植物营养与肥料学报 2014,20(1): 148 -155
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0116

福建菜田氮、磷积累状况及其淋失潜力研究

章明清[1], 姚宝全[2], 李 娟[1], 孔庆波[1]
(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所,福州 350013; 2 福建省农田建设与土壤肥料技术站,福州 350003)

摘要: 本文通过采集460个福建菜田代表性耕层土样,采用土壤测试和土柱渗漏水模拟试验的方法研究菜田土壤硝态氮和Olsen-P含量状况和淋失临界指标及其淋失潜力。结果表明,耕层土壤硝态氮含量为47.4±55.5 mg/kg, Olsen-P含量则为61.7±43.2 mg/kg, 其中瓜果类蔬菜种植地土壤硝态氮和Olsen-P含量明显高于叶菜类和根茎类蔬菜种植地。应用双速率转折点建模法,得到氮、磷淋失临界指标 X_0 分别为土壤硝态氮76.3 mg/kg和Olsen-P 42.8 mg/kg。淋失临界值相当于或略高于满足蔬菜营养的农学指标。当土壤硝态氮或Olsen-P含量低于 X_0 时,随着其含量增加,渗漏水硝态氮或总磷浓度以线性方式缓慢增加,反之,则以非线性形式急剧增大。土壤硝态氮和Olsen-P含量高于其 X_0 的土样数分别占17.9%和81.3%, 表明这些样点具有较高的氮、磷淋失潜力,是氮、磷污染控制的关键地块。瓜果类菜田土壤硝态氮和Olsen-P含量高于其 X_0 的土样数分别占到32.3%和96.3%,淋失潜力明显高于叶菜类和根茎类菜田,是氮、磷污染控制的优先区域。

关键词: 菜田; 硝态氮; Olsen-P; 积累; 淋失
中图分类号: S153.6+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0148-08

N and P accumulation status and their leaching potential in vegetable fields in Fujian Province

ZHANG Ming-qing[1], YAO Bao-quan[2], LI Juan[1], KONG Qing-bo[1]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China;*
2 Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Soil tests and leakage water simulation experiment using earth pillar were used to study NO_3^--N and Olsen-P content and their leaching in 460 vegetable field samples, which were collected from the topsoil of typical vegetable fields in Fujian province. Soil test results show that the NO_3^--N and Olsen-P contents in the top soils were averaged 47.4±55.5 mg/kg and 61.7±43.2 mg/kg respectively. Thereinto, the NO_3^--N and Olsen-P content in the fields growing melon and fruit vegetables was apparently higher than those in the fields growing leaf and tuber vegetables. Calculated with the double-velocity turning point model, the critical index of double-velocity turning point X_0 of N and P leaching is 76.3 mg/kg for NO_3^--N and 42.8 mg/kg for Olsen-P, which is equivalent or a bit higher than the agricultural indices for the satisfactory vegetable nutrition. When the NO_3^--N or Olsen-P contents in soil were lower than their X_0, the NO_3^--N or total-P concentration in leaching water increases slowly in a linear way, when the NO_3^--N or Olsen-P contents in soil exceeds its X_0, the NO_3^--N or total-P would increases rapidly in non-linear way. There are 17.9% and 81.3% of soil samples with their NO_3^--N and Olsen-P content exceeded their X_0 respectively, indicating the high N and P leaching potential. In the melon and fruit vegetable fields, in about 32.3% and 96.3% of soil samples the NO_3^--N and Olsen-P contents exceeded their X_0 respectively, indicating their N and P leaching potential were apparently higher than the leaf vegetable and tubers vegetable

收稿日期: 2013-03-29 **接收日期:** 2013-06-29
基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI, Fujian-10); 福建省自然科学基金(2011J01112)项目资助。
作者简介: 章明清(1963—), 男,福建永春人, 博士, 研究员, 主要从事平衡施肥和施肥与环境领域研究。
Tel: 0591-87572840, E-mail: zhangmq2001@163.com

fields. More attention should be taken on the melon and fruit vegetable fields to control N and P pollution.

Key words: vegetable fields; NO_3^--N; Olsen-P; accumulation; leaching loss

蔬菜生产是一个高度集约化的种植体系，由于肥料施用量普遍偏高[1-3]，菜田有效态氮和磷含量为一般耕地土壤的几倍至十几倍，已严重影响到部分地区的水体水质[3]。虽然田间实际观测可较好地评价土壤氮、磷的淋失风险，但工作量大和耗时长，难以大规模进行。因此，采用土壤测试方法来评价土壤氮、磷流失风险显得十分必要[1,4]。研究表明，氮素淋失以硝态氮为主，土壤硝态氮含量与渗漏水硝态氮浓度密切相关[5]；在土壤磷的测定中，用 0.01 mol/L $CaCl_2$、Olsen、Mehlich Ⅲ和土壤磷饱和度等方法提取的耕层土壤磷含量与淋失磷浓度具有显著的相关性，可表征土壤磷的淋失潜力[1,6-9]。在氮、磷淋失动态特征中，土壤有效磷含量与渗漏水磷浓度之间具有“突变点”特征[10-15]，这种“突变点”特征同样存在于土壤硝态氮含量和渗漏水硝态氮浓度之间[16-17]。因此土壤氮、磷积累状况及其淋失浓度“突变点”的研究，可为土壤氮、磷污染潜力评价提供了客观依据。

