

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

李艾芬¹, 章明奎²

(1.浙江省嘉兴市南湖区农业经济局, 浙江 嘉兴 314001; 2.浙江大学环境与资源学院资源科学系, 浙江 杭州 310029)

摘要:长期过量施肥可导致蔬菜地土壤养分大量累积、养分利用效率下降和环境污染风险增加。以浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤为研究对象,采用化学测试方法研究了菜地土壤氮和磷的积累及其淋失潜力的变化。结果表明,随着种植年限的增加,蔬菜地土壤全磷、有效磷(Olsen P)和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈明显的积累;蔬菜种植年限为<2、2~5、6~10、11~20、20~30和>30 a的表土全P平均分别为0.66、0.75、1.07、1.49、2.40和2.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效P平均分别为13.2、37.8、42.2、70.2、137.9和101.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均分别为9.15、13.58、50.18、46.48、73.28和74.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时土壤N和P垂直下移渐趋明显。土壤水溶性磷含量随土壤有效磷(Olsen P)积累的变化存在一个明显的突变点,相对应的土壤Olsen P临界值约为60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着种植年限增长,蔬菜地地表径流中氮和磷浓度呈明显增加,利用年限为20~30 a的蔬菜地径流中可溶性P和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分别约为利用年限<2 a蔬菜地的13.12和9.48倍。研究认为,长期超量施肥已导致这一地区蔬菜地土壤养分的过度积累,在蔬菜生产中应重视和提倡平衡施肥,控制土壤氮磷的积累。

关键词:蔬菜地土壤;氮和磷积累;淋失

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)01-0122-06

Accumulation and Environmental Risk of Nitrogen and Phosphorus in Vegetable Soils with Different Plantation History in Northern Zhejiang

LI Ai-fen¹, ZHANG Ming-kui²

(1.Nanhu Agricultural and Economic Bureau, Jiaxing 314001, China; 2.Department of Natural Resource Science, College of Natural Resource and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The losses of phosphorus(P) and nitrogen(N) from agriculture to waters have increased over the past few decades as a result of increased intensive farming and the development of a more industry-based type of agriculture. Long-term application of P and N with chemical fertilizers and animal manure in amounts exceeding removal with crops leads to buildup of P and N in soil, reduce of nutrient use efficiency, and to increasing risk of P and N losses to surface water and eutrophication. In this paper, 51 profiles of vegetable soils with different plantation history were sampled from the northern Zhejiang, and accumulation of nitrogen and phosphorus in the soils were characterized by means of chemical methods. Environmental risks of N and P losses in the vegetable soils were evaluated. The results showed that, as increase of plantation time, accumulation of total P, available P, and $\text{NO}_3\text{-N}$ in surface soils increased significantly, and downward movement of N and P in the soils was also enhanced. Mean total P concentrations in vegetable soils with plantation times of <2, 2~5, 6~10, 11~20, 20~30, and >30 a were 0.66, 0.75, 1.07, 1.49, 2.40 and 2.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Mean Olsen P concentrations in the soils with plantation times of <2, 2~5, 6~10, 11~20, 20~30, and >30 a were 13.2, 37.8, 42.2, 70.2, 137.9, and 101.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and those of $\text{NO}_3\text{-N}$ were 9.15, 13.58, 50.18, 46.48, 73.28, and 74.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. There was a change point of soil Olsen P(60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), above which the potential of soil P release increased sharply with soil Olsen P, and dissolved P was linearly related to soil Olsen P concentrations. Concentrations of dissolved P and N increased rapidly with increasing plantation time. Concentrations of dissolved P and $\text{NO}_3\text{-N}$ in runoff from the vegetable soil with plantation times of 20~30 a were about 13.12 and 9.48 times of those from vegetable soil with plantation times of <2 a. This situation was so serious that the quality of soil and groundwater in the area was deteriorating. Growers were facing potentially disruptive regulations aimed at improving the

收稿日期:2009-06-02

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA7B06)

