

石灰性土壤添加污泥后土壤的肥力特征及磷素淋失临界值

常会庆, 吴 杰, 王启震, 焦常锋, 朱晓辉, 王 浩

(河南科技大学农学院, 洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 洛阳市植物营养与环境生态重点实验室, 洛阳 471000)

摘 要:开展2 a种植冬小麦-夏玉米的盆栽试验,研究污泥添加对石灰性土壤养分的影响,构建石灰性土壤中污泥添加量(0、3.75、7.50、37.5、75.0 t/hm²)与有效磷之间的关系,确定磷素淋失的临界值。结果表明:污泥添加降低了石灰性土壤的pH值,但土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾和土壤综合肥力指数随污泥添加量的增加呈增加趋势。试验期间,同年轮作季的污泥添加量相同时,玉米季土壤养分含量小于小麦季,且各养分随污泥施用年限的增加而增加,并与污泥的累积施用量之间存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关关系。当污泥添加量大于等于37.5 t/hm²时,土壤养分含量与未添加污泥处理相比差异显著($P<0.05$)。污泥施用后该土壤磷素淋失临界值为有效磷质量分数28.57 mg/kg,其对应的污泥施用量分别为61.39 t/hm²。研究可为在石灰性土壤中污泥的合理施用提供依据。

关键词: 养分; 磷; 淋失; 污泥; 石灰性土壤; 临界值

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.027

中图分类号: O613.62; TU992.3 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2020)-06-0231-08

常会庆, 吴 杰, 王启震, 焦常锋, 朱晓辉, 王 浩. 石灰性土壤添加污泥后土壤的肥力特征及磷素淋失临界值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 231—238. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.027 http://www.tcsae.org

Chang Huiqing, Wu Jie, Wang Qizhen, Jiao Changfeng, Zhu Xiaohui, Wang Hao. Fertility property and phosphorus leaching risk threshold of calcareous soil with sludge[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 231—238. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.06.027 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国年城市污泥产量巨大,预计到2020年,污泥产量将达6 000万t~9 000万t^[1]。因此,污泥的无害化与资源化处置迫在眉睫。污泥无害化处理后农用是消纳污泥的有效手段^[2-4]。目前,欧美国家用来改善土壤或作为农作物肥料的污泥比例约占60%^[5],而中国污泥农用量不足10%^[6],但中国污泥和主要有机肥所含养分相比,其氮、磷、有机质含量丰富,因而可以作为植物生长所需的养分源^[7-8]。虽然污泥连续施用有增加土壤—植物系统中重金属含量的风险^[9],但随着城市污泥在农用、环境效应和控制标准的严格要求,污泥中重金属的含量在逐年降低,所以污泥农用越来越受到人们的重视^[10]。

研究表明城市污泥的土地利用有利于不同类型土壤和作物上养分含量的增加^[11-12],但由于污泥来源、施用土壤和作物类型不同,其施用效果存在差异^[13-14]。石灰性土壤是广泛分布于中国干旱和半干旱地区的土壤类型之一,由于石灰性土壤中盐基高度饱和,呈中性至碱性反应,对污泥中重金属有较强的吸附沉淀作用^[15]。因此,该类土壤可作为污泥农用的“首选”土壤类型,有必要深入研究污泥添加对小麦-玉米轮作模式下石灰性土壤养分特征的影响,以及其可能导致的磷淋失风险。

关于淋失风险阈值的研究较多^[16-17],但多集中在磷肥过量施用所导致的磷淋失风险^[18-19],而污泥施用对石灰性土壤中磷淋失风险的研究还鲜有报道。因此,本研究通过在石灰性土壤中连续添加污泥,研究其对石灰性土壤养分状况、肥力特征的影响,同时探讨污泥添加对石灰性土壤中磷素淋失临界值的影响,以期能为污泥在石灰性土壤中的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验在河南科技大学农场开展,该农场位于河南省西部的洛阳市(34°41' N、112°27' E),试验点地处温带大陆性季风气候,年均气温12.2~24.6℃,无霜期210 d以上,年降水量、日照和年均湿度分别为528~800 mm、2 200~2 300 h和60%~70%。供试土壤取自河南科技大学农场大田20 cm的表层土,风干后过2 mm筛(除去杂草、砂砾等),土壤的基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验采用高40 cm,直径30 cm的塑料盆钵。污泥不同添加量水平参照《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284-2018)规定的污泥施用量(7.50 t/hm²),设置的5个处理分别为0 (Control)、3.75 (H1)、7.50 (H2)、37.5 (H3)、75.0 t/hm² (H4)。污泥的施用量为折算成大田的施用量(按照大田表层土质量为2.25×10⁶ kg/hm²计算)。所选污泥为经过好氧高温堆肥制备的腐熟污泥,其重金属含量符合《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284-2018)所规定的值(镉、汞、铅、铬、砷含量分别小于3、3、300、500、30 mg/kg),污泥的基本理化性质如表1所示。

收稿日期: 2019-10-14 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571319); 国家重点研发计划(2017YFD0801300)

作者简介: 常会庆,副教授,博士,主要从事固废资源化利用研究。

Email: hqchang@126.com

表1 土壤和腐熟污泥基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and decomposed sludge

土壤及污泥 Soil and sludge	有机质 Organic matter/%	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (g·kg ⁻¹)	有效钾 Available K/ (g·kg ⁻¹)
土壤 Soil	0.73±0.07	0.52±0.02	0.76±0.03	1.87±0.17	7.61±0.03	0.030±0.002	0.014±0.001	0.030±0.002
污泥 Sludge	41.37±2.75	20.15±2.37	15.32±0.50	2.17±0.03	7.74±0.02	2.012±0.01	0.55±0.002	0.101±0.003

注：数据为平均数±标准差（n=3）。
Note: Data are mean ± standard deviation (n=3) .