由于土壤硝态氮和 Olsen-P 在我国许多地区已成为常规测定项目，数据易于获取，因此，采用土壤硝态氮和 Olsen-P 含量来评价土壤氮、磷流失潜力具有重要价值。但我国应用硝态氮和 Olsen-P 指标来评价菜田氮、磷淋失风险的文献报道还不多[1,15,18]，而且提出的“突变点”指标值在不同区域和土壤条件下是否普遍适用尚不清楚。为此，本文通过采集福建省蔬菜主产区的代表性耕层土壤，研究土壤氮、磷累积状况，探讨土壤硝态氮和 Olsen-P 含量与土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度之间的相互关系，以期建立福建菜田土壤氮、磷淋失临界指标，为区域菜田氮、磷淋失潜力评价和蔬菜氮、磷肥合理施用提供依据。

1　材料与方法

1.1　土样采集和土柱渗漏水试验

2009 年至 2011 年 3 年间，在福建测土配方施肥项目执行中对菜田施肥状况的调查结果表明，在蔬菜生产中当地普遍选择施用尿素和氮磷钾含量为 15-15-15 或 16-16-16 的高浓度复合肥；以苦瓜、瓢瓜和番茄等品种为代表的瓜果类蔬菜，种植效益较高，习惯施肥量普遍高于叶菜类等蔬菜。因此，针对全省 9 个地（市）常年露地蔬菜种植区，在蔬菜收获后，按规范方法采集具有代表性的 0—20 cm 耕层土壤样品，每个土样采集 2 ～ 3kg，共采集 460 个土样，其中，用于土柱试验的每个土样则采集 20 kg。土样运回实验室，在室内自然状态下风干，然后过 2 mm 筛备用。

由于蔬菜大面积种植受到销售市场限制，同一区域的常年种植种类相对一致。因而，根据叶菜类、根茎类和瓜果类蔬菜习惯施肥状况的调查结果，结合全省 9 个地（市）不同类别蔬菜的种植分布状况，选择 101 个土样进行室内土柱渗漏水模拟试验[5]。试验方法为：将过 2 mm 筛的风干土样充分混匀后，按照 1.20 g/cm^3 的容重装土柱，土柱采用一端加装有网孔封口的 PVC 管，其内直径 10.5 cm，长度 35 cm，竖直装土高度 29 cm。装土前，先在土柱底部铺两层纱布以防止土壤细颗粒从底部圆孔中漏出。为保证土柱内土壤容重上下一致，将待装土样等分成 6 份，每次装入一份并压实至 4.8 cm 高度。最后在土柱内的土壤表面铺上一层滤纸，以防止供水过程中水流对表土产生冲击。土柱装好后，竖直固定在支架上，土柱的下端连接渗漏水收集器。每个土样 3 次重复。预先测定该种装土方法下土样的土柱最大持水量，然后将试验土柱的土壤水分保持在最大持水量的 80%，在此条件下培养 1 周，土柱顶端用塑料薄膜扎紧。试验过程中，土柱上端采用医学挂瓶注射的方式控制对土柱供水，自动缓慢加入去离子水 700 mL 进行淋溶试验。在土柱底端出水 10 min 后开始收集土柱渗漏水，直至收集到 250 mL 为止。收集的渗漏水用于测定土壤渗漏水铵态氮、硝态氮、可溶性磷和总磷浓度。全部土柱试验在阴凉的室内进行，室内温度为 25 ±3℃。

1.2　测定方法

土壤样品的主要理化性状采用常规方法[19]测定，即：pH 用电位法，有机质用重铬酸钾容量法，碱解氮用碱解扩散法，速效磷用 0.5 mol/L 碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法，速效钾用 1 mol/L 乙酸铵提取—火焰光度计法测定。其中，134 个土样测定土壤铵态氮和硝态氮含量，铵态氮用 2 mol/L 的 KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定，硝态氮则用 2 mol/L 的

KCl 浸提,镀铜镉还原—重氮化耦合比色法测定。

土柱渗漏水在 24 h 之内测定,NH_4^+-N、NO_3^--N、水溶性磷采用常规方法[19]测定,即:NH_4^+-N用靛酚蓝比色法,NO_3^--N 用紫外分光光度法,水溶性磷则用钼锑抗显色—紫外可见光光度计法。如发现水样浑浊,则先采用高速离心机(转速为6000 r/min)离心 10 min,取上清液进行测定。渗漏水总磷浓度测定方法为硫酸-高氯酸氧化—钼锑抗显色—紫外可见光光度计法测定。

