植物营养与肥料学报 2016,22(4):958-964 doi: 10.11674/zwyf.15245
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同施磷量对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响

兰 翔[1], 王 婷[1], 杨春玲[1], 胡承孝[1,2], 谭启玲[1,3]*, 孙学成[1,3]
(1 华中农业大学资源与环境学院, 湖北武汉 430070; 2 新型肥料湖北省工程实验室, 湖北武汉 430070;
3 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北武汉 430070)

摘要:【目的】在两种蔬菜地土壤上研究不同磷肥施用量对土壤硝态氮淋失的影响,为武汉城郊蔬菜合理施用磷肥和安全生产提供理论依据。**【方法】**利用大型原状土柱渗漏装置,2 种实验土壤(粉质粘土和粉质粘壤土)均为武汉城郊典型蔬菜土壤,分别采自华中农业大学校内蔬菜基地和湖北新洲。试验期间共种植了四种蔬菜(小白菜、辣椒、苋菜及萝卜)。试验设置了 4 个 P_2O_5 水平处理(0、125、250、375 kg/hm^2),氮肥施用量均为 N 750 kg/hm^2,钾肥施用量均为 K_2O 500 kg/hm^2。试验期间年降雨量为 1043.0 mm,各土柱总灌溉量为 120.1 L。秋冬季每 15 天、春夏季每 10 天收集一次淋洗液,另外根据天气和降雨情况适当调节,每次收集淋洗液时记录淋洗液体积并测定淋洗液硝态氮浓度。在每季蔬菜生长成熟后将蔬菜收获称重,烘干后测定蔬菜中氮素含量。**【结果】**1)与不施磷肥相比,施用磷肥显著增加了两种土壤上小白菜、苋菜、萝卜产量以及四季蔬菜总产量,其产量随磷肥施用量增加而增加或显著增加,在磷肥施用量最大时产量达到最大值。粉质粘土上的产量显著低于粉质粘壤土上的产量,粉质粘壤土总产量约是粉质粘土总产量的 1.63 ~ 2.36 倍。2)施用磷肥显著增加了小白菜、苋菜氮素吸收累积量以及四季蔬菜总吸收累积量,且两种土壤上总氮素吸收累积量均在磷肥施用量最大时达到最大值。粉质粘壤土上氮素总吸收累计量显著高于粉质粘土上氮素总吸收累积量。3)磷肥水平对土壤总渗漏液体积并无显著影响(粉质粘壤土 $P_2O_5$125 kg/hm^2 处理除外),粉质粘土渗漏水量显著大于粉质粘壤土。4)施用磷肥降低或显著降低土壤淋失液硝态氮浓度(粉质粘土苋菜季除外),随着磷肥施用量的增加硝态氮淋失浓度不断降低,4 季蔬菜平均淋失浓度最大降低了 38.6%(粉质粘土)和 28.8%(粉质粘壤土)。5)磷肥施用显著降低了两种土壤上硝态氮淋失量(苋菜季除外),且在粉质粘土上随着磷肥施用量的增加硝态氮淋失量不断降低,而在粉质粘壤土上硝态氮淋失量先降低后上升。粉质粘土硝态氮淋失量显著大于粉质粘壤土,磷肥施用降低硝态氮淋失量分别达到达 26.4% ~ 33.7% 和 23.5% ~ 39.9%。**【结论】**磷肥施用增加了蔬菜产量和作物氮素吸收累积量,从而显著降低了两种土壤上硝态氮的淋失;土壤质地对硝态氮淋失有较大影响,质地较轻的粉质粘壤土硝态氮淋失显著小于质地较重的粉质粘土;粉质粘壤土上施用 P_2O_5 量为 250 kg/hm^2 时能提高产量同时减少硝态氮淋失,而粉质粘土上施用 P_2O_5 量为 375 kg/hm^2 时能获得较大产量和较少硝态氮淋失量。

关键词: 原状土柱;磷;硝态氮淋失
中图分类号: S155.4$^+$1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)04-0958-07

Effect of different phosphorus application rates on soil nitrate leaching in vegetable fields

LAN Xiang[1], WANG Ting[1], YANG Chun-ling[1], HU Cheng-xiao[1,2], TAN Qi-ling[1,3]*, SUN Xue-cheng[1,3]
(*1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer, Wuhan 430070, China; 3 Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*)