取 10 kg 过筛土壤放置于盆钵中，依据大田作物传统施肥量，每盆施用尿素 2.60 g，过磷酸钙 4.2 g，氯化钾 1.3 g，再施入不同处理量的污泥，使肥料、污泥和土壤均匀混合。每个处理重复 3 次，随机排列在温室中，土壤含水率调节为 80% 的田间持水量，土壤田间持水量为 19.67%。依据北方典型的轮作种植模式，以冬小麦-夏玉米为供试作物，冬小麦和夏玉米品种分别为豫农 035 和郑单 958，每盆留 10 株小麦（或 1 株玉米）。试验于 2015 年 10 月 10 日播种小麦，于 2016 年 6 月 1 日收获小麦后种植玉米，玉米收获时间为 2016 年 10 月 8 日，作物生长期间的平均气温和降雨量分别为 14.9 °C 和 631.2 mm。

1.3 样品采集与分析

待作物成熟后，收集土壤样品风干后，分别过 0.85 和 0.12 mm 的土筛后备用。土壤基本理化性质的测定参照《土壤农业化学分析方法》^[20]：pH 值采用水土质量比 5:1 的电位法测定；土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定；土壤全氮采用凯氏定氮法测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法；土壤全磷采用 HClO₄-HSO₄ 消解，钼锑抗比色法测定；土壤 Olsen-P 采用 NaHCO₃ 浸提，钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用 CH₃COONH₄ 浸提，火焰光度计法测定。土壤 CaCl₂-P 采用 CaCl₂ 溶液提取，钼锑抗比色法测定。

土壤综合肥力评价方法：采用内梅罗指数法计算土壤综合肥力指数（integrated fertility index, IFI）^[21]。将土壤 pH、有机质、全氮、Olsen-P 和速效钾含量代入下列公式计算其分肥力系数 IFI_i：

$$IFI_i = \begin{cases} x/x_a & x \leq x_a \\ 1 + (x - x_a)/(x_c - x_a) & x_a < x \leq x_c \\ 2 + (x - x_c)/(x_p - x_c) & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x > x_p \end{cases} \quad (1)$$

$$IFI = ((IFI_{i平均})^2/2 + (IFI_{i最小})^2/2) \cdot (N-1/N) \quad (2)$$

式中 IFI_i 为分肥力系数；x 表示土壤各指标测定值；IFI_{i平均} 和 IFI_{i最小} 分别是土壤各指标的分肥力均值与最小值；N 表示土壤指标个数；x_a、x_c、x_p 为分级标准下限、中值和上限，分级标准参考第二次全国土壤普查标准（表 2）。根据 IFI 值将土壤肥力分为 4 个等级^[22]（表 3）。

1.4 磷风险值的计算

根据 2 a 研究中土壤有效磷 Olsen-P 与可溶性磷 CaCl₂-P 之间的关系，以不偏离突变点为基础，使高 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间的关系方程斜率最大，决定系数 R² 最高，而低 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间的关系方程斜率最小，再根据 2 个方程计算土壤磷酸盐淋失临界值或突变点^[23]。

表2 土壤性质的分级标准

Table 2 Grading criteria for soil properties

指标 Index	下限 Lower limit (x _a)	中值 Median (x _c)	上限 Upper limit (x _p)
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	20	30	40
总氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	1	1.5	2
有效 P Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	10	20	40
速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	100	150	200
pH 值 pH value	4.5	6.5	8.5

表3 土壤肥力的分级标准

Table 3 Classification standard of soil fertility

项目 Item	肥力等级 Fertility degree			
	1	2	3	4
肥力系数 Fertility coefficient	>2.7	1.8~2.7	0.9~<1.8	<0.9
肥力状况 Fertility status	很肥沃	肥沃	一般	贫瘠

1.5 数据统计分析

采用软件 SPSS17.0 进行相关的统计分析，多重比较选用 Duncan 法进行检验（α=0.05）。

2 结果与分析

2.1 污泥添加对土壤化学性质的影响

2.1.1 污泥添加对土壤 pH 值和有机质的影响

污泥添加对土壤 pH 值的影响见表 4。相同年份条件下，玉米季土壤 pH 值高于小麦季。2016 年各处理之间土壤 pH 值差异不显著（P>0.05）。2017 年，小麦季的 H3、H4 处理与 Control 相比，土壤 pH 值显著降低 0.26 和 0.31 个单位（P<0.05），玉米季各施用污泥处理的 pH 值分别显著降低了 0.19、0.24、0.28、0.39 个单位（P<0.05）。可见，2 a 连续污泥施用，石灰性土壤 pH 呈下降趋势，而且随着污泥添加量增加呈现 pH 值下降越明显的趋势。随污泥添加量增加，土壤有机质含量表现出增加的趋势（表 4）。2016 年小麦季的 H3 和 H4 处理与无污泥添加相比，土壤有机质含量显著增加了 68.44% 和 28.77%（P<0.05），其他添加污泥处理与无污泥添加处理相比差异不显著（P>0.05）；2016 年玉米季的 H3、H4 处理，土壤有机质显著增加了 32.63% 和 48.41%（P<0.05），且两处理之间差异显著，而其他处理之间无显著差异；2017 年小麦季的 H3 和 H4 两处理，土壤有机质含量显著增加了

61.77%和128.57% ($P<0.05$); 玉米季的H2、H3和H4处理, 土壤有机质含量显著增加25.86%, 54.75%和84.59% ($P<0.05$)。可见, 随着污泥施用年限的增长, 土壤有机质不断积累。