1.3 数据统计方法

土壤主要理化性状和渗漏水氮、磷浓度的统计分析采用 MATLAB R2012a 软件的统计工具箱完成。土柱淋溶试验的每个土样均重复 3 次,文中每个样品所用数据为3 次重复测定结果的平均值。绘图采用 MATLAB R2012a 软件编程绘制。

2 结果与分析

2.1 菜田土壤碱解氮和 Olsen-P 含量

2.1.1 蔬菜种类对土壤碱解氮和 Olsen-P 含量的影响 由于叶菜类、根茎类和瓜果类蔬菜的氮、磷营养特性和需肥量有明显的差异[20],因而在 460 个菜田土样测定结果中,按上述三类蔬菜种植地土样进行分类总结,结果见表1。

表1 福建菜田土壤主要理化性状

Table 1 Basic fertility conditions of vegetable soil in Fujian province

蔬菜种类 Vegetable kinds	样品数(n) Soil samples	pH	有机质 OM (g/kg)	碱解氮(mg/kg) Avail. N	Olsen-P (mg/kg)	速效钾(mg/kg) Avail. K
叶菜类 Leaf vegetables	134	5.5 ±0.6	26.5 ±1.1	136.0 ±46.3	57.1 ±43.2	92.6 ±89.1
根茎类 Tubers vegetables	192	5.5 ±0.8	23.9 ±1.3	121.3 ±49.9	62.7 ±48.0	88.7 ±59.5
瓜果类 Melon and fruit vegetables	134	5.4 ±0.6	22.1 ±1.0	140.2 ±34.6	78.0 ±59.9	117.7 ±59.5
合计 Total	460	5.5 ±0.7	24.8 ±1.2	128.3 ±48.1	61.7 ±43.2	92.3 ±72.4

以大白菜、结球甘蓝菜和芥菜等品种为代表的134 个叶菜类蔬菜地土样,碱解氮和 Olsen-P 含量变化范围分别为 56 ~ 253 mg/kg 和 5.7 ~ 203.0 mg/kg,最大值和最小值分别相差4.5 倍和35.6 倍,平均值分别为136.0 mg/kg 和57.1 mg/kg;根据叶菜类蔬菜土壤养分丰缺指标[21],碱解氮和 Olsen-P 含量超过高产临界指标的土样数分别为 3.7% 和46.3%。以莴苣、胡萝卜和冬种马铃薯等品种为代表的192 个根茎类蔬菜地土样,碱解氮和Olsen-P 含量变化范围分别为32 ~290 mg/kg 和4.9 ~275.0 mg/kg,最大值和最小值分别相差9.1 倍和56.1 倍,平均含量分别为121.3 mg/kg 和62.7 mg/kg,碱解氮和 Olsen-P 含量超过该类蔬菜高产临界指标[21]的土样数分别为1.6%和51.6%。以瓢瓜、苦瓜和番茄等品种为代表的 134 个瓜果类蔬菜地土样,碱解氮和Olsen-P 含量变化范围分别为86 ~286 mg/kg 和6.8 ~221.5 mg/kg,最大值和最小值分别相差3.3 倍和32.6 倍,平均值分别达到 140.2 mg/kg 和 78.0 mg/kg,碱解氮和 Olsen-P 含量超过瓜果类蔬菜高产临界指标[21]的土样数分别占到3.9%和61.5%。

结果表明,瓜果类蔬菜种植地土壤碱解氮和Olsen-P 等有效养分含量均明显高于叶菜类和根茎类的菜田;在3 类蔬菜中,碱解氮含量超过高产农学指标的土样数很少,但有 46.3% ~ 61.5% 的土样Olsen-P 含量超过了高产临界指标。

2.1.2 菜田硝态氮和Olsen-P 的积累状况 综合460 个菜田土样测定结果,土壤有机质和碱解氮平均含量分别比稻田的平均值低了 3.7 g/kg 和 15.2 mg/kg,只有稻田的 87.0% 和 89.4%,Olsen-P 含量平均比稻田高了 22.9 mg/kg,为稻田的 159.0%。按照稻田养分肥力水平[22],福建菜田土壤 Olsen-P 含量处于不同程度的积累状态。

土壤无机氮中以难被土壤吸附的硝态氮为主,平均为铵态氮含量的 2.9 倍,耕层硝态氮含量平均达到 47.4 mg/kg,相当于 107kg/hm^2 的硝态氮,属于较高含量水平[23](表2)。

2.2 不同蔬菜类型对土柱渗漏水氮、磷浓度的影响

表3 的土柱渗漏水测定结果经 t 测验表明,瓜果类菜地土壤的土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度显著高于叶菜类和根茎类菜地;根茎类菜地的土柱渗漏

