

长期磷肥不均投入下黄土高原土壤磷素 有效性及与土壤性质关系分析

王彦丽, 范庭, 王旭东, 张育林, 李利敏, 郑洛钧, 刘雅茜

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 由于科学施肥指导工作和生产实际的脱节, 过量施用磷肥的现象普遍存在, 进而造成大量磷素在土壤中累积。准确评价土壤中磷素的有效性是土壤磷素科学管理的基础。国际上梯度扩散薄膜技术(DGT)和传统方法相比可以更为准确地反映土壤中元素的生物有效性。以黄土高原具有代表性的 60 个土壤样品为研究对象, 采用传统 Olsen 法和 DGT 技术评价多年磷肥投入不均条件下黄土高原地区土壤磷储量及其有效性现状, 研究了 DGT 技术测定的 DGT-P 与全磷、Olsen-P 之间的关系, 并利用通径分析探究了土壤磷素有效性和土壤相关理化指标之间的关系。结果表明: 黄土高原地区土壤磷素分布不均匀, 缺磷与富磷现象并存, 富磷土壤主要是耕地样品。磷素活化系数(Olsen-PAC)小于 2.0% 的土壤样品占 76.67%, 绝大部分土壤样品磷素有效性低。耕地磷肥投入量过高, 活化土壤中的无效磷是黄土高原地区磷素科学管理的主要目标。土壤 DGT-P 与全磷、Olsen-P 呈显著相关性($P<0.01$)。黏粒对土壤磷素有效性的直接影响最大, 对 Olsen-PAC 的影响为正效应, 对 DGT 法测定的磷素活化系数(DGT-PAC)的影响为负效应。土壤黏粒含量越高, 有效磷库越大, 土壤中供植物吸收利用的磷反而越少。

关键词: 磷素有效性; 理化指标; DGT; 黄土高原; 不均衡施肥

中图分类号: S158.2; S151.9⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0237-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.035

Analysis of Phosphorus Availability and Its Relationship with Soil Properties in the Loess Plateau Under Long-term Imbalanced Phosphorus Input

WANG Yanli, FAN Ting, WANG Xudong, ZHANG Yulin, LI Limin, ZHENG Mingjun, LIU Yaxi

(Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Due to the disconnection between scientific fertilization guidance and the agricultural production, excessive application of phosphorus fertilizer is widespread, which results in the accumulation of large amounts of phosphorus in soil. Accurate evaluation of phosphorus availability in soil is the basis for scientific management of soil phosphorus. Diffusive gradients in thin films technology (DGT) can more accurately reflect the bioavailability of elements in soils than traditional methods. In this study, 60 representative soil samples from the Loess Plateau were used to evaluate the status of soil phosphorus pool and its availability in the Loess Plateau under the condition of imbalanced fertilizer input for long period, and traditional Olsen and the DGT methods were used. The relationships between DGT-P, and Total-P and Olsen-P were also studied. Path Coefficient Analysis was used to explore the relationship between soil phosphorus availability and relevant soil physical and chemical indicators. The results showed that the distribution of soil phosphorus was uneven in the Loess Plateau. Phosphorus deficiency and phosphorus enrichment coexisted, specifically, phosphorus rich samples were mainly from farmland. Soil samples with phosphorus activation coefficient (PAC) less than 2.0% accounted for 76.67% of the total samples, and most soil samples had low phosphorus availability. Because phosphorus input in farmland was too high, activating the unavailable phosphorus in soil was the

收稿日期: 2019-03-12
资助项目: 国家自然科学基金青年项目(41601324); 国家重点研发计划项目(2018YFD0200405)
第一作者: 王彦丽(1993-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤养分管理研究。E-mail: yanliwang8118@126.com
通信作者: 王旭东(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤与环境化学研究。E-mail: wangxudong01@126.com
张育林(1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤养分管理研究。E-mail: yulinzhangbest@126.com

main target of scientific management of phosphorus in the Loess Plateau. Soil DGT-P was significantly correlated with total-P and Olsen-P ($P<0.01$). Clay content had the greatest direct effect on soil phosphorus availability compared with other factors, and its effect on Olsen-PAC was positive, and the effect on DGT-PAC was negative. The higher the soil clay content, the larger the available phosphorus pool in soil, but the less available phosphorus could be taken up by plants.