作者简介:李艾芬(1962—),女,浙江嘉兴人,高级农艺师,从事农村能源与土壤肥料方面的技术推广工作。

通讯联系人:章明奎 E-mail:mkzhang@zju.edu.cn

quality of both surface and ground water. Significant improvement in nutrient management would be required to meet this regulatory challenge. Environmental protection and high crop yields could be achieved by avoiding the application of more nutrients than were actually removed from the fields. Thus, an integrated approach to nutrient management was needed, with best management practices (BMPs) targeted to critical areas of a watershed that contributed most of the P and N exported. Differing levels of nutrient management might be appropriate for different vegetable lands in the area. The overall goal of efforts to reduce N and P losses from the vegetable lands should be to balance off-farm N and P inputs in fertilizers with outputs in harvested products, while managing soils in ways that maintain productivity. It was likely that significant changes in the vegetable production systems might be necessary to achieve the ultimate goal of achieving nutrient balance.

Keywords: vegetable soil; N and P accumulation; leaching

蔬菜地是农业高度集约化的土地利用方式之一,其生产过程中化肥等农物资的投入常常是一般粮食作物的数倍至数十倍,超量施用化肥问题非常突出。因此,长期种植蔬菜可引起土壤肥力质量显著的变化,滞留在土壤中的养分还可导致土壤的富营养化和养分的非均衡化,可出现因土壤障碍而造成产量下降的问题,主要表现为土壤盐分含量过高、土壤酸化和土壤中有效营养元素比例失衡等。近十年,国内已有研究报道,因超量施用化肥和有机肥导致蔬菜地土壤速效氮和速效磷含量成倍增加^[1-3],这些变化直接导致了蔬菜病虫害加重、品质变劣,并对地表水环境构成了较大威胁^[4-7]。蔬菜地是浙江省重要的土地利用方式,也是该省肥料用量最大的农地。近几十年来,浙江省蔬菜生产发展迅速,大量的粮田被用于蔬菜生产,但至今对这一地区的蔬菜地土壤养分积累还缺乏系统的研究。本文以浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤为研究对象,采用化学测试方法研究了菜地土壤氮磷的积累及其淋失潜力的变化,以期评价这一地区蔬菜地土壤氮磷管理提供依据。

1 材料与方法

研究区位于浙江省北部平原地区,包括嘉兴、湖州、杭州和绍兴等地市。成土母质主要为浅海沉积物和湖沼相沉积物,土壤类型主要为潮土和水稻土。研究土壤的质地较为接近,主要为壤土、粉粘壤和粘壤(美国制)。该地区属于亚热带大陆性季风气候,年平均气温 16.5℃左右,年平均降雨量约 1 200 mm。

研究共选择了 51 个样点(其中,嘉兴、湖州、杭州和绍兴等地市的采样数分别为 14、9、17 和 11 个),在每一样点分层采集不同深度的土样,采样深度分别为 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm。每一采样点的分层土样各由 4 个剖面对应深度的分样混合而成。选择的样地均为连作蔬菜地,按蔬菜种植年龄不同可分为 6 组,分别为<2、2~5、6~10、11~20、21~30 和>30 a,样品

数分别为 5、6、14、12、8 和 6 个。研究区蔬菜地复种指数高,每年种植 5~8 茬。不同农户及蔬菜品种施肥差异较大,但总体施肥量大,磷肥主要以基肥为主,包括有机肥和复合肥,年有机肥用量 20~160 t·hm⁻²,年复合肥用量 550~2 540 kg·hm⁻²。

土壤样品经风干处理后全部磨细过 2 mm 土筛,用于有效磷(Olsen P)和有效 N(NO₃-N 和 NH₄-N)分析;取少量过 2 mm 土筛的样品进一步磨细过 0.15 mm 土筛用于全 P、全 N 的测定。土壤全 P 用硫酸-高氯酸消化,比色法测定^[8];速效磷(Olsen-P)采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH8.5)浸提,钼锑抗比色法测定^[8];土壤水溶性磷用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 提取,提取土水比为 1:10,提取时间为 1 h^[9],离心后用 0.45 μm 孔径滤膜过滤,钼锑抗比色法测定滤液中磷浓度。土壤 NO₃-N 和 NH₄-N 用 1 mol·L⁻¹ KCl 提取,比色法测定^[8]。