表 2　福建菜田土壤铵态氮和硝态氮含量状况

Table 2　NH_4^+-N and NO_3^--N content in vegetable soils in Fujian province

蔬菜种类 Vegetable kinds	样品数 Soil samples(n)	NH_4^+-N (mg/kg)	NO_3^--N(mg/kg)
叶菜类 Leaf vegetables	31	14.8 ±6.4	23.6 ±28.5
根茎类 Tubers vegetables	45	12.4 ±12.5	25.0 ±24.9
瓜果类 Melon and fruit vegetables	58	19.1 ±14.3	76.0 ±67.9
合计 Total	134	16.1 ±12.3	47.4 ±55.5

表 3　不同蔬菜类型土柱渗漏水中的氮、磷浓度

Table 3　N and P concentrations in the leakage water collected in the earth pillar in different vegetable fields

蔬菜种类 Vegetable kinds	土样数(n) Soil samples	NH_4^+-N (mg/L)	NO_3^--N (mg/L)	水溶性磷(mg/L) Water-soluble P	总磷(mg/L) Total P
叶菜类 Leaf vegetables	28	8.15 ±21.99 aA	118.58 ±70.64 cC	0.35 ±1.02 bB	0.48 ±1.03 bB
根茎类 Tubers vegetables	22	1.70 ±4.92 cB	136.57 ±117.67 bB	0.22 ±0.16 cC	0.41 ±0.19 bB
瓜果类 Melon and fruit vegetables	51	7.37 ±6.32 bA	408.16 ±348.18 aA	0.56 ±0.90 aA	1.18 ±1.49 aA
合计 Total	101	6.35 ±12.71	268.72 ±291.45	0.42 ±0.80	0.81 ±1.21

注(Note)：测定数据后的小写字母表示差异显著水平 $P<0.05$，大写字母则表示 $P<0.01$ Lower case letters indicates values in same column significantly different at the 5% level, and capital letters at the 1% level.

水硝态氮含量显著高于叶菜类菜地，但总磷含量差异不显著。在土柱渗漏水中，无机氮以硝态氮为主，铵态氮含量平均只有硝态氮含量的 2.4%；总磷浓度明显高于水溶性磷，水溶性磷含量仅占总磷含量的 51.9%；就不同土样而言，无论是铵态氮或硝态氮还是水溶性磷或总磷，标准差均较大，表明不同菜田土柱渗漏水氮、磷浓度差异较大。

2.3　土壤硝态氮和有效磷含量对土壤氮、磷淋失潜力的影响

土壤有效磷含量与渗漏水磷浓度之间具有“突变点”特征[10-15]，这种特征同样存在于土壤硝态氮含量和渗漏水硝态氮浓度之间[16-17]。图 1 a 和 b 的 101 个土样测定结果表明，在较低的土壤硝态氮或 Olsen-P 含量范围内，土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度随土壤硝态氮和 Olsen-P 含量提高而呈现线性缓慢增加，但土壤硝态氮和 Olsen-P 含量达到一定水平后，土柱渗漏水氮、磷浓度就急剧增加，整体表现出明显的非线性关系。因此，可以设想，当土壤硝态氮或 Olsen-P 含量超过某个转折点时，由此将导致通过淋溶流失的硝态氮或总磷浓度迅速地提高。

针对图 1 a 和 b 的动态特征，假设去除土柱渗漏水硝态氮浓度大于 600 mg/L 的 7 个土样，剩余的 94 个样点的土壤硝态氮含量与土柱渗漏水硝态氮浓度的关系就是典型的线性关系；同样，假设去除土柱渗漏水总磷浓度大于 1.5 mg/L 的 10 个土样，剩余的 91 个样点的土壤 Olsen-P 含量与土柱渗漏水总磷浓度的关系也是典型的线性关系。因此，根据线性回归方程 F 值大小及其显著水平(概率 P)，从最佳拟合角度出发，用 X 代表土壤测定指标，Y 代表渗漏水养分浓度，在土壤硝态氮或有效磷的中低含量范围内进行线性回归分析，并检查线性回归方程显著性，而对全部样本则采用非线性回归分析，结果见表 4。由于土壤硝态氮或 Olsen-P 含量较低时，其土柱渗漏水硝态氮或总磷浓度满足线性关系，而在较宽的土壤硝态氮或 Olsen-P 含量时，则表现为明显的非线性关系，因而，分别对线性回归方程和非线性回归方程求导数，得到 2 个速率方程，并联立求出它们的公共解。与横坐标对应的解 X_0 为某一特定的临界值，在此将 X_0 称为“双速率转折点”。结果表明，土壤硝态氮和 Olsen-P 的 X_0 分别为 76.3 mg/kg 和 42.8 mg/kg。表明，当土壤硝态氮或 Olsen-P 含量低于其 X_0 时，随着土测值的提高，土柱渗漏水硝态氮或总磷浓度的增加速率将以线性形式缓慢增加，反之，当超过 X_0 时，其增加速率将以非线性的形式急剧增大，如图 1c 和 d 的模拟结果所示，因此 X_0 是菜田土壤氮、磷淋失潜力的一个评判指标。