Keywords: phosphorus availability; physical and chemical indicators; DGT; Loess Plateau; imbalanced fertilization

施肥一直以来是增加土壤磷含量的直接措施^[1]。根据《中国统计年鉴》^[2],1978—2017 年,中国农作物总播种面积的变化在 $15\ 010\times 10^4\sim 16\ 633\times 10^4\text{ hm}^2$,变化幅度较小。而化肥施用量从 1978 年的 884 万 t 转变为 2017 年的 5 859 万 t。2017 年单质磷肥的施用量是 1980 年的 2.9 倍。据调查^[3],我国土壤磷肥投入量严重不平衡。磷肥的当季利用率相对较低,施入土壤中的磷肥大部分作为无效态逐年累积在土壤中^[4]。磷在土壤中的转化过程非常复杂,受土壤中黏粒、pH、有机质以及碳酸钙等多个因素的影响^[5]。因此,在既要避免磷肥过量使用又要保证作物对磷充分需求的情况下,准确评价土壤中有效磷储量及其影响因素尤为重要。黄土高原地区总面积 64 万 km^2 ,是我国重要的旱作农业区,耕种历史悠久。该地区土层深厚、疏松多孔、质地均一,具有较好的保水性和保肥性^[6]。由于黄土高原地区属半干旱气候,夏季多降暴雨,春季常有大风,水土流失明显。加上人们不合理利用导致土壤退化,养分供应不足,严重限制着农业的发展。因此,为了追求高产,化肥的投入量越来越大,缺乏科学的指导。经过近 40 年的施肥历程,黄土高原地区土壤磷素现状尚未可知。Qiao 等^[7]研究了黄土高原土壤磷的分布情况,结果表明黄土高原土壤全磷含量为 $0.45\sim 0.58\text{ g/kg}$ 。然而全磷含量并不能反映土壤有效磷的高低。在农业生产中,土壤有效磷含量主要受施肥的影响,同时也受土壤基本理化性质^[5]、土地利用类型^[8]、耕作与轮作以及降雨、气温、海拔高度等^[5]自然条件的影响。目前,对黄土高原磷素的研究大多都是在小范围内进行,对全面了解黄土高原地区土壤磷素现状带来了很大的不确定性。因此,对黄土高原土壤磷素现状的整体认识具有重要的意义。植物生长过程中,扩散是植物吸收磷的主要途径^[6],而传统测定土壤速效磷的方法并不能体现扩散的过程。近年来,梯度扩散薄膜技术(diffusive gradients in thin films, DGT)被广泛用于测定多种元素的生物有效性^[9]。有研究^[10]表明,DGT 技术所测的土壤中经扩散的可溶性磷的量可以比较准确地反映植物对磷的需求。目前关于黄土高原磷素状况^[7]以及影响土壤磷素有效性的因素的报导^[4-5]颇多,但经过多年的人为影响

以及自然因素的作用,从区域尺度上评价黄土高原地区土壤磷素现状的研究较少。基于此,本文研究了长期磷肥不平衡投入下黄土高原地区土壤磷素含量现状,结合传统 Olsen 法与 DGT 技术探明 DGT 技术测定的土壤有效磷与传统 Olsen-P 的关系以及土壤相关理化指标对土壤磷素有效性的影响,为黄土高原磷素科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

供试土壤于 2016 年 7 月采集于黄土高原 60 个不同地点(图 1),采集的土壤样品(0—20 cm)带回实验室,风干过筛后,测定其基本理化性质。土壤 pH 用电位法^[11]测定(雷磁 PHS-3CpH 计,上海),土水比为 1:2.5;电导率用电导法^[12]测定(雷磁 DDS-307A 电导率仪,上海),土水比为 1:5;阳离子交换量用 $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{NH}_4\text{OAc}$ 混合试剂浸提法^[12]测定;有机质用重铬酸钾容量法—外加热法^[12]测定;土壤质地用吸管法^[11]测定;碳酸钙用重量差值法^[13]测定:用 0.05 mol/L 盐酸清洗 10 g 土壤样品,直到没有碳酸反应为止,清洗后重量差即为碳酸钙含量。根据质地对供试土壤进行分类,基本理化性质信息见表 1。