于 2007 年 6—8 月选择了蔬菜种植年限分别为<2、2~5、10~20 和 21~30 a 的典型蔬菜地各一块,采集了降雨形成的地表径流(每一田块采集的地表径流样分别为 4~5 次),观察分析了地表径流中可溶性氮磷的浓度。地表径流样中的 P、NH₄-N 和 NO₃-N 用比色法测定^[8]。

2 结果分析

2.1 土壤磷素状况

研究蔬菜地土壤全 P 含量有较大的差异,表层土壤全 P 最高的为 3.22 g·kg⁻¹,最低为 0.61 g·kg⁻¹,差异十分明显。土壤有效磷含量最高为 236.0 mg·kg⁻¹,最低仅为 5.90 mg·kg⁻¹,最高为最低的 40 倍。全磷和有效磷(Olsen P)含量随蔬菜种植年限的增加而增加(表 1)。蔬菜种植年限为<2、2~5、6~10、11~20、21~30 和>30 a 的土壤全 P 分别为 0.61~0.71、0.51~0.97、0.76~1.78、0.82~2.85、1.67~3.22 和 1.66~2.74 g·kg⁻¹,平均分别为 0.66、0.75、1.07、1.49、2.40 和 2.12 g·kg⁻¹;表层土壤有效 P 分别为 5.9~18.0、21.0~67.0、15.0~

93.0、29.0~154.0、82.0~236.0 和 43.0~187.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 13.2、37.8、42.2、70.2、137.9 和 101.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。蔬菜种植年限为 20~30 和 >30 a 的土壤全 P 含量明显高于 <20 a 的土壤, 而种植年限在 6 a 以上的土壤明显高于 6 a 以下的土壤。同样, 不同年限的土壤有效 P 含量也存在明显的差异: 20 a 以上的土壤 >11~20 a 的土壤 >6~10 a 和 2~5 a 的土壤 > 小于 2 a 的土壤。土壤有效 P 随种植年限的变化比全 P 的变化更为明显。同时, 随着种植时间的增加, 土壤 P 素发生了向下迁移, 种植年限 6 a 以上土壤剖面全 P 和种植年限 2 a 以上土壤剖面有效 P 产生明显的分化, 差异程度随种植年限的增加而增加(表 1)。

表 1 利用年限对蔬菜地土壤氮和磷积累的影响

Table 1 Effects of plantation time on accumulation of N and P in the vegetable soils

种植蔬菜 年限/a	深度/cm	全 P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{-N}/$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3\text{-N}/$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
<2 (n=5)	0~20	0.66c	13.2de	1.81b	4.99b	9.15g
	20~40	0.61c	7.6e	0.61d	1.29b	4.87h
	40~60	0.59c	2.4e	0.34e	1.46b	2.31h
2~5 (n=6)	0~20	0.75c	37.8c	1.68b	9.64a	13.58f
	20~40	0.62c	11.3de	0.64d	1.68b	8.45g
	40~60	0.57c	4.1e	0.28e	2.23b	3.22h
6~10 (n=14)	0~20	1.07b	42.2c	1.83b	9.39a	50.18b
	20~40	0.71c	15.7de	0.73d	2.43b	27.45de
	40~60	0.61c	5.2e	0.25e	1.34b	16.78f
11~20 (n=12)	0~20	1.49b	70.2b	1.70b	9.69a	46.48b
	20~40	0.72c	21.2d	0.89d	3.18b	32.24cd
	40~60	0.59c	7.7e	0.29e	2.13b	21.22ef
21~30 (n=8)	0~20	2.40a	137.9a	1.90ab	9.73a	73.28a
	20~40	0.91bc	37.4c	1.38c	4.12b	78.59a
	40~60	0.71c	12.4de	0.33e	2.22b	44.32b
>30 (n=6)	0~20	2.12a	101.7a	2.13a	9.92a	74.20a
	20~40	1.13b	38.6c	1.56bc	3.76b	89.23a
	40~60	0.72c	16.3de	0.37e	3.24b	47.65b

注: 同一列中平均值后小写英文字母相同者差异不显著 ($P < 0.05$)。

Note: Mean values followed by the same letter within a column are not different at $P = 0.05$ by Fisher's protected least significant difference.