Abstract:【Objectives】 The effect of different phosphorus application rates on nitrate leaching was studied in two vegetable soils of Wuhan in order to provide theoretical evidence for optimum phosphate fertilization practice and to secure the safety of vegetables.**【Methods】** The experiment was carried out on undisturbed soil core with two soils

收稿日期: 2015-05-22 **接受日期:** 2015-09-28
基金项目: 农业部引进国际先进农业科学技术(948)项目(2008-Z25, 2014-Z22)资助。
作者简介: 兰翔(1991—),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事施肥与环境生态研究。E-mail: lanx@webmail.hzau.edu.cn
* 通信作者 E-mail: qltan@mail.hzau.edu.cn

(silty clay and silty clay loam) collected from vegetable fields of Huazhong Agricultural University and Xinzhou Hubei, respectively. Both soils were common vegetable soil in Wuhan suburb areas, and four different vegetable species (Chinese cabbage, pepper, amaranth and radish) were selected and planted under continuous cropping according to their seasonal adaptability. Four phosphorus (P) application rates as P_2O_5 (0, 125, 250 and 375 kg/hm^2) were applied, and the application rates of nitrogen (N) and potassium (K) in all treatments were N 750 kg/hm^2 and K_2O 500 kg/hm^2, respectively. Precipitation was 1043.0 mm per year and the irrigation volume was 120.1 L per year during the experimental period. Leachate was normally collected every 15 days in autumn and winter, and every 10 days in spring and summer, while it was also collected depending on the precipitation. Volumes were recorded and NO_3^- concentration was determined in the leachate. After harvesting, vegetables were weighed and total N concentration in vegetables (dry weight basis) was determined. **【Results】** 1) Phosphorus application significantly increased the yield of all four vegetables, compared with no P application. Yield on silty clay was significantly lower than that on silty clay loam, which was about 1.63 -2.36 times different. 2) Nitrogen uptake in Chinese cabbage, amaranth and total N accumulation of four vegetables increased significantly with increasing of P application rate. N accumulation in silty clay loam was markedly higher than that in silty clay. 3) Different P application rates did not affect the total volume of leachate (except 125 kg/hm^2 treatment in silty clay loam) with higher amount on silty clay than that on silty clay loam. 4) Phosphorus application decreased or significantly decreased NO_3^- concentration in leachate (except amaranth on silty clay) with the effect increased with increasing P application rate. On average, NO_3^- concentration of four vegetables decreased by 38.6% (silty clay) and 28.85% (silty clay loam), respectively. 5) Total amount of nitrate leaching for all vegetables (except amaranth) decreased with P application. It decreased with increasing P application rate on silty clay, but on silty clay loam, it dropped firstly and then increased. Total amount of leached nitrate was higher on silty clay than on silty clay loam, it was decreased by 26.4% -33.7% and 23.5% -39.9% with P application in the two soils, respectively. **【Conclusions】** Phosphorus application increases vegetables production and N accumulation, thus decreasing the amount of NO_3^- leaching in both two soils. Soil texture is an important factor which affects NO_3^- leaching in which the amount of NO_3^- leaching is remarkably lower in silty clay loam than in silty clay. It is concluded that the application of P_2O_5 250 kg/hm^2 in silty clay loam can increase vegetable yield and decrease NO_3^- leaching, while in silty clay soil P_2O_5 375 kg/hm^2 is the recommended application rate.

Key words: undisturbed soil core; phosphorus; nitrate leaching

土壤硝态氮不易被土壤胶体吸附,易随水淋洗,是旱地土壤中氮素损失的重要途径之一[1]。影响硝态氮淋失的因素很多,土壤质地、通气性、有机质含量、灌溉、施肥等均影响着农田硝态氮的淋溶[2-11]。如粘壤土氮素淋失量仅为施氮量的5.7%～9.6%,而砂壤土氮素淋失量可达施氮量的6.2%～30.4%,这表明在通透性好的砂壤土中氮素更易发生淋溶损失[5]。长期肥料定位试验表明施用磷肥使土壤中有机质含量增加了2.9% ～6.2%[12],同时长期合理施用磷肥可以显著提高作物的吸氮量[13],而薛晓辉等[14]在小麦上研究表明,科学合理地配施磷肥可以减少硝态氮淋失,但是关于不同磷肥施用量对蔬菜地土壤硝态氮淋失影响的研究报道较少。本试验利用大型原状土柱系统,以武汉郊区典型菜地土壤(粉质粘土和粉质粘壤土)为供试土壤,研究了在当地常见蔬菜连作模式下不同施磷量对蔬菜地硝态氮淋失的影响,为城郊蔬菜种植提供科学的施肥指导,并为减少菜地硝态氮淋失提供一定的理论依据。