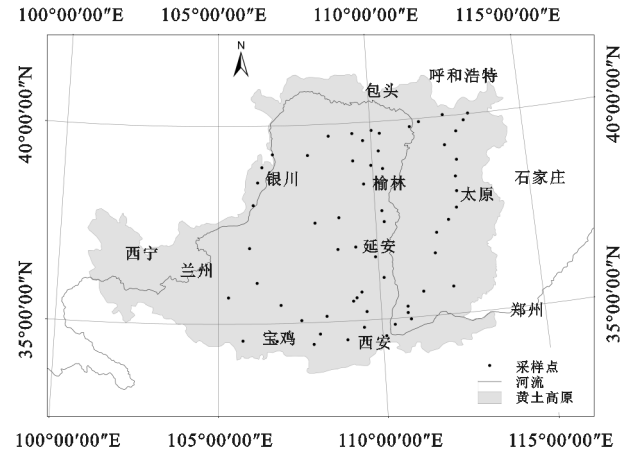


图 1 采样点分布

1.2 分析方法

采集的土壤样品分别分析了土壤全磷、Olsen-P、DGT-P 含量。土壤全磷用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{HClO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法^[12]测定(岛津 UV-2450 紫外可见分光光度计,日本)。土壤 Olsen-P 用 0.5 mol/L

NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法^[12]测定。DGT-P 按照传统方法进行^[14]测定。称取约 30 g 过 2 mm 筛的风干土壤样品于准备好的塑料小盒子中,加水至饱和,于室温下放置 24 h。将 DGT 装置小心压入土壤中,使其和土壤充分接触,盖好塑料盖,测量过程中记录室内温度。24 h 后取出 DGT 装置,用蒸馏水冲洗其表面泥土直至清洁,拆开 DGT 装置,将吸附胶放入 10 mL 离心管中,加 1 mL 1 mol/L HCl,静置 16 h 以上将吸附胶上吸附的磷洗涤下来。待测液中的磷用钼蓝比色法测定。测量期间 DGT 与土壤界面的平均浓度 C_{DGT} ($\mu\text{g/L}$) 的计算公式为: $C_{DGT} =$

$\frac{M\Delta g}{D\Delta t}$ 。式中: M 为待测物质在吸附胶上的积累量 (ng); A 为 DGT 装置窗口的面积 (cm^2); Δg 为扩散胶与滤纸的厚度 (cm); t 为吸附时间 (s); D 为待测元素在扩散胶里的扩散系数 (cm^2/s)。不同元素的扩散系数已通过试验测得,本文所采用的磷的扩散系数为 $5.42 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ (数据来源于 <https://www.dgtresearch.com>)。DGT 装置购于南京维申环保科技有限公司,DGT 装置采用氧化铁吸附胶、聚丙烯酰胺/琼脂糖扩散胶和 PES 滤纸。扩散胶厚度为 0.78 mm,DGT 窗口面积为 2.54 cm^2 ,所采用的浸提时间为 24 h。

表 1 土壤基本理化性质

土壤质地	pH	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	阳离子交换量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳酸钙/ %	黏粒/ %
砂土 (n=3)	8.23±0.14	60±13	1.43±0.09	3.3±1.5	1.39±0.04	2.0±0.6
壤砂土 (n=7)	8.16±0.08	135±82	2.67±0.99	10.8±6.2	2.35±0.23	5.4±1.8
粉黏壤 (n=5)	8.04±0.06	281±108	3.63±1.34	14.4±6.1	0.81±0.33	32.0±3.2
粉壤 (n=33)	8.02±0.25	276±213	3.20±1.06	15.8±8.1	1.50±0.66	14.1±6.2
黏壤 (n=1)	8.02	197	2.84	9.6	2.12	32.0
砂壤 (n=6)	8.01±0.15	182±90	4.02±0.95	15.3±4.0	1.50±0.56	5.4±2.5
粉土 (n=1)	7.91	374	3.64	21.4	1.96	3.2
壤土 (n=4)	7.91±0.19	226±44	2.82±1.44	17.4±13.4	1.90±0.32	19.4±5.9

注:括号中 n 为每种土壤质地的样品数量;表中数据为平均值±标准差。

土壤速效磷是由全磷转化而来,袁可能^[15]将 Olsen-P(mg/kg)与全磷(g/kg)之比作为土壤磷素活化系数 (Olsen-PAC),用来表征全磷与 Olsen-P 的变异状况。Olsen-PAC 的计算公式为:

$$\text{Olsen-PAC} = \frac{\text{Olsen-P}}{\text{全磷} \times 1000} \times 100\%$$

DGT 方法获得的 DGT-P 所表征的土壤磷活化系数 (DGT-PAC) 用 DGT-P 与全磷之比来表示,进而分析其与土壤相关理化指标之间的关系。

1.3 数据分析

数据处理采用 SPSS 20.0 和 Excel 2003 软件,使用 Excel 2003 软件作图。采用通径分析方法分析土壤 Olsen-PAC 和 DGT-PAC 与土壤相关理化指标之间的关系。