表4 不同处理对土壤pH及氮磷钾的影响

Table 4 Effects of different treatments on soil pH values and N-P-K content

年份 Year	生长季 Growing season	污泥添加量 Sludge addition/ (t·hm ⁻²)	pH值 pH value	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
2016	小麦季 Wheat Season	0 (Control)	7.73±0.07a	7.16±0.17a	0.58±0.05a	15.05±1.05a	0.79±0.02a	14.50±1.49a	153.61±4.33a
		3.75 (H1)	7.70±0.05a	8.14±1.61a	0.62±0.03a	16.33±1.52a	0.85±0.05ab	15.34±0.25a	159.99±4.06ab
		7.50 (H2)	7.66±0.20a	8.53±1.35a	0.66±0.02a	24.73±1.75b	0.89±0.06b	19.81±0.89b	164.27±0.79b
		37.5 (H3)	7.58±0.17a	9.22±0.87b	0.83±0.09b	28.23±1.92b	0.90±0.02b	25.26±1.24c	192.24±4.48c
		75.0 (H4)	7.50±0.37a	12.06±1.51b	0.94±0.004c	34.77±2.16c	0.99±0.02c	30.41±1.91d	207.18±3.73d
	玉米季 Maize season	0	7.74±0.03a	6.59±0.02a	0.48±0.01a	11.77±0.74a	0.71±0.01a	4.20±1.37a	148.49±3.30a
		3.75	7.73±0.02a	6.80±0.41a	0.52±0.03a	12.98±0.61a	0.72±0.04a	4.63±0.76a	152.38±1.41a
		7.50	7.71±0.04a	7.07±0.40a	0.63±0.05b	13.48±0.62ab	0.75±0.02a	7.38±0.68b	153.44±1.05a
		37.5	7.65±0.15a	8.74±0.15b	0.66±0.02b	15.63±0.86b	0.88±0.04b	12.69±0.62c	182.75±4.77b
		75.0	7.54±0.30a	9.78±0.07c	0.83±0.07c	25.63±1.76c	0.92±0.04b	17.68±1.13d	205.13±6.84c
2017	小麦季 Wheat season	0	7.56±0.17b	7.35±0.30a	0.62±0.02a	41.12±2.48a	0.83±0.05a	16.52±2.19a	152.86±1.46a
		3.75	7.46±0.03ab	8.37±0.60a	0.66±0.01a	45.97±2.58a	0.89±0.06ab	18.70±0.65a	162.74±3.84b
		7.50	7.40±0.08ab	9.70±1.69ab	0.73±0.01b	59.32±3.24b	0.95±0.01b	21.74±0.35b	168.07±1.64b
		37.5	7.30±0.06a	11.89±1.51b	1.00±0.06c	73.73±2.83c	1.17±0.04c	41.32±2.45c	196.65±2.53c
		75.0	7.25±0.19a	16.80±2.61c	1.27±0.01d	93.97±2.40d	1.35±0.01d	61.98±1.57d	211.86±6.14d
	玉米季 Maize season	0	7.66±0.12c	7.27±0.36a	0.48±0.03a	33.25±1.48a	0.74±0.05a	7.16±0.39a	149.37±4.01a
		3.75	7.47±0.01b	7.71±1.11a	0.55±0.01b	40.01±0.16a	0.79±0.02a	10.75±0.84b	153.69±1.41ab
		7.50	7.42±0.04b	9.15±0.15b	0.65±0.01c	56.00±2.55b	0.85±0.05a	11.93±0.95b	155.57±1.84b
		37.5	7.38±0.01ba	11.25±0.66c	0.88±0.07d	67.20±4.85c	1.03±0.01b	25.18±1.86c	185.73±4.08c
		75.0	7.27±0.05a	13.42±0.58d	1.12±0.02e	77.00±5.23d	1.33±0.13c	29.17±1.23d	208.36±3.68d

注: 同一列同生长季不同处理间小写字母表示差异性显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different small letters between different treatments in the same column and growing season indicate significant differences among the treatments ($P<0.05$), the same below.

2.1.2 污泥添加对土壤全氮和碱解氮的影响

2 a 小麦-玉米轮作过程中, 土壤全氮与碱解氮随污泥添加量的增加而增加 (表4)。和Control相比, 2016年小麦季的H3和H4处理, 土壤全氮显著增加43.10%、62.07% ($P<0.05$), 玉米季H2、H3和H4处理的全氮显著增加了31.25%、37.5%和72.92% ($P<0.05$); 2017年小麦季H2、H3和H4处理的全氮增加量分别为17.74%、61.29%、104.84% ($P<0.05$), 玉米季污泥添加各处理全氮增加量分别为14.58%、35.42%、83.33%、133.33% ($P<0.05$)。相同年份当污泥添加量相同时, 玉米季土壤全氮含量小于小麦季, 并且土壤全氮随着污泥施用年限的增加而增加。同一轮作季, 土壤碱解氮含量随污泥施用量的增加而增加 (表4)。和Control相比, 2016年小麦季的H2、H3和H4处理和玉米季的H3和H4处理, 土壤碱解氮的含量显著增加, 其中小麦季H2、H3、H4处理的碱解氮增加量分别为64.32%、87.57%、131.03% ($P<0.05$), 玉米季H3、H4处理的碱解氮增加量分别为32.80%和133.33% ($P<0.05$)。2017年小麦季与玉米季的H2、H3、H4, 土壤碱解氮的含量较Control显著增加, 其中小麦季土壤碱解氮增加量分别为11.97%、44.26%、182.53% ($P<0.05$), 玉米季土壤的碱解氮增加量分别为68.42%、102.11%、131.58% ($P<0.05$)。同一轮作季当污泥添加量相同时, 小麦季土壤的碱解氮含量高于玉米季, 且2017年土壤碱解氮含量高于2016年。