1　材料和方法

1.1　试验地概况

试验在华中农业大学进行,试验期间年降雨量1043.0 mm。供试作物为小白菜、辣椒、苋菜、萝卜,供试土壤为粉质粘壤土和粉质粘土,粉质粘土取自华中农业大学校内蔬菜基地,粉质粘壤土取自湖北新洲,均采自多年种植蔬菜大棚内,土壤的基本性质如表1所示。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils

土壤质地 Soil texture	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Avail. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	有机质 OM (g/kg)	pH	田间持水量(%) Field water holding capacity	容重 Bulk density (g/cm^3)
粉质粘土 Silty clay	0.94	103.47	14.97	25.68	5.9	31.26	1.39
粉质粘壤 Silty clay loam	0.97	109.15	56.36	25.74	5.0	37.20	1.32

1.2 试验设计

试验所用土柱直径为610 mm,深度为700 mm,表面积为0.29 m^2。两种土壤各有12个土柱。分别种植小白菜、辣椒、苋菜、萝卜四季蔬菜。供试肥料为尿素、磷酸二氢钾和硫酸钾,各处理氮、钾肥施用水平一致,全年施用总量为N 750 kg/hm^2、K_2O 500 kg/hm^2,根据各季蔬菜的不同生长规律确定每季蔬菜的施肥量及底追肥比例。试验设4个P_2O_5水平,以不施磷为对照(P_0),以P_2为适宜施磷量,磷的1/2为低磷处理(P_1),磷的1.5倍为高磷处理(P_3),具体分配到各种蔬菜上的养分量和磷肥总量见表2,每个处理3次重复。试验期间根据土壤水分状况和作物生长情况进行灌溉,各土柱总灌溉量均为120.1 L。

表2 供试蔬菜生长周期及施肥设置

Table 2 Life cycle and fertilizer application rate for each vegetable

供试蔬菜 Vegetable	生长周期 Life cycle	N (kg/hm^2)	P_2O_5 (kg/hm^2)				K_2O (kg/hm^2)
			P_0	P_1	P_2	P_3	
小白菜 Chinese cabbage	2007/11/03～2008/04/18	180	0	30	60	90	120
辣椒 Pepper	2008/04/19～2008/08/04	270	0	45	90	135	180
苋菜 Amaranth	2008/08/05～2008/09/06	120	0	20	40	60	80
萝卜 Radish	2008/09/07～2008/11/27	180	0	30	60	90	120
	合计 Total	750	0	125	250	375	500

注(Note):表中所示"生长周期"包括本季作物生长时间和后茬作物播种前休闲时间"Life cycle" in the table includes vegetable growth period and the fallow period before next vegetable is planted.

1.3 取样与测定方法

1.3.1 样品采集 秋冬季每15天、春夏季每10天收集一次淋洗液,另外根据天气和降雨情况适当调节。采集样品时将桶内水样混匀,量取各次淋失体积,并采集适量样品带回实验室,过滤后冰冻保存。

小白菜和苋菜一次收获全部植株,在保证主根完整的情况下将包括根系在内的全部植株小心从土壤中拔取,将根部土清洗干净,各处理分别称鲜重,105℃杀青30 min,60℃烘干至恒重,记录干重。

辣椒果实分五次收获,从第一批果实成熟饱满开始,每隔半个月收获一批,称鲜重,烘干,记录干重。最后将辣椒植株全部收获,称鲜重,烘干,称干重。萝卜收获时,将块根与叶子分开称鲜重,烘干,记录干重。

1.3.2 分析方法 淋洗液硝态氮含量采用FIAstar5000流动注射分析仪测定,植株全氮以$H_2SO_4-H_2O_2$消化后FIAstar5000流动注射分析仪测定,土壤全氮用凯氏定氮法测定,土壤pH采用酸度计(梅特勒-托利多:FE20)测定,土壤碱解氮采用碱解-扩散法测定,土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热测定,土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,土壤容重及土壤田间持水量采用环刀法测定,土壤质地用比重计法测定。

降雨量、大气沉降量用武汉市天虹智能仪表厂的APS-2型降水降尘自动采样器采集,记录每次降雨量,采集降水样品,收集降尘,与其他样品一起进行测定分析计算大气沉降硝态氮量作为系统的沉降氮源。