2 结果与分析

2.1 黄土高原地区土壤磷素肥力水平

土壤全磷的高低表示土壤供磷能力的潜在容量水平。研究区土壤全磷为 0.21~1.22 g/kg,平均含量为 0.66 g/kg。根据第二次土壤普查土壤养分含量分级标准^[16](表 2),研究区土壤可以分为肥力不同的 5 个级别(表 3),其中 6.67% 的土壤样品达到 I 级水平,25.0% 达到 II 级水平,33.30% 达到 III 级水平,16.67% 的达到 IV 级水平,18.33% 的达到 V 级水平。

表明该地区土壤全磷含量整体较高。I 级、II 级、III 级水平中,耕地土壤样品分别占总数的 75.00%, 80.00%,90.00%,IV 级、V 级水平中草地土壤样品分别占总数的 70.00%,81.82%,表明该地区耕地土壤全磷含量较高,草地土壤全磷含量较低。然而全磷含量的高低并不能表示土壤有效磷水平。所谓的土壤缺磷并不是真正的缺磷,而是缺乏植物可以直接吸收利用的有效磷^[4]。研究区土壤 Olsen-P 含量为 1.04~33.41 mg/kg,平均值为 10.72 mg/kg。根据第二次土壤普查土壤养分含量分级标准^[16],依据 Olsen-P 含量高低可以将研究区土壤分为 5 个类别(表 3)。研究区土壤 Olsen P<10 mg/kg 的土壤样品占总数的 60%,其中磷极缺水平、缺磷水平、磷中下水平中耕地土壤分别占总数的 12.50%,62.50%,75.00%。Olsen-P>10 mg/kg 的土壤样品中耕地占 87.50%,表明黄土高原地区尤其是耕地土壤有效磷分布不均匀,缺磷和富磷现象并存。研究区土壤中 PAC<2.0% 的样品占到总数的 76.67%,表明大部分地区土壤全磷不易转化为 Olsen-P,导致 Olsen-P 容量和供给强度小,土壤磷素有效性低。PAC<2.0% 的土壤样品中耕地占 69.57%,在这部分土壤中加快土壤全磷向速效磷的转化是提高土壤有效磷含量的有效措施。

表 2 土壤全磷和 Olsen-P 含量分级统计标准^[16]

全磷 级别	全磷/ (g · kg ⁻¹)	Olsen-P/ (mg · kg ⁻¹)	Olsen-P 评级
I	>1.0	>40	极好
II	0.8~1.0	20~40	好
III	0.6~0.8	10~20	中上
IV	0.4~0.6	5~10	中下
V	0.2~0.4	3~5	缺
VI	<0.2	<3	极缺

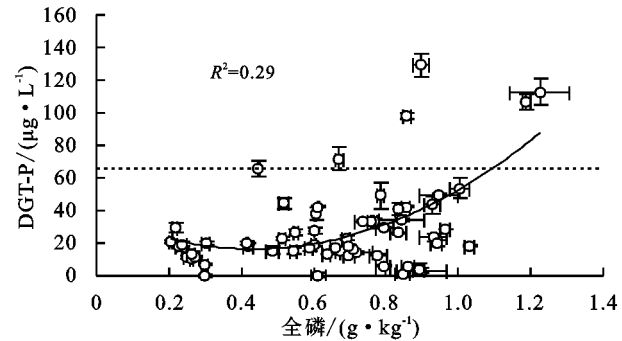
2.2 DGT 技术测定的磷与传统全磷、Olsen-P 之间的关系

从图 2 可以看出,研究区土壤样品中 DGT-P 的变化范围较大,为 0.12~129.06 μg/L,平均值为 29.55 μg/L。Mason 等^[10]研究发现,土壤 DGT-P 对植物产量效应的临界值为 66 μg/L。研究区土壤