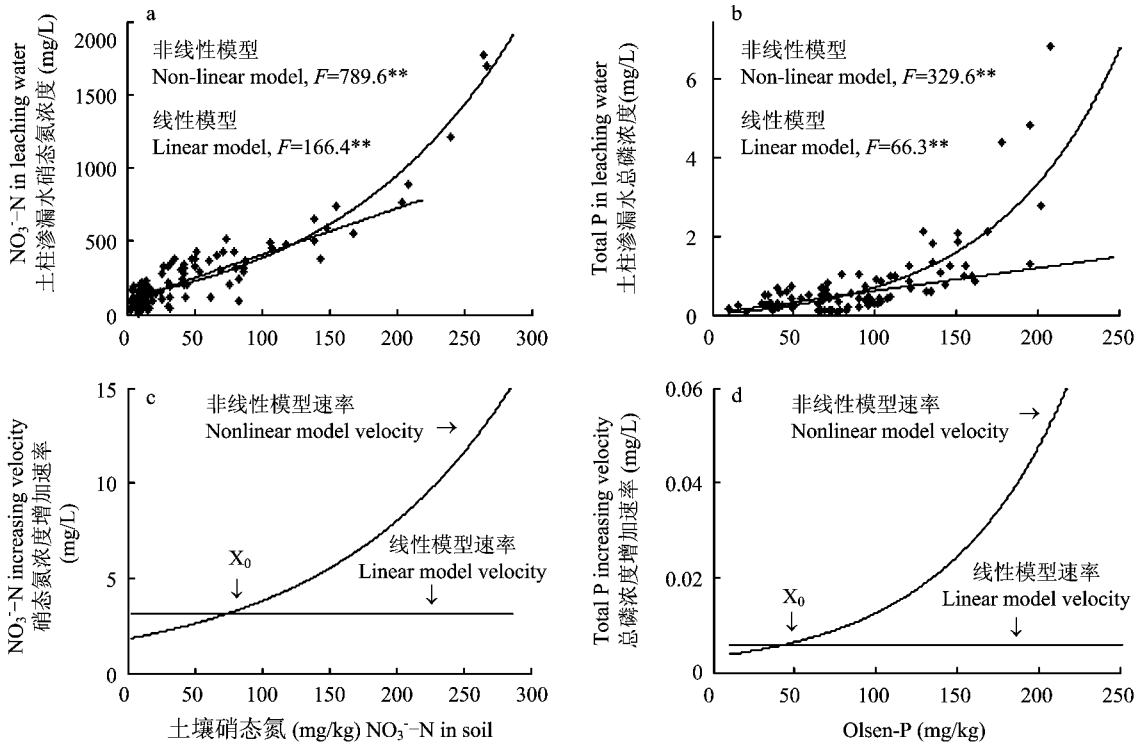

图1 土壤硝态氮和有效磷浓度对土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度的影响及其双速率转折点 X_0

Fig. 1 Relationship between NO_3^--N or Olsen-P content in soil and NO_3^--N or total P in leakage water of earth pillar and their double-velocity turning point X_0

表4 土壤硝态氮和 Olsen-P 含量对土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度的回归方程及其转折点

Table 4 Double-velocity turning point and regression equation between NO_3^--N and Olsen-P content in soil and NO_3^--N and total P in leakage water of earth pillar

养分 Nutrient	建模方法 Modeling method	回归方程 Regression equation	*F* 值 *F* value	转折点 X_0(mg/kg) Turning point X_0
N	非线性回归 Non-linear regression	Y = −124.13 + 240.31exp(0.007452X), n = 101	789.6**	76.3
	线性回归 Linear regression	Y = 89.290 + 3.1623X, n = 94	166.4**	
P	非线性回归 Non-linear regression	Y = −0.2369 + 0.2414exp(0.01343X), n = 101	329.6**	42.8
	线性回归 Linear regression	Y = 0.02569 + 0.005757X, n = 91	66.3**	

注(Note): X 为土壤硝态氮和 Olsen-P 含量 Mean the soil NO_3^--N or Olsen-P content (mg/kg); Y 为土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度 Mean the NO_3^--N or total P contents in leakage water (mg/L).