作物氮素累积量是作物根系和地上部各组织的氮素累积量的总和,各组织的氮素累积量是指干物质氮素含量和干物质重的乘积。土壤硝态氮平均淋

失浓度是指硝态氮累积淋失量和总淋失体积的比值。

1.4　统计方法

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理与分析，LSD 法对土壤和磷水平进行多重比较。

2　结果与分析

2.1　不同施磷量对各蔬菜产量的影响

两种土壤上不同蔬菜对磷施用量的反应不同（图 1）。在粉质粘土上，小白菜、苋菜、萝卜产量以及四季蔬菜总产量均随着磷肥施用量的增加而显著增加，但磷肥施用量对辣椒产量影响不显著；在粉质粘壤土上，小白菜、苋菜、萝卜的产量以及四季蔬菜总产量均随着磷肥施用量的增加而增加，其中小白菜产量增加显著，而苋菜和萝卜的产量在高磷时增加不再显著，即施磷能显著促进苋菜和萝卜产量增加，但过量的磷对苋菜和萝卜产量增加不显著，磷肥施用量对辣椒产量影响同样不显著；对比两种土壤上蔬菜的产量可以看出，粉质粘壤土上的小白菜、辣椒、萝卜的产量以及总产量显著高于粉质粘土上的各蔬菜产量和总产量，尤其辣椒的产量在两种土壤上的差距很大。

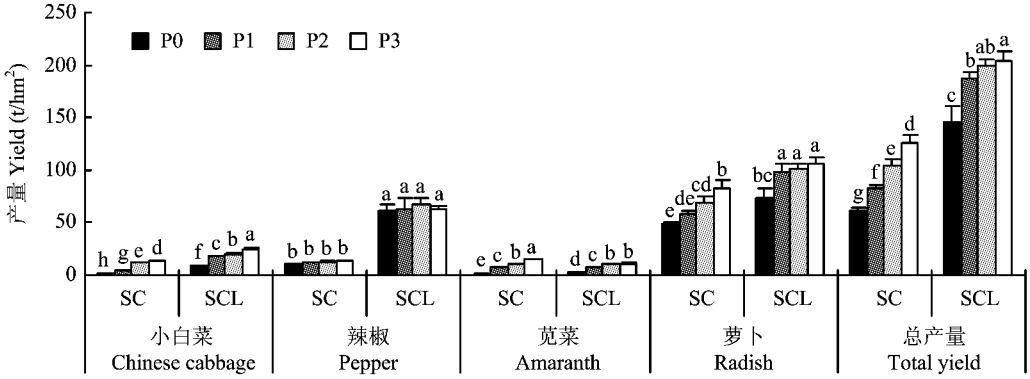

图 1　不同磷肥水平对各季蔬菜产量的影响

Fig. 1　Effect of phosphorus application rates on vegetable yield

［注（Note）：SC—粉壤粘土 Silty clays；SCL—粉质粘壤土 Silty clay loam.

柱上不同字母表示处理间差异显著性达 5% 水平 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.］

2.2　不同施磷量对各蔬菜氮吸收量的影响

图 2 表明，不同磷肥水平下粉质粘壤土上各季作物氮素吸收量均显著高于粉质粘土，且在辣椒上表现最为明显；小白菜和萝卜氮肥施用量相同，但萝卜氮素累积量显著高于小白菜氮素累积量，且萝卜氮素累积量已接近氮肥施入量，其原因是萝卜种植前土壤中残留有大量氮素，其在粉质粘土和粉质粘壤土中的氮素残留量分别为 116 ～ 129 mg/kg 和 120 ～ 132 mg/kg（未列出），说明萝卜对养分需求量很大；小白菜和苋菜氮素累积量随着磷肥施用量的增加而上升，而辣椒和萝卜氮素累积量没有受到磷肥施用的影响；磷肥施用显著增加了四种蔬菜氮素累积总量，但不同磷肥处理之间氮素累积量差异不显著。分析各蔬菜氮素含量表明，与不施磷肥相比，磷肥施用降低了蔬菜氮含量，这是由磷肥施用引起的稀释效应造成的，但是不同磷肥施用量处理间氮素含量没有差异（未列出），因此可以判断磷肥施用主要是通过增加产量而增加氮素吸收量的（图 2）。

