作为引发水体富营养化的临界值，与 $CaCl_2$ -P 和有机磷分别建立趋势线方程，获得引起福州菜地土壤磷素淋失的 $CaCl_2$ -P、有机磷(采用灼烧法测定)阈值分别为 14.1 mg/kg 和 206 mg/kg。

2.2 土壤磷吸附饱和度和法

土壤磷吸附饱和度(DPS)是土壤胶体上已吸附磷的数量占土壤磷总吸附容量的百分数^[28]，可以用来表征土壤磷的释放潜力和流失风险。目前报道的估算 DPS 的方法中，最常见的方法是根据草酸铵提取的磷、铝和铁含量(P_{ox} 、 Al_{ox} 、 Fe_{ox})，利用公式 $DPS(\%) = \alpha P_{ox} / (Fe_{ox} + Al_{ox}) \times 100$ 计算得到^[29]。式中 α 是通过建立土壤饱和吸磷量与影响土壤磷吸附的土壤特征值间的相关关系而计算得到的， α 通常取值 0.5 或 1.0^[29-30]。但不同供试土壤的理化性质不同，统一取值是不科学的， α 可以根据公式 $\alpha = PSC / (Fe_{ox} + Al_{ox}) \times 100$ 计算获得，式中 PSC 为土壤可吸附磷的总量(mmol/kg)^[30]。许杏红等^[30]通过此公式计算出长期施肥的旱地红壤 α 取值范围为 0.71 ~ 0.81。荷兰将 DPS 为 25.0% 作为非钙质土壤环境阈值，当磷饱和度小于 25.0% 时，地表水中磷浓度随土壤磷饱和度增加呈缓慢增加趋势，增加幅度较小；但当土壤磷饱和度超过 25.0% 时，地表水中磷浓度随土壤磷饱和度增加呈显著的指数增加^[31]。但此方法不适用于高 pH 的土壤，尤其是石灰性土壤^[32-33]。另一种方法是通过土壤对磷酸盐的等温吸附试验，利用 Langmuir 方程获取的磷素最大吸附量计算 DPS，其也是目前计算 DPS 应用较多的方法^[34-36]。黄东风等^[34]根据 Langmuir 方程中土壤磷最大吸附量及土壤 Olsen-P 含量计算 DPS，发现福州灰黄泥菜园土(pH<7.0)的 DPS 平均为 23.1%。DPS 受菜地的种植年限和磷肥施用量影响较大。高秀美等^[35]用这种方法计算南京菜地土壤(pH<7.0)的 DPS，发现 DPS 随种植年限延长而升高，对 0 ~ 5 cm 土层，种植年限为 3 ~ 5 年的菜地 DPS 为 15.2%，种植年限 25 ~ 30 年的菜地 DPS 为 30.0%。

在石灰性土上,随着磷肥和有机肥用量的增加,0~20 cm 土层 DPS 有增加趋势^[36]。

2.3 模型预测评价

目前应用于农业面源污染研究领域的模型预测评价方法主要有野外实测法、经验模型及机理模型等(图 1)。野外实测法因其能够计算磷污染输出负荷、直观反映污染输出规律、结果可信度高等优点,是面源污染研究中最常用且应用最为广泛的一种方法,但该方法投入成本大,运行周期长^[37-38]。输出系数法、污染指数法及通用土壤流失方程都属于简单的经验模型。输出系数法可以估算污染输出负荷,需要一定的实测数据^[39-41]。污染指数法可以评价流域内不同地区发生磷流失危险性高低,但指数体系的确定缺乏统一标准,主观性较强。磷指数评价法是较为常用的评估土壤磷素流失风险的方法^[42-43]。通用土壤流失方程则主要针对坡地土壤侵蚀预测^[44-45]。除上述经验模型外,以面源污染形成机理为研究基础的面源污染物理模型则属于机理模型,在了解污染产生、迁移及转化的同时还可以预测污染变化,但模型复杂、数据需求量大、计算效率低。目前应用较多的物理模型包括 SWAT、AGNPS、HSPF 及 ANSWERS 等^[46],这些模型多用于流域尺度上的面源污染排放评价。刘钦普^[47]优化了瑞典科学家 Lars Hakanson 提出的重金属污染环境风险评价方法,设计环境风险指数模型,评价农田的氮磷环境风险。李玲等^[48]运用环境风险指数模型,评估了河北省不同利用方式农田土壤磷素环境风险特征,结果表明,菜地磷的环境风险指数为 0.83,较粮田和果园磷损失更为严重。由于包括磷在内的农业面源污染物传输存在较强的空间异质性,目前基于田块或小流域实测结果或经验模型等模拟预测向全国范围推广运用还存在较大难度。