表层土壤磷饱和度在 0.76%~44.12%, 蔬菜种植年限为 <2、2~5、6~10、11~20、21~30 和 >30 a 的土壤磷饱和度分别为 0.76%~3.24%、1.22%~7.23%、4.23%~22.32%、5.46%~31.24%、24.66%~44.12% 和 14.56%~38.79%, 平均分别为 1.86%、4.18%、9.10%、18.21%、34.16% 和 28.36%, 蔬菜种植年限为 21~30 和 >30 a 的土壤磷饱和度已超过 25%。除 21~30 a 和 >30 a 之间

的土壤磷饱和度差异不明显外, 其他种植年限之间差异均达到显著水平(图 1)。同样, 随着利用年限的增加, 剖面上下之间土壤磷饱和度的差异也越来越明显。种植年限为 20~30 a 和 >30 a 之间表土全 P、有效 P 和磷饱和度差异不明显可能与该省 20 a 前磷肥用量水平较低、大量的磷肥施用主要出现在近 20 a 有关。

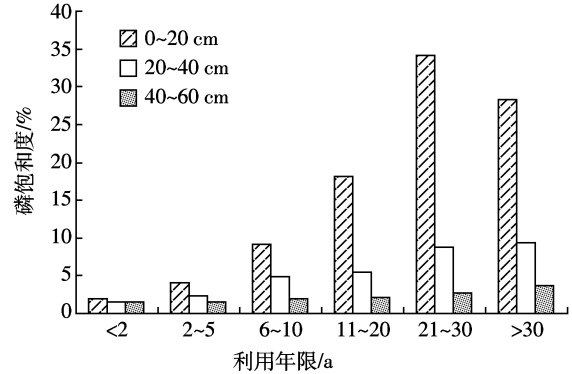


图 1 利用年限对蔬菜地土壤磷饱和度的影响

Figure 1 Effects of plantation time on saturation degree P in the vegetable soils

2.2 土壤氮素状况

与 P 相比, 蔬菜地土壤全 N 含量变化相对较小, 表层土壤全 N 含量最高的为 2.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最低的为 1.08 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。蔬菜种植年限为 <2、2~5、6~10、11~20、21~30 和 >30 a 的土壤全 N 含量分别为 1.24~2.13、1.38~2.05、1.08~2.65、1.08~2.13、1.58~2.17 和 1.76~2.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 1.81、1.68、1.83、1.70、1.90 和 2.13 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1); 种植年限在 20 a 之内表层土壤全 N 的变化不明显, 但种植年限为 30 a 以上的表层土壤全 N 明显高于 20 a 之内表层土壤全 N。土壤全 N 含量均随剖面深度的增加而明显减少。对于种植年限在 20 a 以上的 20~40 cm 土层的全 N 已明显高于 20 a 之内的土壤, 这说明随着时间的增加, 施入蔬菜地的氮素除被作物吸收及反硝化转化挥发损失外, 残留在土壤中的 N 素已发生了明显的垂直迁移。

土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 也呈明显的上高下低式分布, 但表土中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在 2.13 与 17.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。蔬菜种植年限为 <2、2~5、6~10、11~20、21~30 和 >30 a 的表土 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别为 2.23~7.84、2.13~17.56、2.13~14.65、4.68~15.43、5.23~15.46 和 4.87~14.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 4.99、9.64、9.39、9.69、9.73 和 9.92 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。除种植年限 <2 a 的土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量较低外(平均为 4.99 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其他种植年限表土之间的 $\text{NH}_4\text{-N}$