2.1.3 污泥添加对土壤全磷、有效磷变化

土壤全磷与有效磷的变化与土壤中氮素变化趋势相似, 也均表现出随污泥添加量的增加而上升趋势 (表4)。2 a 小麦季的H2、H3、H4处理与Control相比, 土壤全磷含量显著增加了12.66%、13.92%、25.32% (2016年)和14.46%、40.96%、62.65% (2017年) ($P<0.05$); 玉米季的H3和H4处理较Control处理, 土壤全磷显著增加了23.94%、29.58%和39.19%、79.73% ($P<0.05$)。同样, 在同一轮作季当污泥添加量相同时, 玉米季土壤全磷含量小于小麦季, 并且2017年土壤全磷含量大于2016年。与Control相比, 2016年H2、H3和H4处理土壤有效磷在小麦分别显著增加36.62%、74.21%、109.72%, 玉米季增加75.71%、202.14%、320.95% ($P<0.05$)。2017年小麦季与玉米季土壤的有效磷含量, 与Control相比, 小麦季H2、H3、H4处理的土壤有效磷分别增加31.60%、150.12%、275.18% ($P<0.05$), 玉米季H1、H2、H3、H4处理的土壤有效磷分别增加50.14%、66.62%、251.68%、307.40% ($P<0.05$)。可见, 随着污泥的连续农用, 土壤中有效磷有明显的累积效应。

2.1.4 污泥添加对土壤速效钾影响

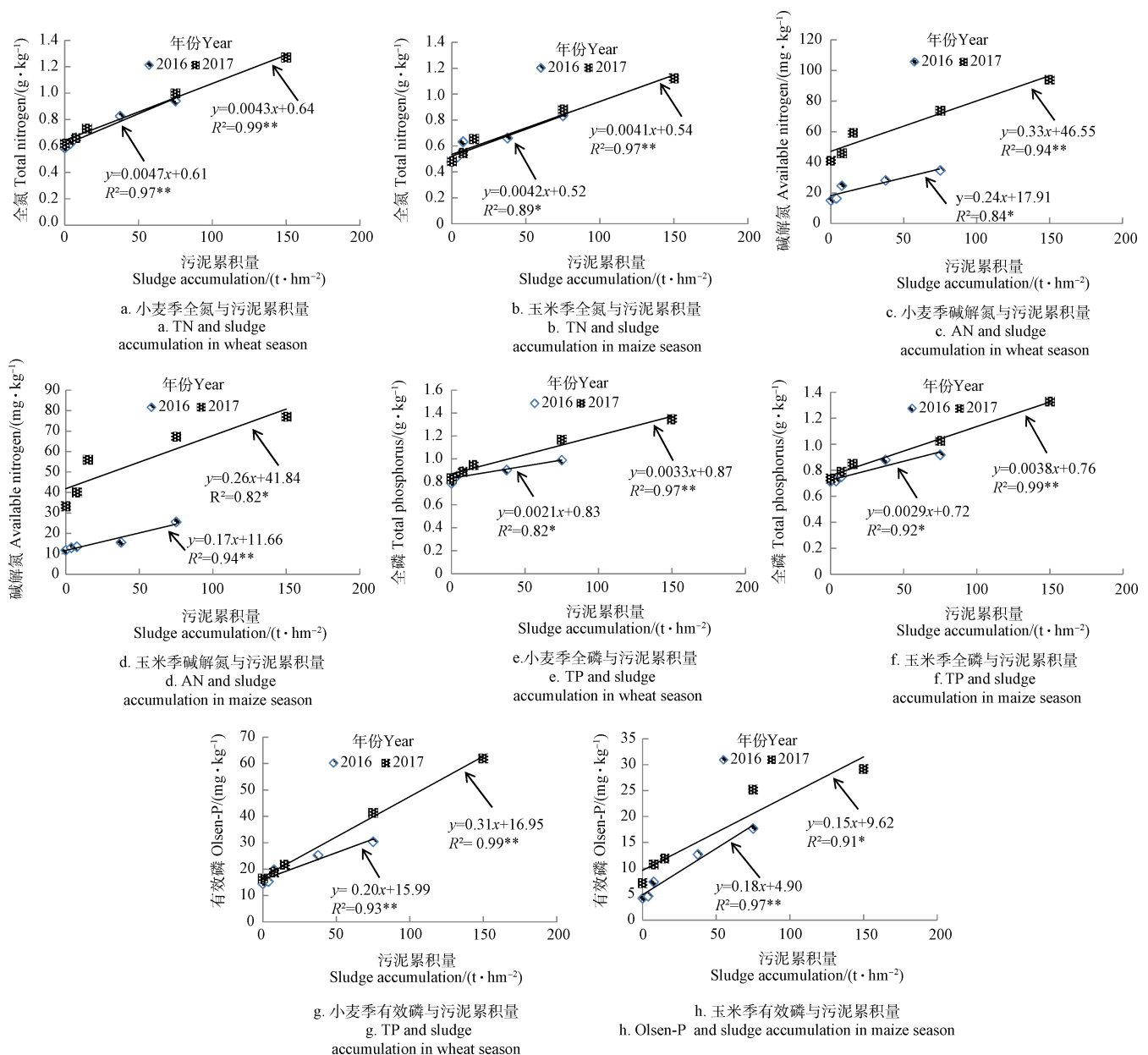
污泥中钾含量较氮、磷含量相对低, 本研究中污泥添加也会增加土壤速效钾含量, 且土壤速效钾含量随污泥添加量的增加而增加 (表4)。2016年小麦季的H2、H3、H4处理较Control相比, 土壤速效钾显著增加6.94%、25.15%、34.87% ($P<0.05$), 玉米季H1和H2与

Control间无显著差异, 但H3和H4处理可以使土壤速效钾显著增加23.07%和38.14% ($P<0.05$)。与Control相比, 2017年小麦季H1、H2、H3、H4处理土壤速效钾分别增加6.46%、9.95%、28.64%、38.60% ($P<0.05$), 玉米季H2、H3、H4处理速效钾分别增加4.15%、24.34%、39.49% ($P<0.05$)。同一轮作季当污泥添加量相同时, 小麦季土壤速效钾含量高于玉米季, 并随污泥的连续使用土壤速效钾也存在积累效应。