2.3　不同施磷量对土壤渗漏水量的影响

由图 3 可知，粉质粘土水分的渗漏量显著大于粉质粘壤土；粉质粘土不同磷肥处理之间渗漏水量没有显著性差异；而在粉质粘壤土上，小白菜，苋菜，萝卜季不同处理渗漏水量有显著性差异，但是在不同作物季表现出来的差异是不一致的，对于累积渗漏水量而言，P_0 处理渗漏水量最大，显著高于渗漏水量最低的 P_1 处理，其余处理间没有显著性差异，说明磷肥施用能显著减少渗漏量，但不同施磷量对渗漏量影响不显著。

2.4　不同施磷量对土壤硝态氮平均淋失浓度的影响

由图 4 可知，粉质粘土的硝态氮淋失浓度始终高于粉质粘壤土（除小白菜季），在两种土壤中均为不施磷处理的硝态氮淋失浓度显著高于其他处理（除粉质粘壤土苋菜季）。随着施磷量的增加，粉质粘土硝态氮淋失浓度有下降趋势，而粉质粘壤土则在辣椒、萝卜季降低或显著降低硝态氮淋失浓度，

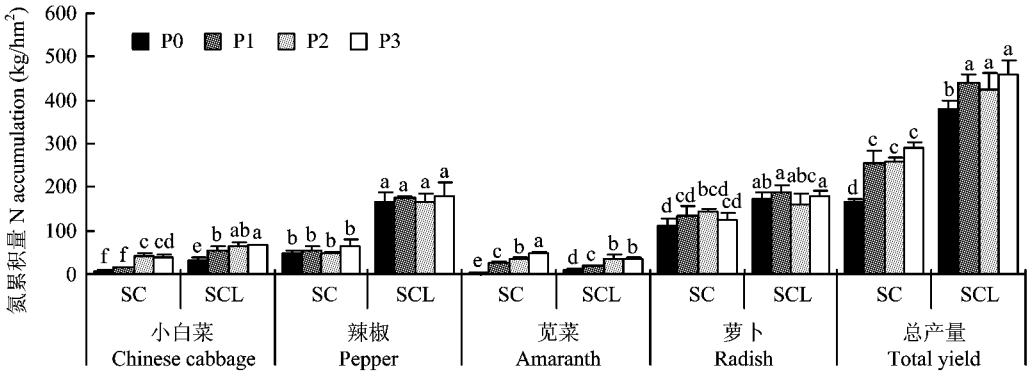

图2 不同磷肥水平对各季蔬菜氮素吸收量的影响

Fig. 2 Effect of phosphorus application rates on nitrogen accumulation amount of different vegetables

[注(Note): SC—粉壤粘土 Silty clays; SCL—粉质粘壤土 Silty clay loam.

柱上不同字母表示处理间差异显著性达5%水平 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.]

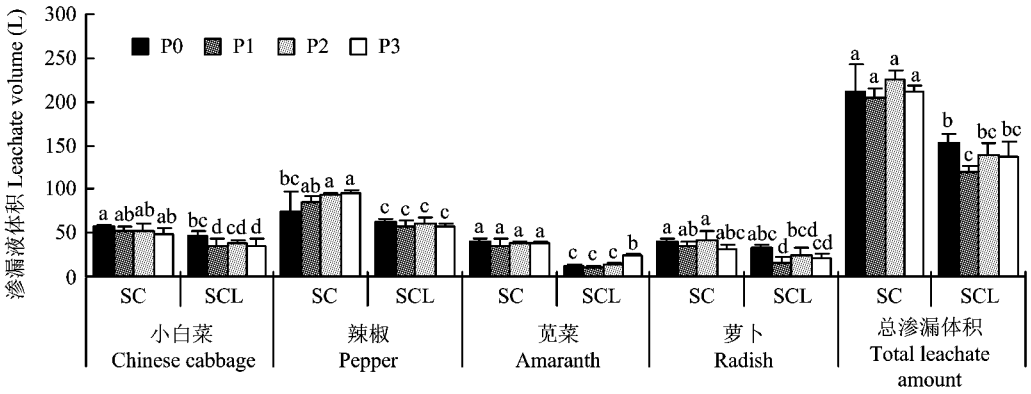

图3 不同磷肥水平对各季蔬菜渗漏液体积的影响

Fig. 3 Effect of phosphorus application rates on leachate volume of different vegetables

[注(Note): SC—粉壤粘土 Silty clays; SCL—粉质粘壤土 Silty clay loam.

柱上不同字母表示处理间差异显著性达5%水平 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.]