表 3 研究区土壤全磷和 Olsen-P 含量及土壤磷素活化系数

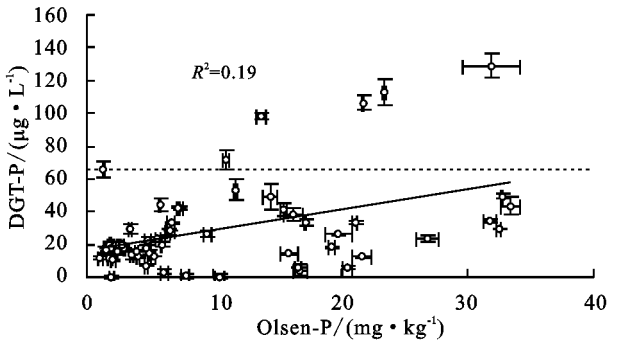
土壤磷素 指标	磷素 评级	土壤磷素含量及 磷素活化系数	N	百分比/%	用地类型
全磷/ (g · kg ⁻¹)	I	1.11±0.06	4	6.67	耕地(3)、园地(1)
	II	0.89±0.01	15	25.00	耕地(12)、草地(1)、园地(1)、林地(1)
	III	0.70±0.01	20	33.33	耕地(18)、草地(2)
	IV	0.51±0.02	10	16.67	耕地(3)、草地(7)
	V	0.26±0.01	11	18.33	耕地(1)、草地(9)、林地(1)
Olsen-P/ (mg · kg ⁻¹)	好	27.09±1.64	11	18.33	耕地(10)、园地(1)
	中上	15.31±0.81	13	21.67	耕地(11)、草地(1)、园地(1)
	中下	6.68±0.34	12	20.00	耕地(9)、草地(2)、林地(1)
	缺	4.25±0.21	8	13.33	耕地(5)、草地(3)
Olsen-PAC/ %	极缺	2.02±0.14	16	26.67	耕地(2)、草地(13)、林地(1)
	PAC>2.0	2.94±0.17	14	23.33	耕地(5)、草地(9)
	PAC<2.0	1.00±0.08	46	76.67	耕地(32)、园地(2)、林地(2)、草地(10)

注:表中 N 为每一磷素评级所对应的土壤样品个数;括号中数字为每种用地类型的土壤样品个数。



中 DGT-P<66 μg/L 的土壤样品占样品总数的 91.67%,表明绝大部分土壤中施入磷肥对植物增产是有效的。占土壤样品总数不到 10%的土壤中虽然施肥对增产也有效,但出于经济效益的考量,这部分土壤在种植作物时可以少施甚至不施磷肥。由土壤全磷、Olsen-P 与 DGT-P 关系(图 2)可以看出,土壤 DGT-P 与全磷呈极显著相关性($R^2=0.29,P<0.01$),与 Olsen-P 呈极显著相关性($R^2=0.19,P<0.01$),表明 DGT-P 值可以反映土壤有效磷含量。传统 Olsen 法测定的土壤有效磷指的是单位土体中的有效磷数量,与植物根系吸收利用的磷量是不同的。而 DGT 技术所测定的磷仅为土壤溶液磷以及土壤固相吸附的容易补充到土壤溶液中的磷,其测定原理与植物根系的吸磷过程及其相似。从理论上讲,土壤 DGT-P 是 Olsen-P 的一部分。

图 2 DGT 技术测定的磷与传统全磷、Olsen-P 的关系



注:图中虚线表示土壤 DGT-P 对小麦产量效应的临界值 66 μg/L^[10]。

2.3 土壤相关理化指标与土壤磷素有效性的关系

土壤磷素活化系数与土壤相关理化指标相关性(表 4)分析表明,土壤 Olsen-PAC 与 pH 显著负相关,与电导率呈显著正相关。

土壤黏粒与 Olsen-PAC 呈显著正相关,与 DGT-PAC 呈显著负相关,这是由于土壤黏粒对磷的固定作用引起的。通径分析进一步表明,土壤相

关理化指标对 Olsen-PAC 的直接影响作用表现为:黏粒(0.52)>pH(-0.31)>电导率(0.29)>碳酸钙(0.24)>有机质(-0.19),其中黏粒、pH、电导率对 Olsen-PAC 的直接影响作用呈显著水平。黏粒、pH、电导率对 Olsen-PAC 的影响以直接作用为主。碳酸钙对 Olsen-PAC 的直接影响作用较大,但二者的相关关系并未达到显著水平。土壤有机质对

Olsen—PAC 的直接影响为负效应,但有机质通过其他性质对 Olsen—PAC 的间接影响作用为正效应,最终导致有机质与 Olsen—PAC 呈正相关。土壤有机质、碳酸钙对 PAC 的影响是直接作用与间接作用综