2.2 土壤养分与污泥累积用量之间的相关性

小麦-玉米2a轮作中, 污泥的连续施用与小麦和玉米季石灰性土壤中氮、磷的相关关系见图1。2a小麦和玉米季污泥的累积施用量与土壤全氮存在正相关关系: 小麦季 $R^2=0.97\sim0.99$ ($P<0.01$), 玉米季 $R^2=0.89$ ($P<0.05$) ~ 0.97 ($P<0.01$), 随着污泥施用年限的增加, 玉米季土壤全氮与污泥添加量之间的相关性由显著变为极

显著。2a小麦与玉米季土壤碱解氮与污泥累积施用量之间同样存在正相关关系: 小麦季 $R^2=0.84$ ($P<0.05$) ~ 0.94 ($P<0.01$), 玉米季 $R^2=0.82$ ($P<0.05$) ~ 0.94 ($P<0.01$), 小麦季二者间关系随着污泥累积施用量的增加由显著变为极显著, 但玉米季由极显著变为显著相关。同样, 土壤中全磷在2a小麦和玉米季含量变化与污泥累积施用量之间存在正相关关系: 小麦季 $R^2=0.82$ ($P<0.05$) ~ 0.97 ($P<0.01$), 玉米季 $R^2=0.92$ ($P<0.05$) ~ 0.99 ($P<0.01$), 相同生长季节, 土壤全磷与污泥累积施用量之间相关性由显著变为极显著。土壤中有效磷在2a小麦和玉米季的含量变化与污泥累积施用量之间也表现出正相关关系: 小麦季 $R^2=0.93\sim0.99$ ($P<0.01$), 玉米季 $R^2=0.91$ ($P<0.05$) ~ 0.97 ($P<0.01$), 仅2017年玉米季土壤有效磷与污泥累积施用量之间相关性表现为显著水平, 其余3季均为极显著水平。



注: *为显著相关($P<0.05$); **为极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation at 0.05 level; ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

图1 小麦和玉米季土壤氮、磷与污泥累积量线性关系

Fig.1 Linear relationship between soil N, P and sludge accumulation in wheat and maize seasons

2.3 污泥施用对土壤综合肥力指数影响

Two-way ANOVA 分析表明, 污泥添加量和季节对土壤 IFI 影响极显著 ($F=112$ 和 46 , $P<0.01$), 且二者对土壤 IFI 影响存在显著交互作用 ($F=2.26$, $P<0.05$)。污泥添加量的增加会促使土壤 IFI 表现出增加的趋势 (表 5)。与不添加污泥相比, 2016 年小麦季的 H2、H3、H4 处理的 IFI 分别显著增加了 13.04%、27.17%、38.04% ($P<0.05$), 且这 3 个处理之间的 IFI 也存在显著性差异; 2016 年玉米季各处理间的 IFI 差异显著, 和不添加相比, H1、H2、H3 和

H4 处理的 IFI 分别增加了 5.33%、12%、33.33%、50.67% ($P<0.05$); 同样 2017 年小麦季各处理的土壤 IFI 也均达到了显著差异, 与 Control 相比, H1、H2、H3 和 H4 处理的 IFI 分别增加了 6.38%、13.83%、39.36%、48.94%; 2017 年玉米季, H3 和 H4 处理间的 IFI 差异不显著 ($P>0.05$), 但显著高于其他处理 ($P<0.05$)。污泥添加后土壤的 IFI 与土壤肥力分级标准 (表 3) 相比, 小麦季土壤肥力达到一般土壤肥力状况 (0.9~1.8), 而且随着污泥添加量的增加, 玉米季土壤的肥力状况也由贫瘠向一般转变。

表 5 污泥添加对土壤综合肥力指数影响

Table 5 Effect of sludge addition on soil comprehensive fertility index

污泥添加量 Sludge addition/(t·hm ⁻²)	土壤综合肥力指数 Soil comprehensive fertility index			
	2016 年小麦季 2016 wheat season	2016 年玉米季 2016 maize season	2017 年小麦季 2017 wheat season	2017 年玉米季 2017 maize season
0	0.92±0.03a	0.75±0.05a	0.94±0.03a	0.81±0.01a
3.75	0.97±0.01a	0.79±0.000 2b	1.00±0.006b	0.83±0.25a
7.50	1.04±0.002b	0.84±0.01c	1.07±0.02c	0.92±0.01a
37.5	1.17±0.03c	1.00±0.01d	1.31±0.02d	1.18±0.02b
75.0	1.27±0.04d	1.13±0.01e	1.40±0.06e	1.31±0.005b

2.4 土壤磷素淋失临界值确定

通过分析污泥添加后石灰性土壤中 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量变化, 并建立两者之间的线性关系 (图 2), 可以得出石灰性土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量随着 Olsen-P 含量的上升而上升, 且 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的变化呈现出突变上升的趋势, 采用分段的线性拟合方程计算出石灰性土壤的 Olsen-P 突变点, 其两段方程见图 2。线性方程之间的突变点为有效磷质量分数 28.57 mg/kg, 该值可作为石灰性土壤磷素淋失的临界值。结合图 1 中污泥添加量与 Olsen-P 的关系, 可计算出当年或当季土壤达到临界值的污泥施用量为 61.39 t/hm²。