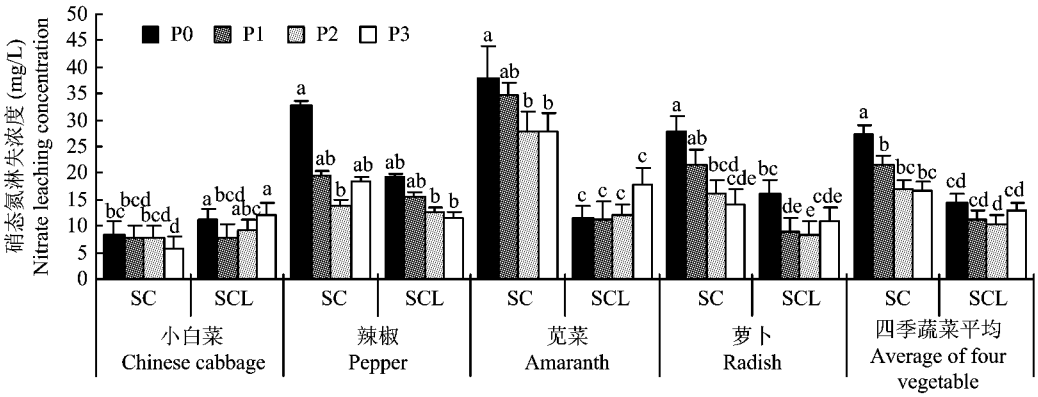

图4 不同磷肥水平对各季蔬菜 NO_3^--N 年平均淋失浓度的影响

Fig. 4 Effect of phosphorus application rates on the concentration of leached NO_3^--N in different vegetable soils

[注(Note): SC—粉壤粘土 Silty clays; SCL—粉质粘壤土 Silty clay loam.

柱上不同字母表示处理间差异显著性达5%水平 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.]

说明随着磷肥的施用以及施用量的增加，可以显著降低或降低硝态氮淋失浓度。在粉质粘土上的 4 种蔬菜中，硝态氮淋失浓度最高的是苋菜，其平均淋失浓度达到了 32.84 mg/L，远大于粉质粘壤土苋菜季的硝态氮平均淋失浓度 12.45 mg/L；粉质粘土上硝态氮淋失浓度最低的是小白菜，平均淋失浓度只有 7.07 mg/L，略低于粉质粘壤土小白菜的平均淋失浓度 9.52 mg/L；而粉质粘土萝卜季和辣椒季的硝态氮淋失浓度基本相同，且均高于粉质粘壤土上相应蔬菜季的硝态氮淋失浓度（图 4）。

2.5　不同施磷量对土壤硝态氮淋失总量的影响

由图 5 可知，随着磷肥的施用及施用量的增加，粉质粘土硝态氮淋失总量呈下降趋势，其中 P_2、P_3 水平显著低于不施磷处理，不施磷处理硝态氮淋失量达 192.99 kg/hm^2，占化学氮肥施入量的 25.72%；而粉质粘壤土硝态氮含量则是先下降后升高的趋势，但均未达显著水平，P_0 淋失量最大，占到纯氮施入量的 11%。粉质粘土各处理硝态氮累积淋失量均大于粉质粘壤土，粉质粘土上 P_0、P_1、P_2、P_3 处理年累积淋失量达到粉质粘壤土上的 2.5 倍左右，这主要是由两种土壤的速效磷含量差异引起的（图 5）。

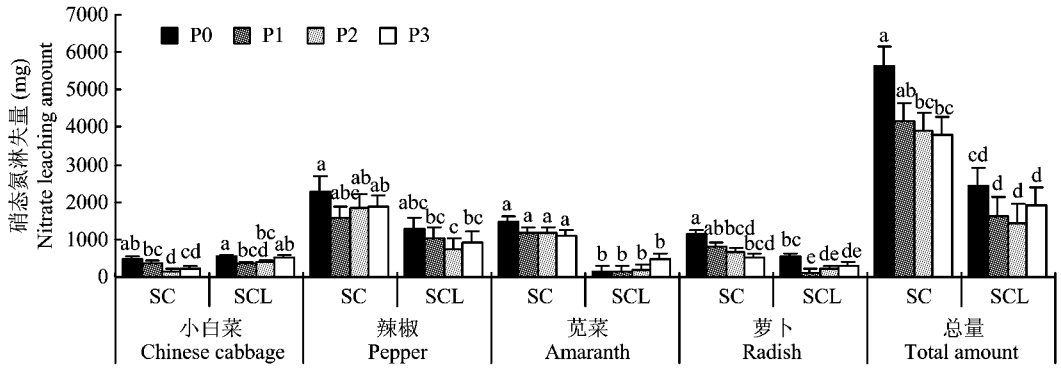

图 5　不同磷肥水平对各季蔬菜 NO_3^--N 年累积淋失量的影响

Fig. 5　Effect of phosphorus application rates on total amount of NO_3^--N leaching in different vegetable soils