2.4 菜田氮、磷淋失潜力评价

由表1和表2可知,福建菜田土壤硝态氮含量达到47.4±55.5 mg/kg,平均为铵态氮的2.9倍,土壤 Olsen-P 含量达到61.7±43.2 mg/kg,明显高于3类蔬菜的农学高产临界指标[21],表明所有菜田土壤中硝态氮和 Olsen-P 都出现了积累。根据土壤硝态氮和 Olsen-P 的双速率转折点指标,134个土壤样品中的硝态氮含量超过其临界指标,占样品总数的17.9%,Olsen-P 含量超过临界指标的土样数占土样总数的81.3%。这些菜地土壤硝态氮和 Olsen-P 积累过多,带来很高的环境风险,是菜田氮、磷面源污染控制的关键地块。

与叶菜类和根茎类菜田相比,瓜果类菜田土样中土壤硝态氮含量、Olsen-P 含量超过双速率转折点指标的比例更高,超标土样数分别有20个和129个,占该类菜田土样数的32.3%和96.3%。瓜果类菜田是氮、磷面源污染控制的优先区域。

3 讨论

3.1 菜田土壤氮、磷淋失潜力临界指标

利用土壤氮、磷淋失临界值，可以有效地评价氮、磷淋失风险[1, 16, 24]。当土壤硝态氮含量达到 60 mg/kg 时已能满足蔬菜正常生长的需要，因此 60 mg/kg 是菜田土壤硝态氮的推荐值[16, 24]。洛桑实验站土壤 Olsen-P 含量从 7 ～ 110 mg/kg 的田块磷淋失临界值为 57 mg/kg[10]，土壤磷淋失的 Olsen-P 临界指标为 60 mg/kg[11]。在我国，土壤 Olsen-P 浓度 50 ～ 70 mg/kg 是一个大致的淋失临界指标[25]。全国 13 个省市 23 种耕作土壤磷淋失的 Olsen-P 临界值为 29.96 ～ 156.78 mg/kg[15]，杭州市郊菜田土壤磷素淋失的 Olsen-P 临界值为 76.19 mg/kg[1]，长沙市郊菜田为 80 mg/kg[13]。本文根据土柱渗漏水硝态氮或总磷浓度增加速率的动态特征，提出双速率转折点建模方法，求得福建菜田土壤硝态氮和 Olsen-P 的双速率转折点指标 X_0 分别为 76.3 mg/kg 和 42.8 mg/kg，与现有的其它区域研究结论有大致相似的临界指标范围。

目前，类似研究大多采用两段线性建模法建立土壤硝态氮和 Olsen-P 临界值指标[1, 13-15]。本研究若根据该法可得到图 2 的回归直线，表明土壤硝态氮和 Olsen-P 的临界指标分别为 142.7 mg/kg 和 147.8 mg/kg，结果远高于表 4 的 X_0。依此指标，福建菜田土壤硝态氮和 Olsen-P 含量超过该临界指标的土样数分别只有 7.9% 和 12.7%，显然明显低估了菜田氮、磷环境风险[26]。结果表明，当样品点数较少且分布趋势较好时，两段线性建模法确是一种有效方法，但当样品点数较多时，采用双速率转折点建模法则更为适宜。

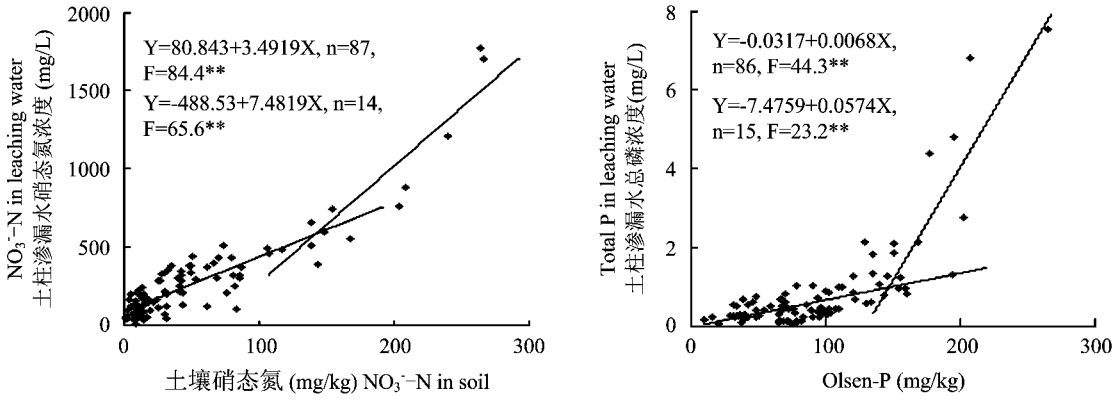

图 2　土壤硝态氮和 Olsen-P 含量对土柱渗漏水硝态氮和总磷浓度的线性回归分析

Fig. 3　Two-stage linear model between NO_3^--N and Olsen-P content in soil and their NO_3^--N and total P in leakage water of earth pillar