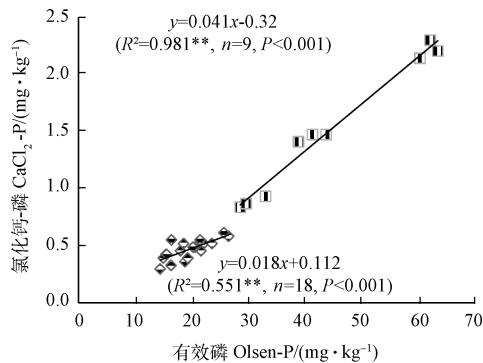


图 2 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的关系

Fig.2 Relationship between Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$

3 讨论

连续 2 a 在石灰性土壤中施用污泥会导致土壤 pH 的降低, pH 的降低幅度随着污泥添加量的增加而增加, 其原因在于污泥中有机质在土壤降解过程会分泌出大量的有机酸, 会导致土壤 pH 降低^[24]。因此, 施入土壤中的污泥越多, 其产生的有机酸越多, 土壤 pH 降低幅度越大。另外, 高的污泥添加量使土壤的硝化作用增加, 也

是导致 pH 降低的原因之一^[25]。不同土壤类型上添加污泥都会改善土壤的养分状况^[24,26-28], 提高土壤肥力^[29-32]。沙土与壤土的蔬菜栽培试验中, 当污泥用量为 4 kg/m² 时, 2 种土壤的有机质比对照分别增加了 56.3% 和 38.7%, 氮、磷、钾含量增加的幅度为 10%~30%^[33]。胡学峰等^[34]在褐土性土与石灰性褐土上施用污泥处理, 在收获 5 茬油菜后, 2 种土壤的速效氮含量比不施污泥处理平均分别增加了 44.3% 与 26.2%; 土壤 Olsen-P 和速效钾含量平均分别增加了 154.4%、129.7% 和 38.7%、27.9%。石灰性土壤上施加城市污泥后也发现, 土壤中有有机质、全氮、全磷、土壤速效氮和 Olsen-P 含量与 Control 相比都达到了显著水平, 且随着污泥添加量的增加, 其含量增大, 但土壤全钾和速效钾含量并未显著受到污泥添加的影响^[35-36]。本研究发现, 2 a 污泥的累积农用与石灰性土壤上养分变化关系密切, 在污泥用量 ≥ 37.5 t/hm² 时, 土壤各养分和肥力指数便会显著增加, 这主要是由于污泥的连续施用会使土壤中养分得到不断补充和释放, 从而提高土壤养分含量^[24]。

污泥农用在增加土壤-作物供肥能力同时, 往往会由于污泥的过量施用而导致上述养分产生淋失风险。目前对土壤养分淋失临界值的研究主要是对磷素临界值的确定, 例如 Hesketh 等^[37]通过对土壤磷素淋失研究发现, 土壤磷素会在某一含量时促使土壤磷素淋失量突然增加, 该突变点的土壤 Olsen-P 含量被称为磷素淋失临界值。Olsen-P 表示土壤中可被植物吸收利用的磷, 包含水溶性及吸附态磷, 而 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 则主要表示土壤溶液中的磷, 即水溶性磷^[38]。钟晓英等^[23]运用相关性分析建立了 23 种土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量间的线性关系, 发现当 Olsen-P 含量达到某一值时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量会突变上升, 而该突变点所表示的 Olsen-P 含量可代表土壤磷素淋失的临界值。不同的土壤类型, 其磷素临界值也存在着较

大差异,李学平等^[39]在室内对3种类型的土壤进行了磷素淋失临界值的研究,发现当土壤 Olsen-P 质量分数在 60~115 mg/kg 之间时,将增大磷素淋失的风险。王彩绒等^[40]对蔬菜地土壤的磷临界值研究表明,土壤中 Olsen-P 质量分数为 60 mg/kg 时,磷素就会出现淋失风险。土壤磷素淋失临界值大小受土壤性质影响^[23],这是由于不同的土壤类型其磷酸盐数量、种类及形态存在差异,使得各类土壤的磷临界值也不相同^[40]。土壤 pH 值变化直接影响到土壤磷素淋失临界值,赵小蓉等^[16]研究发现,土壤 pH 与土壤磷素淋失临界值之间呈抛物线关系,并在 pH 值为 6 时临界值最高,若土壤的 pH 值大于 6 时,其临界值将会随着土壤 pH 的增加而下降。本研究的石灰性土壤 pH 值为 7.61,运用传统 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量突变表示土壤磷素淋失临界值所对应的土壤磷素淋失临界值为 28.57 mg/kg。

4 结 论

连续 2 a 在石灰性土壤上施用污泥,土壤 pH 值随污泥施用量的增加而降低;土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾和土壤综合肥力指数会随污泥施用量的增加表现出升高趋势,尤其当污泥用量大于等于 37.5 t/hm² 时,土壤养分和综合肥力指数与对照相比显著增加。污泥添加后石灰性土壤上磷素淋失的 Olsen-P 风险值为 28.57 mg/kg,此时不施肥的污泥累积施用量为 61.39 t/hm²。因此,污泥农用改善石灰性土壤养分状况的同时,需要注意污泥过量施用造成的养分淋失风险。

[参 考 文 献]