含量较为接近,平均在 $9\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

表土 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有较大的变化,在 $2.54\sim 213.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。蔬菜种植年限为 <2 、 $2\sim 5$ 、 $6\sim 10$ 、 $11\sim 20$ 、 $21\sim 30$ 和 >30 a 的表土 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分别为 $2.54\sim 16.32$ 、 $6.43\sim 21.23$ 、 $11.32\sim 132.00$ 、 $8.95\sim 132.55$ 、 $21.43\sim 213.24$ 和 $24.35\sim 154.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为 9.15 、 13.58 、 50.18 、 46.48 、 73.28 和 $74.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随种植年限的增加,表土 $\text{NO}_3\text{-N}$ 明显积累,20 a 以上的土壤 $> 11\sim 20$ a 和 $6\sim 10$ a 的土壤 $> 2\sim 5$ a 的土壤 $>$ 小于 2 a 的土壤。同时,随着利用年限的增加, $\text{NO}_3\text{-N}$ 发生明显的淋失下移,种植年限为 30 a 以上的蔬菜地 20~40 cm 的土层已高于表土(表 1)。

2.3 土壤氮磷流失的风险

随着表土磷素的积累,土壤水溶性 P($\text{CaCl}_2\text{-P}$)也发生了明显的变化,最高的($31.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为最低的($0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)240 倍。蔬菜种植年限为 <2 、 $2\sim 5$ 、 $6\sim 10$ 、 $11\sim 20$ 、 $21\sim 30$ 和 >30 a 的土壤水溶性 P 分别为 $0.13\sim 0.49$ 、 $0.48\sim 2.76$ 、 $0.48\sim 4.24$ 、 $0.37\sim 16.45$ 、 $3.17\sim 31.25$ 和 $0.39\sim 27.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为 0.33 、 0.92 、 1.36 、 3.54 、 12.98 和 $8.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。图 2 为土壤 Olsen-P 含量与水溶性 P 含量的关系。从中可见,随着 Olsen-P 含量的增加,土壤中水溶性 P 含量开始变化较小,但当有效磷超过一定值后,水溶性 P 增加幅度明显加大,其间有一个明显的突变点(临界值时,土壤 Olsen-P 含量约为 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),即当土壤 Olsen-P 含量大于临界值时,土壤 P 淋失潜力明显增加。

根据图 2 中土壤有效磷(Olsen-P)含量与水溶性 P 含量的关系大致可把该曲线划分为 3 个区间:A 段 Olsen-P 含量小于 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,包括 29 个样品, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的浓度小于 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;B 段 Olsen-P 含量介于 60 与 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,包括 17 个样品, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的浓度介

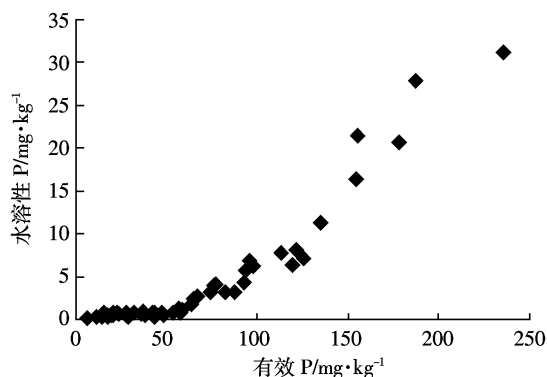


图2 蔬菜地土壤有效磷与水溶性磷的关系

Figure 2 Relationship between available P and water soluble P in the vegetable soils

于 1 与 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;C 段 Olsen-P 含量大于 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,包括 5 个样品, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的浓度大于 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大的达到 $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着 Olsen-P 含量的增加, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的浓度与 Olsen-P 含量关系曲线的斜率也明显增加。

表 2 为 2007 年 6—8 月对 N 和 P 积累差异明显的 4 块不同种植年限蔬菜地地表径流中可溶性 N、P 浓度的平均值(每块田收集的径流为 4~5 次)。从中可知,虽然蔬菜地地表径流中可溶性 P 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 可因降雨量、雨强、持续时间不同发生变化,但除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度差异较小外,随着利用年限的增加,可溶性 P 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的流失平均浓度呈成倍的增加,利用年限 21~30 a 的蔬菜地径流中可溶性 P 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分别约为利用年限 <2 a 蔬菜地的 13.12 和 9.48 倍。