3.2 菜田土壤氮、磷积累状况和流失潜力

农田土壤氮、磷流失必须同时满足二个条件，即土壤中大量氮、磷积累和土壤水分运动。影响这两个条件之一的任何因素，都将影响氮、磷淋溶的发生与否及其程度。但在同一个农业流域内，由于气候等条件相对一致，土壤氮、磷积累状况是影响氮、磷淋失差异的主要原因。由于长期大量施肥，浙北平原种植蔬菜 6 ～ 10 年的菜田耕层土壤硝态氮含量达到 50.18 mg/kg[16]，山西关中黄土区 15 年以上菜园土壤硝态氮积累量达到 680 kg/hm^2[27]；浙北平原种植蔬菜 6 ～ 10 年后，菜田耕层土壤 Olsen-P 含量达到 42.2 mg/kg，长沙市郊种植 10 ～ 15 年的菜田 Olsen-P 含量平均则达 146.9 mg/kg[13]，均接近或超过农学临界指标。土壤硝态氮和有效磷过度累积，易随水淋失，对生态环境构成威胁。

蔬菜种植是福建省近 10 多年来迅速发展起来的重要农业产业，目前年种植面积已达到 70 万 hm^2 以上[28]。研究表明，福州市郊菜田地下水硝态氮含量超标（≥10 mg/L）以上的水样数量占 54.55%，总磷含量超过 V 类水质标准（0.4 mg/L）的水样数占 81.82%[26]。本研究表明，福建菜田耕层土壤硝态氮含量为 47.4 ± 55.5 mg/kg，属于较高含量水平[23]；耕层土壤 Olsen-P 含量达到 61.7 ± 43.2 mg/kg，明显高于土壤 Olsen-P 的农学指标[21]。其中，瓜果类蔬菜的土壤硝态氮和 Olsen-P 含量明显高于叶菜类和根茎类蔬菜种植地。土壤硝态氮和

Olsen-P 含量超过其双速率转折点 X_0 指标的土样数分别占 17.9% 和 81.3%，其中，瓜果类菜田则分别占到 32.3% 和 96.3%。土壤硝态氮和 Olsen-P 含量超过临界指标的菜田对氮、磷环境风险具有高度敏感性，是氮、磷面源污染控制的关键地块，瓜果类菜田是氮、磷面源污染控制的优先区域。

综上所述，菜田氮、磷淋失临界值相当于或略高于蔬菜氮、磷营养的农学指标[21]，因此在蔬菜养分管理方面，可采用土壤测定来评价土壤氮、磷淋失风险，进而根据土壤氮、磷水平，氮、磷淋失临界值和蔬菜需肥量进行合理施肥，控制化肥施用量，减少土壤中硝态氮和 Olsen-P 的积累，降低环境风险。

4 结论

460 个菜田耕层土样测定表明，土壤碱解氮含量为 128.3 ±48.1 mg/kg，Olsen-P 含量则为 61.7 ± 43.2 mg/kg；134 个代表性土样的土壤硝态氮含量为 47.4 ±55.5 mg/kg。其中，瓜果类蔬菜种植地土壤硝态氮和 Olsen-P 含量显著高于叶菜类和根茎类蔬菜种植地。

土壤硝态氮或 Olsen-P 含量与土柱渗漏水硝态氮或总磷浓度之间，满足“双速率转折点”动态特征。应用回归分析建模，得到氮、磷淋失临界指标的双速率转折点 X_0 分别为土壤硝态氮 76.3 mg/kg 和 Olsen-P 42.8 mg/kg。淋失临界值相当于或略高于满足蔬菜营养需求的农学指标。

土壤硝态氮和 Olsen-P 含量高于其 X_0 的土样数分别占 17.9% 和 81.3%，表明这些样点具有较高的氮、磷淋失潜力，是氮、磷污染控制的关键地块；瓜果类菜田土壤硝态氮和 Olsen-P 含量高于其 X_0 的土样数分别占到 32.3% 和 96.3%，淋失潜力显著高于叶菜类和根茎类菜田，是氮、磷污染控制的优先区域。

参 考 文 献：

[1] 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]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2008, 34(2): 207-213.

[2] 黄东风，邱孝煊，李卫华，等. 福州市郊蔬菜施肥现状及菜地土壤养分累积特征分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2009，38(6)：633-638.
Huang D F, Qiu X X, Li W H *et al*. Fertilization status quo and nutrient accumulation of vegetable field soil in the suburb of Fuzhou City[J]. J. Fujian Agric. For. Univ. (Nat. Sci. Edi.), 2009, 38(6): 633-638.

[3] 张维理，武淑霞，翼宏杰，Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. Ⅰ. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学，2004，37(7)：1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. 1. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(7): 1008-1017.

[4] McDowell R, Sharpley A, Brookes P *et al*. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution[J]. Soil Sci., 2001, 166(2): 137-149.

[5] 高茹，李裕元，杨蕊，等. 亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(4)：839-852.
Gao R, Li Y Y, Yang R *et al*. Study on nitrate leaching characteristics in arable soils in subtropical region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(4): 839-852.

[6] Brock E H, Ketterings Q M, Kleinman P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application[J]. Nutr. Cycl. Agroeco., 2007, 77: 269-281.