合的结果。土壤相关理化指标与 DGT—PAC 的通径分析结果表明,土壤黏粒对 DGT—PAC 的直接影响作用最大并呈显著水平。黏粒对 DGT—PAC 的直接影响作用为负效应。

表 4 土壤相关理化指标对土壤磷素有效性的影响作用

指标	相关系数	直接通径系数	间接通径系数				
			pH→Y	电导率→Y	有机质→Y	碳酸钙→Y	黏粒→Y
Olsen—PAC	pH	−0.29 *	−0.31 *		0.05	0.06	−0.02
	电导率	0.28 *	0.29 *	−0.05		−0.05	−0.02
	有机质	0.06	−0.19	0.10	0.07		0.01
	碳酸钙	0.08	0.24	0.02	−0.03	−0.01	
	黏粒	0.54 **	0.52 **	0.04	0.06	0.02	−0.07
DGT—PAC	pH	0.21	0.17		−0.02	0	0.01
	电导率	−0.13	−0.09	0.03		0	0.01
	有机质	−0.13	0	−0.06	−0.02		−0.01
	碳酸钙	−0.05	−0.14	−0.01	0.01	0	
	黏粒	−0.35 **	−0.35 **	−0.02	−0.02	0	0.04

注: * 表示达到 0.05 差异显著性; * * 表示达到 0.01 差异显著性。

3 讨论

3.1 多年磷肥投入不均条件下黄土高原地区土壤磷储量及其有效性

农业生产中的肥料总投入量日益增大^[3]。土壤固磷作用很强,肥料中的水溶性磷酸盐可以与土壤中的铁、铝、锰、钙和黏粒相互作用生成难溶性磷酸盐。在施入磷肥的同时,大量的磷也被土壤固定,造成肥料当季利用率低。这些被固定的磷基本上不能被植物吸收利用,一方面造成作物生长缺磷,另一方面土壤中累积大量的无效态磷。本研究的结果表明,黄土高原地区土壤中全磷含量较高(全磷>0.6 g/kg 的土壤样品占总数的 65%)而速效磷含量较低(Olsen—P<10 mg/kg 的土壤样品占总数的 60%)印证了这一点。土壤磷含量受土地利用类型的影响较大^[8]。研究区土壤中供磷水平较高(Olsen—P>20 mg/kg)的土壤样品中 90.91%为耕地,供磷水平较低(Olsen—P<5 mg/kg)的土壤样品中 66.67%为草地。草地土壤由于没有人工施磷的补充,土壤磷素处于消耗状态。已有研究^[8]得出同样结论,耕地土壤由于人为管理强度较大,土壤速效磷含量显著高于磷林地、园地土壤。

李学敏等^[17]在潮土中的研究表明,PAC<2.0%时表明全磷不易转化为速效磷,土壤磷素利用率低。研究区土壤 PAC<2.0%的样品占 76.67%,表明该地区大部分土壤全磷不容易转化为速效磷,土壤速效磷容量低,磷素有效性较低。施肥并不是提高土壤有效磷的唯一措施,在适量施肥的同时活化土壤中的无效磷(特别是耕地土壤)是黄土高原地区磷素科学管理的主要目标。低分子量有机酸^[18]及解磷微生物^[19]能活化土壤中积累

的无效态磷,促进土壤有机磷向有效性高的形态转化;磷活化剂可以提高土壤有效磷含量,提高磷肥利用效率^[20];另外,石灰性土壤中磷肥以液态进行施用可以减少磷的固定,提高磷的有效性^[21]。

3.2 DGT 技术与传统方法测定的土壤有效磷的关系

在植物生长过程中,扩散是植物根系吸收土壤有效磷的主要途径^[6]。因此,土壤中经扩散作用到达根系表面的可溶性磷最能代表土壤磷的植物有效性。1994 年由 Davison 等^[9]发明的 DGT 技术以菲克第一扩散定律为理论依据,在预测植物有效磷方面具有更高的准确性。Mason 等^[10]通过小麦试验,根据 Mitscherlich 方程 90%相对产量计算得出 DGT—P 对小麦产量的临界值为 66 μg/L。研究区土壤中 DGT—P<66 μg/L 的土壤样品占样品总数 91.67%。然而土壤 DGT—P 的大小受土壤黏粒含量影响较大。经比较发现,黄土高原地区土壤黏粒含量较 Mason 等^[10]研究所用的土壤黏粒含量高。在黏粒相对较高的土壤中,植物生长过程中可以吸收利用黏粒中固定的一部分磷。因此,在黏粒含量相对较高的土壤中该临界值会相对较小,反之在黏粒含量较低的土壤中会相对较高。除此之外,作物种类不同,对磷的吸收利用效率也不同。因此,黄土高原地区土壤 DGT—P 对磷的吸收利用效率的临界值有待进一步研究。