- [1] 杨新海. 污泥协同焚烧技术发展的探讨与行业思考[J]. 净水技术, 2018, 37(11): 1—3, 39.
Yang Xinhai. Discussion and consideration on development of sludge co-incineration technology[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(11): 1—3, 39. (in Chinese with English abstract)
- [2] 梁丽娜, 黄雅曦, 杨合法, 等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 81—86.
Liang Li'na, Huang Yaxi, Yang Hefa, et al. Effects of farmland application of sewage sludge on crop yields and heavy metal accumulation in soil and crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 81—86. (in Chinese with English abstract)
- [3] McGrath S P, Zhao F J, Dunham S J, et al. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(3): 875—883.
- [4] Oliver I W, McLaughlin M J, Merrington G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in sewage biosolids: A comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart[J]. Science of the Total Environment, 2005, 337(1/2/3): 139—145.
- [5] 李琼, 华璐, 徐兴华, 等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 468—476.
Li Qiong, Hua Luo, Xu Xinghua, et al. A review on environmental effects and control criteria of biosolid agricultural application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 468—476. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李焱, 史弋, 王宇翔, 等. 城市污泥施用对沙地油菜的影响及效果评价[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(6): 88—95.
Li Yan, Shi Yi, Wang Yuxiang, et al. Effect and evaluation of municipal sludge improved sand soil on rape growth[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(6): 88—95. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2464—2474.
LI Yanxia, Chen Tongbin, Luo Wei, et al. Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2464—2474. (in Chinese with English abstract)
- [8] Onaka T. Sewage can make Portland cement: A new technology for ultimate reuse of sewage sludge[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(8): 93—135.
- [9] 李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 353—357.
Li Shuqin, Tian Zhonghe, Jin Hongxin, et al. Effects of municipal sludge composts on heavy metal accumulation in soil and soybean[J]. Journal of Agro-Environment Science: J Agro-Environ Sci, 2014, 33(2): 353—357. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵秀兰, 卢吉文, 陈萍丽, 等. 重庆市城市污泥中的重金属及其农用环境容量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 188—192.
Zhao Xiulan, Lu Jiwen, Chen Pingli, et al. Content, speciation of heavy metal in sewage sludge and its environmental capacity for agricultural use in Chongqing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 188—192. (in Chinese with English abstract)
- [11] Sukkariyah B, Evanylo G, Zelazny L. Distribution of copper, zinc and phosphorus in coastal plain soils receiving repeated liquid biosolids applications[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(6): 1618—1626.
- [12] 熊云武, 林晓燕, 龚亚龙, 等. 城市污泥安全农用研究进展[J]. 现代农业科技, 2016(3): 228—229.
Xiong Yunwu, Lin Xiaoyan, Gong Yalong, et al. Research advance on safe utilization of municipal sewage sludge as agricultural resource[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2016(3): 228—229. (in Chinese with English abstract)
- [13] 任欣欣. 城市污泥不同施用量的小白菜和土壤肥力效应研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2014.
Ren Xinxin. Effect of Different Application Rates of the Two Sludges on Pak-choi and Soil Fertility[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李东洁. 污泥及赤泥农用对油菜生长、品质及土壤环境的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
Li Dongjie. The Effects of Sewage Sludge and Red Mud Addition on Rape Growth, Its Quality and Soil Environment[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei Province, 2013. (in Chinese with English abstract)

- [15] Pernille E J, Lisbeth M O, Anne J P. Speciation of Pb in industrially polluted soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 170(1/2/3/4): 359—382.
- [16] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 等. 中国23个土壤磷素淋失风险评估Ⅱ. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 3011—3017.
Zhao Xiaorong, Zhong Xiaoying, Li Guitong, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils II. The relationships between soil properties, P adsorption characteristics and the leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3011—3017. (in Chinese with English abstract)
- [17] 章明奎, 周翠, 方利平. 水稻土磷环境敏感临界值的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 170—174.
Zhang Mingkui, Zhou Cui, Fang Liping. Environmentally sensitive thresholds of phosphorus of paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science: J Agro-Environ Sci*, 2006, 25(1): 170—174. (in Chinese with English abstract)
- [18] 申艳, 段英华, 黄绍敏, 等. 潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对磷肥施用的响应及其淋失风险分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1689—1696.
Shen Yan, Duan Yinghua, Huang Shaomin, et al. Response of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ to phosphorus fertilization and leaching risk in fluvo-aquic soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(6): 1689—1696. (in Chinese with English abstract)
- [19] Mihailescu E, Murphy P N C, Ryan W, et al. Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland[J]. *Journal of Agriculture Science*, 2015, 153: 520—537.
- [20] 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, 1999.
- [21] 冀拯宇, 周吉祥, 郭康莉, 等. 连续施用无害化污泥堆肥对沙质潮土肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1276—1284.
Ji Zhengyu, Zhou Jixiang, Guo Kangli, et al. Effects of continuous application of non-hazardous sewage sludge compost on fertility of sandy fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(5): 1276—1284. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵满兴, 曹阳阳, 焦佳斌, 等. 延安新区(北区)道路绿地土壤肥力质量评价[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(27): 130—136.
Zhao Manxing, Cao Yangyang, Jiao Jiabin, et al. Soil fertility evaluation for urban greenbelt in the new district of Yanan[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(27): 130—136. (in Chinese with English abstract)
- [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.
Zhong Xiaoying, Zhao Xiaorong, Bao Huajun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2275—2280. (in Chinese with English abstract)
- [24] 黄林, 乔俊辉, 郭康莉, 等. 连续施用无害化污泥对沙质潮土土壤肥力和微生物学性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(5): 80—86.
Huang Lin, Qiao Junhui, Guo Kangli, et al. Effect of consecutive application of sewage sludge on soil fertility and soil microbial properties of sandy fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 80—86. (in Chinese with English abstract)
- [25] Tsadilas C D, Matsi T, Barbayiannis N, et al. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions[J]. *Soil Science Plant Analysis*, 1995, 26: 2603—2619.
- [26] 李梦红, 黄现民, 诸葛玉平. 污泥农用对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 95—98.
Li Menghong, Huang Xianmin, Zhuge Yuping. Effects of agricultural utilization of sewage sludge on soil physical and chemical properties and crop output[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [27] 郭眉兰, 席鸣岐, 郭郡兰, 等. 城市污泥和污泥与垃圾堆肥的农田施用对土壤性质的影响[J]. *农业环境保护*, 1994, 13(5): 204—209.
Guo Meilan, Xi Mingqi, Guo Junlan, et al. Effects of city sewage sludge and sludge waste compost on the soil as fertilizer resource[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(5): 204—209. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王艮梅, 杨丽. 污泥施用对林地土壤基本性质及酶活性的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1988—1993.
Wang Genmei, Yang Li. Influence of sewage sludge application to forest soils on soil properties and enzyme activities[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(8): 1988—1993. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈同斌, 高定, 李新波. 城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 802—807.
Chen Tongbin, Gao Ding, Li Xinbo, et al. Effects of sewage sludge compost on available nutrients and water retention ability of planting substrate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 802—807. (in Chinese with English abstract)
- [30] Bulluck L R, Brosius M, Evanylo G K, et al. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 19(2): 147—160.
- [31] 李萍萍, 薛彬, 孙德智. 使用城市污泥堆肥对土壤理化性质及白三叶生长的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 25(1): 127—131.
Li Pingping, Xue Bin, Sun Dezhi. Effects of applying sewage sludge compost on the physicochemical properties of soil and growth of *Trifolium repens*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 25(1): 127—131. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李梦红, 黄现民, 诸葛玉平. 污泥农用对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 95—98.
Li Menghong, Huang Xianmin, Zhuge Yuping. Effects of agricultural utilization of sewage sludge on soil physical and chemical properties and crop output[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [33] 谭国栋, 何春利, 吴敬东, 等. 城市污泥堆肥对菠菜生长和土壤环境的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(15): 8954—8956, 8964.
Tan Guodong, He Chunli, Wu Jingdong, et al. Effect of municipal sludge organic fertilizer on spinach growth and soil environment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(15): 8954—8956, 8964. (in Chinese with English abstract)