表 2 不同利用年限蔬菜地地表径流中可溶性氮磷的平均浓度
Table 2 Mean concentrations of dissolved N and P in runoff samples collected from the vegetable soils with different plantation history

利用年限/a	土壤有效养分/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			径流中养分平均浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	Olsen P	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	P	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
<2	11	3.44	10.32	0.17c	2.12a	3.42c
2~5	36	13.24	14.35	0.29c	1.78a	3.21c
10~20	64	15.23	38.93	0.74b	2.54a	9.54b
21~30	126	9.34	213.24	2.23a	1.32a	32.44a

注:同一列中平均值后小写英文字母相同者差异不显著($P<0.05$)。

Note: Mean values followed by the same letter within a column are not different at $P=0.05$ by Fisher's protected least significant difference.

3 讨论

农田土壤氮、磷流失必须满足两个基本的条件:一是土壤中大量氮、磷的积累;二是存在水分运动。影响这两个条件之一的任何因素都将影响氮素和磷素淋溶的发生与否及程度。农业生态系统中氮、磷的流失主要受降雨量、土壤特性、灌溉、施肥制度、氮肥种类、氮肥施用量和施用方法等的强烈影响,具有很大的空间变异,其中降雨和径流是土壤氮磷素流失的主要驱动因素。但在一定的农业流域内,土壤氮磷的积累是影响氮磷流失差异的主要原因。

目前,有关土壤氮、磷淋失风险等级划分的研究还比较少,但许多研究已表明,地表径流中可溶性氮、磷的损失与表土中氮、磷的积累和肥料施用等有关^[5,10-11]。土壤测试氮、磷能够反映农田氮、磷的流失风险^[12-17]。Heckrath 等的研究发现^[13],当耕层中 Olsen P 在 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下时,排水中的磷浓度较低;当

Olsen P 在 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时, 排水中的磷浓度迅速增加, 土壤 Olsen P 在 60 至 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 排水中磷的浓度从 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $2.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 认为 Olsen P 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 已超过了主要作物获得正常生长的水平, 可作为排水中磷移动潜力迅速增加的临界指标。荷兰的研究者提出了通过测定土壤磷的饱和度来评价土壤磷的可释放性^[18], 认为引起土壤磷淋失明显增加的磷饱和度临界指标约为 25%。本研究的结果表明, 当浙北平原蔬菜地土壤有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 其水溶性磷明显增加, 说明研究区蔬菜地土壤磷发生明显淋失临界的 Olsen P 也在 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。而当土壤 Olsen P 含量达到 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时, 土壤磷饱和度也基本上达到了 25% 以上。因此, 国外学者建议的 Olsen-P $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右和土壤磷饱和度 25% 也适合作为浙北平原蔬菜地土壤磷明显淋失的临界值。从分析来看, 种植年限为 20 a 以上的老蔬菜基地土壤的磷指标基本上超过了这些临界值。由此可见, 浙北平原菜地土壤在连续、高量 P 施用水平下, 土壤磷积累非常明显; 新开辟的菜地, 在目前的施肥水平和措施下, 土壤磷也会很快累积达到较高的水平, 对生态环境产生一定的威胁。

土壤中硝态氮是植物利用氮素的主要形态, 也是影响水质的主要污染物。硝态氮不易被土壤胶体吸附, 一旦氮肥施用过量, 就将产生淋失, 对环境造成污染。土壤硝态氮过量累积可导致地下水硝态氮污染、土壤盐渍化、肥料利用率下降、氮氧化物等温室气体的大量释放、蔬菜品质变劣等问题。当土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 等无机 N 含量达到 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时已能满足蔬菜的正常生长, 因此可把 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为蔬菜地土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的推荐值^[18]。超过此值, 多余的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 将会引起较大的环境风险。本研究结果表明, 土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 随种植时间的增加呈现显著的增加, 当蔬菜种植年限超过 6 a 后, 有较大面积的蔬菜地土壤硝态氮超过此值, N 素流失风险大大增加。