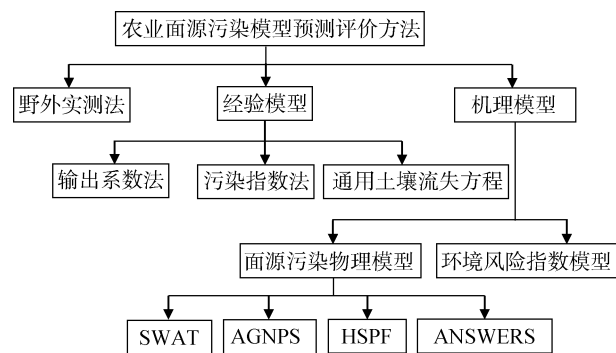


图 1 农业面源污染模型预测评价方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prediction and evaluation methods of agricultural non-point source pollution model

3 高投入菜地土壤磷素环境阈值特征

由于土壤中磷的数量、种类及形态存在较大差异,同时磷素吸附、固定及解吸的机制也具有差异,这些差异必将导致磷从固相进入液相的数量不同,并影响 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系,也就是说不同的土壤具有不同的磷损失临界值。因此,菜地土壤磷素环境阈值因磷源种类及投入量、种植模式、土壤性质、土壤类型等的变化而不同。

土壤有效磷水平是决定农田磷素流失的首要因素,磷的淋失量随磷肥和有机肥投入量的增加而增加,但不同磷肥种类淋失程度存在差异。研究表明,在青紫泥田菜地土壤中,当磷肥用量低于 150 kg/hm^2 时,施用有机肥处理的磷淋失量大于施用化肥处理;当磷肥用量超过 200 kg/hm^2 时,施用化肥处理的磷流失量比施用有机肥处理大^[49]。牛君仿等^[50]研究显示,河北省石灰性设施菜地土壤以无机磷肥作为磷源的磷素环境阈值为 199 mg/kg ,高于有机肥源(风干腐熟猪粪)磷素环境阈值(87.8 mg/kg)。植酸作为有机磷的主要组分容易与土壤的铁铝氧化物结合,不易发生迁移。而粪肥施入土壤后,一方面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,导致土壤降低对磷的吸附强度^[51],提高土壤 Olsen-P 含量,或者有机酸会通过促进磷素矿化进而导致磷酸盐的迁移^[52];另一方面,粪肥中含有的部分活性有机磷迁移速率较快等原因均会导致较高的磷流失风险。但在磷高饱和土壤中,投入相同量磷肥的条件下,施用无机磷肥对土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的提升速率高于有机磷肥,即使无机肥源磷淋溶阈值大大高于有机肥源磷处理,但无机肥源磷带来的淋溶风险要远远高于有机肥^[50]。

研究发现,磷的环境阈值和土壤 pH 密切相关。当土壤 $\text{pH} < 6.0$ 时,磷的损失阈值随土壤 pH 的增加而增加,而在 $\text{pH} > 6.0$ 的土壤中,磷的损失阈值随 pH 的增加而减小^[53],这是因为 pH 介导的土壤铁铝氧化物对磷的吸附解吸差异造成的。当土壤 $\text{pH} < 6.0$ 时,土壤对磷的吸附能力随 pH 增加而降低;而在 $\text{pH} > 6.0$ 的土壤中,土壤对磷的吸附能力则是随 pH 增加而增强^[53]。换言之,土壤对磷的吸附解吸可能在一定程度上决定磷的环境阈值大小。受土壤性质的影响,不同土壤类型磷的环境阈值差异也很大。王荣萍等^[54]研究了广东省不同质地土壤磷素环境阈值,结果表明,壤质黏土磷的淋失风险最小,砂质壤土磷的淋失风险最大。因此,针对不同土壤类型的菜地需要进行不同的施肥管理,从而降低土壤磷的损失风险。