[7] Sims J T, Maguire R O, Leytem A B *et al*. Evaluation of mehlich Ⅲ as an agri-environmental soil phosphorus test for the mid-Atlantic United States of America[J]. J. Environ. Qual., 2002, 31: 2016-2032.

[8] Casson J P, Bennett D R, Nolan S C *et al*. Degree of phosphorus saturation thresholds in manre-amended soils of Alberta[J]. J. Environ. Qual., 2006, 35: 2212-2221.

[9] Nair V D, Portier K M, Graetz D *et al*. An environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils[J]. J. Environ. Qual., 2004, 33: 107-113.

[10] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R *et al*. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. J. Environ. Qual., 1995, 24: 904-910.

[11] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 105-110.

[12] 张慧敏，章明奎. 稻田土壤磷淋失潜力与磷积累的关系[J]. 生态与农村环境学报，2008，24(1)：59-62.
Zhang H M, Zhang M K. Relationship between leaching potential and accumulation of phosphorus in paddy soil[J]. J. Eco. Rural Environ., 2008, 24(1): 59-62.

[13] 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]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43

(9)：1843-1851.

[14] 吕家珑，Fortune S，Brooke P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. 农业环境科学学报，2003，22(2)：142-146.
Lü J L, Fortune S, Brooke P C. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “shreshold volume”[J]. J. Agro-environ. Sci., 2003, 22(2): 142-146.

[15] 钱晓英，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.
Qian X Y, Zhao X R, Bao H J *et al*. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. I. Leaching criterion[J]. Acta Ecol. Sni., 2004, 24 (10) : 2275-2280.

[16] 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.
Li A F, Zhang M K. Accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in vegetable soils with different plantation history in Northern Zhejiang[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2010, 29(1): 122-127.

[17] Van Der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27(1): 4-11.

[18] 章明奎，周翠，方利平. 蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2006，12 (4) : 544-554.
Zhang M K, Zhou C, Fang L P. Phosphorus saturation degree of soils on vegetable farms and its effects on soil phosphorus release potential and water quality[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12 (4): 544-554.

[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000. 146-196.
Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 2000. 146-196.

[20] 孔庆波,姚宝全,章明清,等. 福建主要蔬菜氮磷钾营养特性及其施肥指标体系研究. Ⅲ. 氮磷钾最佳用量和比例. 福建农业学报，2011，26(4)：620-626.
Kong Q B, Yao B Q, Zhang M Q *et al*. Nutritive characters and fertilization index of nitrogen, phosphor, potassium for major vegetable species in Fujian Ⅲ. The optimum amount and ratio of N, P and K for application[J]. Fujian J. Agricu. Sci., 2011, 26(4): 620-626.

[21] 李娟，章明清，姚宝全，等. 福建主要蔬菜氮磷钾营养特性及其施肥指标体系研究. Ⅱ. 主要蔬菜氮磷钾施肥效应及其土壤养分丰缺指标[J]. 福建农业学报,2011,26(3)：432-439.
Li J, Zhang M Q, Yao B Q *et al*. Nutrition characteristics and fertilization index of nitrogen, phosphor and potassium for major vegetables in Fujian. Ⅱ. Vegetable response to fertilizations and available NPK fertilization indices of garden soil[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2011, 26(3): 432-439.

[22] 徐志平，姚宝全，章明清，等. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究Ⅰ. 土壤基础肥力对作物产量的贡献率及其施肥效应[J]. 福建农业学报，2008，23(4)：396-402.
Xu Z P, Yao B Q, Zhang M Q *et al*. Soil testing and fertilizer formulation for major crops in Fujian. Ⅰ. Effects of soil condition and fertilization on crop yield[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2008, 23(4): 396-402.

[23] 崔振岭，陈新平，张福锁，等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量[J]. 应用生态学报，2007，18(10)：2227-2232.
Cui Z L, Chen X P, Zhang F S *et al*. Appropriate soil nitrate N content for a winter wheat/summer maize rotation system in North China Plain[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(10): 2227-2232.

[24] Van Der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Nethlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27(1): 4-11.

[25] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥，2003，18(1)：4-8.
Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. Phosph. Comp. Fert., 2003, 18(1): 4-8.

[26] 黄东风,邱孝煊,李卫华,等. 福州市郊菜地氮磷面源污染现状分析与评价[J]. 农业环境科学学报，2009，28(6)：1191-1199.
Huang D F, Qiu X X, Li W H *et al*. Testing and evaluation of N and P non-point source pollution status quo of vegetable fields at the suburb of Fuzhou City[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2009,28(6): 1191-1199.

[27] 巨晓棠,张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境，2003，12(1)：24-28.
Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(1): 24-28.

[28] 苏林. 福建经济与社会统计年鉴(第二卷)[M]. 福州：福建人民出版社,2008 .
Su L. Statistics yearbook for economy and society of Fujian province (2nd vol.)[M]. Fujian: People Press, 2008.