- [34] 胡学峰, 卜玉山. 施用城市生活污水对土壤肥力长期效应的影响[J]. 山西农业科学, 2009, 37(6): 50—53.
Hu Xuefeng, Bu Yushan. The long-term effects of sewage sludge to two types of soil fertility[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2009, 37(6): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [35] 李伟, 卜玉山, 周秋香. 污泥对石灰性土壤有机质和全氮磷钾含量的影响[J]. 科学之友, 2009(17): 102—103.
Li Wei, Bu Yushan, Zhou Qiuxiang. Sewage sludge on the contents of organic matter, total N, total P, and total K in calcareous immature soil and calcareous mellow soil[J]. Friend of Science Amateurs, 2009(17): 102—103. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李艳霞, 赵莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 797—801.
Li Yanxia, Zhao Li, Chen Tongbin. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 797—801. (in Chinese with English abstract)
- [37] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 105—110.
- [38] 夏文建, 梁国庆, 周卫, 等. 长期施肥条件下石灰性潮土磷的吸附解吸特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 431—438.
Xia Wenjian, Liang Guoqing, Zhou Wei, et al. Adsorption and desorption characteristics of soil phosphorus in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(3): 431—438. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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.
Li Xueping, Shi Xiaojun, Liu Ping, et al. Environmental risk assessment about purple soil phosphorus loss-Its phosphorus ‘change-point’ [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1153—1158. (in Chinese with English abstract)
- [40] 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.
Wang Cairong, Hu Zhengyi, Yang Linzhang, 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. (in Chinese with English abstract)

Fertility property and phosphorus leaching risk threshold of calcareous soil with sludge

Chang Huiqing, Wu Jie, Wang Qizhen, Jiao Changfeng, Zhu Xiaohui, Wang Hao

(School of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang Key Laboratory of Symbiotic Microorganism and Green Development, Luoyang Key Laboratory of Plant Nutrition and Environmental Ecology, Luoyang 471000, China)

Abstract: China's urban sludge production is huge. The harmless and resource-based disposal of sludge is imminent. Agricultural use is an effective way to dispose sludge after its harmless treatment. Calcareous soil is one of the soil types widely distributed in arid and semi-arid areas of China. The purpose of this study was to clarify the impact of sludge on nutrient status and fertility characteristics of calcareous soil by continuously adding sludge on calcareous soil and to explore the critical value of phosphorus leaching from calcareous soil by adding sludge, so as to provide support to the rational application of sludge in this kind of soil. The typical calcareous soil in the north of China was selected as the object of this study, and the added amount of composted sludge was in accordance with the sludge application amount specified in the control standard for pollutants in agricultural sludge (GB4284-2018). The five treatments of sludge addition amount were designed: 0 t/hm²(Control), 3.75 t/hm²(H1), 7.50 t/hm²(H2), 37.5 t/hm²(H3), 75.0 t/hm²(H4). The pot experiment of two years' continuous planting of winter wheat and summer maize was carried out to analyze the annual and seasonal changes of soil nutrients after adding different levels of composted sludge. The integrated fertility index was determined by Nemero index method according to the relationship between soil available phosphorus Olsen-P and soluble phosphorus CaCl₂-P. The relationship between sludge addition and phosphorus leaching critical value was determined. The results showed that the pH values of calcareous soil decreased with the addition of sludge, but the content of soil organic matter (OM), total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (Olsen-P), available potassium (AK) and soil integrated fertility index (IFI) increased with the increase of sludge addition. During the experiment, the content of soil nutrient in maize season was lower than that in wheat season when the sludge addition was the same in the same production season, and the nutrient content increased with the increase of sludge application years. There was a significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$) positive correlation between the nutrient content and the cumulative application amount of sludge. When the amount of sludge added in each growing season was more than or equal to 37.5 t/hm², the soil nutrient contents of treatments were significantly different from those of control treatments ($P<0.05$). The phosphorus leaching thresholds calculated by the above method was 28.57 mg/kg in calcareous soils. At this time, the amount of sludge application in the field was 61.39 t/hm². The addition of sludge improved the nutrient and fertility status of calcareous soil, and attention should be paid to the risk of soil acidification and phosphorus leaching caused by excessive application of sludge.

Keywords: nutrients; phosphorus; leaching; sludge; calcareous soils; critical values