由于土壤磷素环境阈值受到多种因素影响，因此，我国不同地区的菜地土壤 Olsen-P 的环境阈值存在较大差异，范围在 8.63 ~ 96.6 mg/kg(表 1)。与集约化粮田系统相比，菜地土壤是高磷肥、高有机肥投入

的高磷累积土壤，并且具有灌溉强度大、复种指数高等特点。目前粮田土壤有效磷含量基本低于磷环境阈值，而菜地土壤有效磷含量通常是远大于环境阈值(表 1)，因此相较于粮田，菜地具有更高的磷损失风险。

表 1 不同种植类型土壤磷环境阈值及土壤 Olsen-P 含量文献调研数据
Table 1 Soil phosphorus environmental thresholds and Olsen-P contents by literature survey in different cropping systems in China

研究区	种植类型	土壤类型/母质	pH	环境阈值(Olsen-P, mg/kg)	Olsen-P 含量(mg/kg)	参考文献
河北	露天菜地	褐土	—	66.2	267	[12]
河北	设施菜地	潮土	7.54	58.4	226	[16]
福建	露天菜地	河流冲积物	5.60	96.6	63.1 ~ 630	[18]
河北	露天菜地	栗钙土	8.32	33.7	66.2	[27]
广东	露天菜地	壤质黏土	—	79.7	68.0	[54]
广东	露天菜地	黏壤土	—	51.1	58.9	[54]
广东	露天菜地	砂质黏壤土	—	44.0	63.1	[54]
广东	露天菜地	砂质壤土	—	8.63	55.5	[54]
江苏	露天菜地	潮土	3.76	69.4	49.9	[55]
浙江	露天菜地	潮土	6.90	76.2	83.5	[56]
湖南	露天菜地	河流冲积物	6.39	78.3	30.8 ~ 225	[57]
浙江	露天菜地	潮土/水稻土	—	60.0	13.2 ~ 138	[58]
陕西	小麦-玉米轮作	黄土	8.60	39.9	9.80	[59]
湖南	小麦-玉米轮作	红壤	5.70	90.2	13.9	[59]
重庆	稻-麦轮作	紫土	7.70	40.2	4.30	[59]
黑龙江	小麦-大豆-玉米轮作	黑土	7.20	51.6	22.2	[59]
江苏	水稻	水稻土	6.10	32.1	8.34	[60]
江苏	水稻	水稻土	7.51	26.2	10.9	[60]

4 基于菜地磷农学效率的环境风险评估

4.1 高投入菜地有效磷农学阈值及其研究方法

有效磷农学阈值反映了土壤有效磷含量与作物产量之间的关系,当土壤有效磷含量低于某一临界值时,作物产量随磷肥施用量提高而显著提高;相反,当土壤有效磷含量高于这个临界值时,作物产量则随磷肥施用量的提高而维持不变甚至降低^[61-62],这一临界值就定义为有效磷农学阈值。研究菜地土壤有效磷农学阈值对菜地养分管理具有重要意义,但由于蔬菜种类多,又有露天和设施之分,加之有机肥投入比重相对大等特点均增加了菜地有效磷农学阈值研究的复杂性^[63]。目前,确定土壤有效磷农学阈值的方法主要有:模型法和 Cate-Nelson 十字交叉法^[64]。

模型法包括线性-线性模型、线性-平台模型、拟合米切里西方程(指数方程)和二元多项式等,根据土壤有效磷含量及蔬菜产量拟合模型确定农学阈值。李冬初等^[65]利用 3 种模型拟合小麦和玉米产量与红壤 Olsen-P 含量的响应关系,其农学阈值范围分别为

13.5 ~ 28.8 mg/kg 和 23.4 ~ 46.0 mg/kg。李宇虹等^[63]用线性-平台模型,基于文献调研数据发现蔬菜类型、种植模式及磷肥种类均对菜地土壤 Olsen-P 农学阈值有较大影响:果菜农学阈值(56.7 mg/kg)高于叶菜(39.1 mg/kg),设施菜地农学阈值(25.7 mg/kg)高于露天菜地(19.8 mg/kg),不施有机肥的露天菜地土壤有效磷农学阈值(27.0 mg /kg)显著高于施用有机肥的露天菜地(19.8 mg/kg)。张永起等^[66]通过不同方法浸提土壤有效磷,从而建立有效磷含量与蔬菜相对产量的数学模型,研究发现,广东省蔬菜达到 95% 相对产量时, Olsen-P>81.0 mg/kg, Mehlich1-P>179 mg/kg, Mehlich3-P>165 mg/kg, ASI>98.0 mg/kg。Liang 等^[67]通过拟合苋菜产量与土壤 Olsen-P 含量的二次多项式方程,确定达到苋菜田间最大产量 95% 的 Olsen-P 农学阈值为 101 mg/kg。