为避免硝态氮随水流入地表水或入渗到地下水, 应将蔬菜地选在远离保护水源地; 同时, 为稳定蔬菜产量改善蔬菜品质并使蔬菜栽培对环境造成的负面影响降低到最小限度, 在土壤管理方面应注重有机肥与化肥的配合施用、控制化学 N 肥的施用量和肥料总 N 施用量及改进施肥技术。应根据不同蔬菜作物生长习性和土壤条件, 采用合理的轮作方式(豆科蔬菜与非豆科蔬菜轮作、深根系蔬菜与浅根性蔬菜轮作), 提高土壤水分和养分的利用效率, 避免土壤中氮

和磷的过度积累。

4 结论

结果表明, 随着种植年限的增加, 浙北平原蔬菜地土壤全磷、有效磷和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累呈明显的增加, 土壤 N 和 P 向剖面下移渐趋明显。土壤水溶性磷含量随有效磷积累的增加存在一个明显的突变点, 相对应的土壤有效磷临界值约为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着 Olsen-P 含量的增加, 蔬菜地土壤中水溶性 P 的浓度与 Olsen-P 含量关系曲线的斜率也明显增加, 而蔬菜地地表径流中氮和磷浓度呈成倍增加。

参考文献:

- [1] 张英鹏, 林咸永, 章永松, 等. 杭州市郊菜园土壤的养分状况及其障碍因子研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(3): 244-250.
ZHANG Ying-peng, LIN Xian-yong, ZHANG Yong-song, et al. Investigation on the nutrient status and plant nutrient-limiting factors of vegetable garden soils in the suburb of Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2003, 29(3): 244-250.
- [2] 范浩定. 种植蔬菜的土壤长期施用高浓度复合肥的情况调查 [J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(4): 74-75.
FAN Hao-ding. Investigation of vegetables-growing soils with long-term application of high concentration compound fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(4): 74-75.
- [3] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, SHI Jian-ping. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 63-67.
- [4] 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): 544-548.
ZHANG Ming-kui, ZHOU Cui, FANG Li-ping. Phosphorus saturation degree of soils on vegetable farms and its effects on soil phosphorus release potential and water quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 544-548.
- [5] 庄远红, 吴一群, 李 延. 有机无机磷肥配施对蔬菜地土壤磷素淋失的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 905-909.
ZHUANG Yuan-hong, WU Yi-qun, LI Yan. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on phosphorus leaching in vegetable soils[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 905-909.
- [6] 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 Cai-rong, HU Zheng-yi, YANG Lin-zhang, 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.
- [7] 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.
WANG Xin-jun, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. Phosphorus leaching

- from vegetable fields and impact factors[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21(4):67-70.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学出版社, 1999:105-254.
- LU Ru-kun. Analytical methods on agro-chemical properties of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999:105-254.
- [9] 章明奎. 砂质土壤中水溶性磷提取方法的比较[J]. 环境化学, 2008, 27(2):265-266.
- ZHANG Ming-kui. Comparison of extraction methods for water soluble phosphorus in sandy soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(2):265-266.
- [10] 杨学云, Brookes P C, 李生秀. 土壤磷淋失机理初步研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5):479-482.
- YANG Xue-yun, Brookes P C, LI Sheng-xiu. Preliminary study on mechanism of phosphorus leaching in cumulic cinnamon soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5):479-482.
- [11] Zhang M K, Jiang H, Liu X M. Phosphorus concentration and forms in surface and subsurface drainage water from wetland rice fields in the Shaoxing plain[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(3):239-248.
- [12] Casson J P, Bennett D R, Nolan S C, et al. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35:2212-2221.
- [13] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24:904-910.
- [14] 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.
- ZHONG Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2275-2280.
- [15] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for Risk of Phosphorus leaching [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):105-110.
- [16] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N, et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1996, 60(5):855-859.
- [17] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(6):920-926.
- [18] 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]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(1):4-11.
- [19] 杨丽娟, 张玉龙. 保护地菜田土壤硝酸盐积累及其调控措施的研究进展[J]. 土壤通报, 2001, 32(2):66-69.
- YANG Li-juan, ZHANG Yu-long. Advance in studies on the accumulation of nitrate in greenhouse soil and control methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(2):66-69.