［注（Note）：SC—粉壤粘土 Silty clays；SCL—粉质粘壤土 Silty clay loam.
柱上不同字母表示处理间差异显著性达 5% 水平 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 5% level.］

3　讨论

研究结果表明，两种土壤上施用磷肥均显著增加了蔬菜产量，且粉质粘土上产量随着磷肥施用量增加而显著增加，而在粉质粘壤土上产量随着磷肥施用量增加呈先增加后保持稳定，这是因为粉质粘壤土基础速效磷含量较高，少量磷肥就可以满足蔬菜生长对磷肥的需求，进一步增加磷肥施用量对作物产量就不再有促进作用。对比两种土壤上的蔬菜产量可以看出，粉质粘土上的产量显著低于粉质粘壤土上的产量，这可能是由于两种土壤的质地不同引起的，米艳华等[15]认为在质地较轻、通透性较好的土壤上种植娃娃菜比在质地重、通透性弱的土壤上能获得更多的产量。

本研究结果表明，不同磷肥施用量作物氮素累积量差异显著，两种土壤上小白菜季随着磷肥施用量的增加作物氮吸收量显著增加，土壤硝态氮淋失量则显著降低，其他蔬菜季氮素吸收积累多的，相应的土壤硝态氮的淋失量明显下降。磷肥施用显著增加了四季蔬菜氮素总吸收累积量，土壤总硝态氮淋失量则显著降低，且在粉质粘壤土上施用磷肥（P_2O_5）250 kg/hm^2 时硝态氮淋失量最低，粉质粘土上施磷（P_2O_5）375 kg/hm^2 时硝态氮淋失量最低。粉质粘壤土上的氮素累积量均显著大于粉质粘土，硝态氮淋失量则显著小于粉质粘土。这一结果说明磷肥可显著增加作物的氮累积量，而显著降低硝态氮的淋失量，且在土壤质地较轻、通透性较好的土壤上淋失量较质地重、通透性弱的土壤上淋失量小。

不同质地土壤的水分淋失量不同。粉质粘土渗漏水量较粉质粘壤土高，这是因为土柱外壁阻止了水分地表径流，而粉质粘壤土的田间持水量比粉质粘土的大，在水分输入相同时，粉质粘壤土能吸附的水分更多，同时粉质粘壤土的通气性好，水分蒸发量更大，因此粉质粘土渗漏水量比粉质粘壤土渗漏量大，相同结果也出现在樊羿[16]的研究中。

粉质粘壤土上各季硝态氮淋失浓度均低于国家地下水饮用标准 20 mg/L[17]，而粉质粘土上不施磷

肥处理以及苋菜季所有处理上硝态氮淋失浓度均大于20 mg/L,说明粉质粘壤土硝态氮淋失对人类健康潜在危害比粉质粘土小。

4 结论

磷肥施用增加了蔬菜产量和作物氮素吸收累积量,从而显著地降低了两种土壤上硝态氮的淋失量;土壤质地对硝态氮淋失有较大影响,质地较轻的粉质粘壤土上硝态氮淋失显著小于质地较重的粉质粘土;粉质粘壤土上施用 P_2O_5 量为250 kg/hm^2 时能提高产量同时减少硝态氮淋失,而粉质粘土上施用 P_2O_5 量为375 kg/hm^2 时能获得较大产量和较小硝态氮淋失。

参考文献:

[1] 张炎,史军辉,李磐,等.农田土壤氮素损失与环境污染[J].新疆农业科学,2004,41(1):57-60.
Zhang Y, Shi J H, Li P, *et al*. Nitrogen loss accesses in the soil and its effects to environment pollution[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2004, 41(1): 57-60.

[2] 王继红,刘景双,李月芬,等.氮磷肥对黑土浅层土壤氮素累积和移动的影响[J].土壤通报,2005,36(3):341-344.
Wang J H, Liu J S, Li Y F, *et al*. The effect of nitrogenous and phosphorus fertilizers on accumulation and movement of nitrogen in shallow layer of dark soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 341-344.