Cate-Nelson 十字交叉法:画两条分别平行于 X 轴和 Y 轴的直线,两直线组成一个十字架;确定 Y 轴位置,移动十字架,使分布在左上象限和右下象限的点尽量少,所得垂线与 X 轴的交点即为有效磷农学

阈值^[68]。鲁明星等^[69]利用该方法研究得到达到油菜 90% 相对产量的土壤有效磷农学阈值为 20.2 mg/kg。章明奎等^[70]采用同样的方法得出,在浙北平原地区,蔬菜正常生长对土壤有效磷的要求比水稻更高,水稻相对产量在 95% 以上时土壤有效磷农学阈值为 20.0 mg/kg,土壤有效磷含量高于这一阈值,磷肥施用的增产效果明显降低;而蔬菜相对产量在 95% 以上的有效磷水平约为 40.0 mg/kg。模型法是目前农学阈值计算最常用的方法,但模型法划分阈值等级具有一定的主观性,而 Cate-Nelson 十字交叉法建立的分级较为简单且统计相对合理^[68]。

4.2 基于菜地磷农学效率的环境风险评估

目前菜地土壤的环境阈值和农学阈值已有不少研究,但大部分研究未综合考虑菜地土壤的环境阈值和农学阈值。姜波等^[56]研究表明,杭州市郊菜地土壤磷素淋溶阈值为 76.2 mg/kg,60% 的菜地土壤存在磷素流失风险,且环境阈值大于农学阈值(60.0 mg/kg)。从目前已有的研究结果看,菜地土壤磷的农学阈值通常低于环境阈值(表 1,表 2)。我国不同地区的菜地土壤 Olsen-P 的环境阈值集中在 60.0 ~ 80.0 mg/kg(表 1),而菜地土壤 Olsen-P 的农学阈值集中在 40.0 ~ 60.0 mg/kg(表 2),但无论是环境阈值还是农学阈值,菜地通常高于粮田。章明奎等^[70]综合考虑浙北平原菜地有效磷的环境阈值和农学阈值,提出菜地土壤有效磷应控制在 40.0 ~ 50.0 mg/kg,既可以确保作物正常生长的需要,又不会对环境产生较大

的负面影响。但是由于农学阈值和环境阈值因土壤类型、种植类型、菜地种植年限等因素影响而差异较大,不同区域应制定明确的土壤有效磷控制范围。因此,了解磷素在菜地土壤中的累积现状及特征,确定蔬菜高产和环境友好的土壤有效磷农学阈值和环境阈值,将土壤有效磷水平维持在既能满足蔬菜高产需求又能降低磷流失风险的最佳范围,以实现菜地磷养分的最佳管理,是今后蔬菜种植体系绿色可持续发展的方向。

5 展望

适宜的土壤有效磷水平对保证蔬菜产量和水体安全具有十分重要的作用。如何解决当前以牺牲环境为代价的蔬菜高产生模式弊端,这需要将现有的农艺、评价手段以及环境因素进行综合考量,从而指导菜地磷养分科学管理。但目前大部分的研究通常割裂了农业生产和环境保护,未将菜地磷的环境阈值和农学阈值进行综合考虑。在确定菜地农学阈值基础上,一方面保证蔬菜产量,另一方面维持良好的水体环境,指导菜农科学施肥是我国菜地磷养分资源管理的主要目标之一。但目前存在的问题是没有统一的指标表征环境阈值和农学阈值,土壤有效磷是用 Olsen-P 还是 Mehlich 1-P 来表征? 同样也没有统一的方法确定环境阈值,环境阈值是用测试磷法还是模型预测法来确定? 测试磷法是 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的拐点,还是 TP 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的拐点? 因此,结合我国菜地施磷现状以及菜地土壤磷素累积特征,通过土壤磷测试方法结合模型拟合,对以往经验模型进行优化,建立更适合高投入蔬菜种植体系土壤磷素丰缺评价的标准,对于菜地磷素流失风险的评价十分必要。针对高投入体系亟待制定适合各蔬菜主产区的磷肥投入限量标准,来降低该生产体系带来的环境压力。大部分大田作物的农学阈值低于环境阈值,但是菜地因为土壤自身磷累积量高,可能会是农学阈值低于环境阈值,也可能是环境阈值低于农学阈值,甚至二者重合。在农学阈值低于环境阈值的蔬菜种植区,应减少磷肥的施用,也包括减少有机磷肥的施用,同时以蔬菜与其他粮食作物轮作的种植模式替代菜-菜轮作,如稻-菜轮作。制订基于同时考虑农学和环境效应的菜地磷肥限量标准对于缓解我国高投入种植体系中磷肥投入过量与生态环境代价高的矛盾,在促进农民节本增收的同时保障农业可持续发展具有非常重要的意义。目前随着有机肥替代化肥技术在我国蔬菜减磷增效生产中推广应用范围扩大,对于今后菜地磷污染排放特征

表 2 不同种植类型土壤磷农学阈值文献调研数据
Table 2 Soil phosphorus agriculture thresholds by literature survey in different cropping systems in China

区域	种植类型	农学阈值 (Olsen-P, mg/kg)	参考文献
全国(文献调研)	叶菜	46.0	[2]
全国(文献调研)	果菜	58.0	[2]
全国(文献调研)	叶菜	39.1	[63]
全国(文献调研)	果菜	56.7	[63]
浙江	蔬菜	60.0	[56]
广东	蔬菜	43.5	[66]
浙江	蔬菜	40.0	[70]
浙江	水稻	20.0	[70]
北京	冬小麦	19.0	[71]
北京	夏玉米	17.3	[71]
陕西	冬小麦	17.3	[71]
陕西	夏玉米	16.4	[71]
河南	冬小麦	12.5	[71]
河南	夏玉米	12.1	[71]

及其影响也值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张甘霖, 卢瑛, 龚子同, 等. 南京城市土壤某些元素的富集特征及其对浅层地下水的影响[J]. 第四纪研究, 2003, 23(4): 446–455.
- [5] Sharpley A N, Rekolainen S. Phosphorus in agriculture and its environmental implications[J]. *Phosphorus loss from soil to water. Proceeding of a workshop, Wexford, Irish Republic*, 29–31 September 1995. 1997: 421–422.
- [6] 刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 550–558.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2434–2442.
- [10] 胡明芳, 田长彦, 周光涛, 等. 不同种植年限大棚菜地土壤速效磷、钾及电导率的垂直变异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 205–209, 215.
- [11] 廖文华, 刘建玲, 黄欣欣, 等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 894–903.
- [12] 王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. 华北农学报, 2006, 21(4): 67–70.
- [13] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 82–86.
- [14] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 等. 氮、磷、钾在设施蔬菜土壤剖面中的分布及移动研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S2): 537–542.
- [15] 马文奇, 毛达如, 张福锁. 山东省蔬菜大棚养分积累状况[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(3): 65–67.
- [16] 于群英, 李孝良, 陈世勇, 等. 长期施肥对菜地土壤磷素积累的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(6): 196–201.
- [17] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105–110.
- [18] 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.
- [19] McDowell R, Sharpley A, Brookes P, et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution[J]. *Soil Science*, 2001, 166(2): 137–149.
- [20] 罗泉达, 庄远红, 李延. 福州市蔬菜地土壤磷淋失的“阈值”研究[J]. 福建农业学报, 2012, 27(4): 373–378.
- [21] Sharpley A. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 947–951.
- [22] Sibbesen E, Sharpley A N. Setting and justifying upper critical limits for phosphorous in soils[M]//Tunney H, Carton O T, Brookes P C, et al. *Phosphorus Loss from Soil to Water*. CAB, UK, 1998: 151–176.
- [23] 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.
- [24] Wildung R E, Schmidt R L, Gahler A R. The phosphorus status of eutrophic lake sediments as related to changes in limnological conditions-total, inorganic, and organic phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1974, 3(2): 133–138.
- [25] Djodjic F, Mattsson L. Changes in plant-available and easily soluble phosphorus within 1 year after P amendment[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29: 45–54.
- [26] Wang X M, Jie X L, Zhu Y G, et al. Relationships between agronomic and environmental soil test phosphorus in three typical cultivated soils in China[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(6): 795–800.
- [27] 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.
- [28] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 920–926.
- [29] 张国林, 钟继洪, 蓝佩玲, 等. 蔬菜地土壤磷提取及模拟径流中磷素潜在流失的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 170–175.
- [30] 许杏红, 王艳玲, 殷丹, 等. 长期施肥对旱地红壤磷素饱和度的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 870–877.
- [31] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 111–116.
- [32] Zhang H, Schroder J L, Fuhrman J K, et al. Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 96–106.
- [33] Kleinman P J A, Sharpley A N. Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(11/12): 1825–1839.
- [34] 黄东风, 邱孝煊, 李卫华, 等. 福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 83–87, 163.