[3] 韩晓日,郭鹏程,陈恩凤,邹德乙.长期不同施肥对氮肥利用率的影响[J].土壤肥料,1997,(5):12-15.
Han X R, Guo P C, Chen E F, Zou D Y. The effect of long term different fertilization on nitrogen use efficiency[J]. Soils and Fertilizers, 1997, (5): 12-15.

[4] 于红梅,李子忠,龚元石.不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响[J].中国农业科学,2005,38(9):1849-1855.
Yu H M, Li Z Z, Gong Y S. Leached nitrate in vegetable field under different water and nitrogen fertilizer management practices[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(9): 1849-1855.

[5] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, Li S X. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: a soil column method[J]. Pedosphere, 2006, 16(2): 245-252.

[6] 纪雄辉,郑圣先,聂军,等.稻田土壤上控释氮肥的氮素利用率与硝态氮的淋溶损失[J].土壤通报,2007,38(3):467-471.
Ji X H, Zheng S X, Nie J, *et al*. Nitrogen recovery and nitrate leaching from a controlled release nitrogen fertilizer in an irrigated paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(3): 467-471.

[7] 左海军,张奇,徐力刚.农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J].环境污染与防治,2008,(12):83-89.
Zuo H J, Zhang Q, Xu L G. Factors affect nitrogen leaching and its countermeasures[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, (12): 83-89.

[8] 阮晓红,王超,朱亮.氮在饱和土壤层中迁移转化特征研究[J].河海大学学报,1996,24(2):51-55.
Ruan X H, Wang C, Zhu L. Migration and transformation of nitrogen in water logged aeration zone of soil[J]. Journal of Hehai University, 1996, 24(2): 51-55.

[9] 张玉铭,胡春胜,董文旭.农田土壤 N_2O 生成与排放影响因素及 N_2O 总量估算的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):124-128.
Zhang Y M, Hu C S, Dong W X. The influencing factors of production and emission of N_2O from agricultural soil and estimation of total N_2O emission[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2004, 12(3): 124-128.

[10] 袁新民,王周琼.硝态氮的淋洗及其影响因素[J].干旱区研究,2000,17(4):46-52.
Yuan X M, Wang Z Q. Nitrate nitrogen leaching and factors influencing it[J]. Arid Zone Research, 2000, 17(4): 46-52.

[11] 王吉苹.农田土壤氮素渗漏淋失研究进展[J].四川环境,2014,33(6):118-125.
Wang J P. Research progress of nitrogen leaching in farmland soil[J]. Sichuan Environment, 2014, 33(6): 118-125.

[12] 汪红霞,廖文华,孙伊辰,等.长期施用有机肥和磷肥对潮褐土土壤有机质及腐殖质组成的影响[J].中国土壤肥料,2014,(6):39-43.
Wang H X, Liao W H, Sun Y C, *et al*. Effects of long-term application of organic manure and phosphate fertilizer on soil organic matter and humus composition[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014, (6): 39-43.

[13] 张少民,郝明德,柳燕兰.黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):159-163.
Zhang S M, Hao M D, Liu Y L. Effects of long-term application of P fertilizer on the yield of winter wheat and characteristic of N absorption and soil fertility in dryland of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A &F University (Nat. Sci. Ed.), 2007, 35(7): 159-163.

[14] 薛晓辉,郝明德.小麦氮磷肥长期配施对土壤硝态氮淋溶的影响[J].中国农业科学,2009,42(3):918-925.
Xue X H, Hao M D. Nitrate-N leaching in 23-year winter wheat field combined with application of nitrogen and phosphorus[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 918-925.

[15] 米艳华,陆琳,刘宏程,等.土壤质地对高山娃娃菜(*Brassica pekinensis*)产量和品质的效应分析[J].西南农业学报,2012,25(4):1347-1351.
Mi Y H, Lu L, Liu H C, *et al*. Effect of soil texture on yield and quality of Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*)[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(4): 1347-1351.

[16] 樊羿.有机肥资源利用现状调查与施用有机肥对土壤环境的影响[D].郑州:河南农业大学博士学位论文,2006.
Fan Y. The state of organic manure utilization in present and its effects to soil environment[D]. Zhengzhou: PhD Dissertation of Henan Agricultural University, 2006.

[17] GB/T148482-93. 地下水质量标准[S].
GB/T148482-93. Quality standard for ground water[S].