- [35] 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.
- [36] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 等. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 959–965.
- [37] Lu X X, Li S Y, He M, et al. Seasonal changes of nutrient fluxes in the Upper Changjiang basin: An example of the Longchuanjiang River, China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 344–351.
- [38] Zhu Q, Schmidt J P, Buda A R, et al. Nitrogen loss from a mixed land use watershed as influenced by hydrology and seasons[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 307–315.
- [39] 杜娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沔河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 827–837.
- [40] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 677–682.
- [41] 方怒放, 史志华, 李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4): 7–12.
- [42] 张世文, 王朋朋, 叶回春, 等. 基于数字土壤系统的县域土壤磷素流失风险简化评估[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 110–117.
- [43] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 等. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 17–27, 327.
- [44] Sivertun Å, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gisselö watershed using GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(10): 887–898.
- [45] 胡连伍, 王学军, 罗定贵, 等. 基于 GIS 的流域非点源污染潜在风险区识别[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 107–110, 115.
- [46] 邓欧平, 孙嗣畅, 吕军. 基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1284–1290.
- [47] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596–3605.
- [48] 李玲, 段英华, 徐明岗, 等. 河北省不同利用方式农田土壤氮磷环境风险分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 96–100, 149.
- [49] 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.
- [50] 牛君仿, 冯俊霞, 张喜英. 不同磷源对设施菜田土壤速效磷及其淋溶阈值的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(5): 686–693.
- [51] Vanden Nest T, Ruyschaert 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.
- [52] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1195–1200.
- [53] Zhao X R, Zhong X Y, Bao H J, et al. Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils[J]. Geoderma, 2007, 142(3/4): 237–244.
- [54] 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.
- [55] 王彩绒, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 76–80.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 李艾芬, 章明奎. 浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 122–127.
- [59] Bai Z H, Li H G, Yang X Y, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. Plant and Soil, 2013, 372(1/2): 27–37.
- [60] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的“突变点”[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 6–10.
- [61] Poulton P R, Johnston A E, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part I: The response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(1): 4–11.
- [62] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 基于长期施肥下潮土磷素演变及农学阈值的研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2373–2377.
- [63] 李宇虹, 刘朋朋, 严正娟, 等. 菜田土壤有效磷供应临界指标分析[J]. 华北农学报, 2012, 27(S1): 345–353.
- [64] Mallarino A P, Blackmer A M. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(5): 850–856.
- [65] 李冬初, 王伯仁, 黄晶, 等. 长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3830–3841.
- [66] 张永起, 李淑仪, 廖新荣, 等. 基于几种土壤测试方法的华南菜田磷素丰缺指标研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 231–239.
- [67] Liang L Z, Shen R F, Yi X Y, et al. The phosphorus requirement of *Amaranthus mangostanus* L. exceeds the ‘change point’ of P loss[J]. Soil Use and Management, 2009, 25(2): 152–158.
- [68] Cate R B Jr, Nelson L A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1971, 35(4): 658–660.
- [69] 鲁明星, 邹娟, 鲁剑巍, 等. 湖北省油菜磷肥施用效果与土壤速效磷分级标准研究[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(4): 448–452.
- [70] 章明奎, 麻万诸. 浙北平原土壤有效磷的农学-环境综合分级研究[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(4): 83–87.
- [71] Tang X, Ma Y, Hao X, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. Plant & Soil, 2009, 323(1/2): 143–151.