Mason 等^[14]研究了 DGT 与树脂法测定的土壤有效磷之间的关系,表明 DGT—P 与树脂磷不存在显著相关性,DGT 技术测定的土壤磷与树脂磷是不同的。Kruse 等^[22]将 DGT 方法与 22 种传统方法进行了比较,得出 DGT 提取的土壤有效磷是唯一和植物吸收

利用的磷具有高度相关性的。也有研究^[23]发现,常规 Olsen 法、Colwell 法、Bray-I 法、Mehlich-III 法以及稀盐溶液法测定的土壤有效磷中包含一部分植物不能吸收利用的磷,而 DGT 技术测定的土壤有效磷仅为植物根系可以接触到的有效磷。本研究表明,土壤 DGT-P 与全磷、Olsen-P 均具有显著相关性,但与 Olsen-P 的相关关系极低($R^2=0.19$),进一步证实了 Olsen 法测定的是土壤磷的静态指标,而 DGT 技术测定的植物可利用的磷库所体现的是动态过程。

3.3 土壤相关理化指标对土壤磷素有效性的影响

土壤中磷素转化过程的影响因素十分复杂,土壤理化性质、温度、水分以及种植方式都会影响土壤中不同形态磷之间的转化以及植物的有效性^[5]。Erel 等^[24]研究表明,土壤性质决定了植物从土壤中吸收磷的效率。土壤 pH、有机质、黏粒、碳酸钙等不同程度的影响土壤磷的吸附解吸过程。本研究表明,土壤黏粒含量对土壤 Olsen-PAC、DGT-PAC 的直接影响最大并呈显著水平。Hou 等^[25]研究表明,可溶性无机磷库与含磷原生矿物呈正相关,与次生矿物呈负相关。这是由于在同一原生矿物中,含磷越高,无机磷库就越大;但当原生矿物风化为较为细小的颗粒之后,矿物中的磷就会被吸附,因此测出的可溶性无机磷的含量会降低。土壤黏粒对 Olsen-PAC 直接影响作用表现为正值说明土壤黏粒含量越高,用 Olsen 法测的土壤有效磷库越大,然而植物对黏粒含量高的土壤中速效磷的利用率是随着黏粒含量增加而减少。相反,土壤黏粒对 DGT-PAC 的直接影响作用表现为负效应,在一定条件下和植物对磷的吸收关系比较吻合,可能是由于土壤黏粒含量越高,对磷的吸附能力越强,土壤溶液磷和土壤固相中可补充到土壤溶液中的磷较少。土壤溶液磷是植物最容易吸收利用的部分。Olsen-P 是由 NaHCO_3 浸提的土壤有效磷,其中 Na^+ 是高度分散剂,可以将土壤内部的有效磷也测定出来,而这部分磷在植物在生长过程中是难以被吸收利用的。而 DGT-P 是介于土壤溶液磷所表示的“强度”与 Olsen-P 所表示的“容量”之间,对当季植物来说是有效的。因此,Olsen-PAC 表征土壤中磷的有效性,DGT-PAC 可以在一定程度上表征土壤中磷的植物有效性。因此,本研究发现,在黄土高原地区土壤性质中主要影响土壤磷有效性的因素是黏粒含量。

4 结论

(1)本研究以全磷、Olsen-P 以及土壤磷素活化系数(Olsen-PAC)评价了黄土高原地区土壤磷储量及其有效性现状,结果表明黄土高原地区经过多年不

均施肥,磷素含量变化大,耕地土壤 Olsen-P 含量相对较高,大部分土壤 Olsen-PAC 较低,全磷不容易转化为速效磷,土壤磷有效性较低。黄土高原地区耕地土壤应注重土壤中磷素的活化措施的应用。

(2)结合梯度扩散薄膜技术研究了 DGT-P 与传统 Olsen-P,土壤磷素有效性与土壤相关理化指标之间的关系,结果表明,土壤 DGT-P 与全磷、Olsen-P 均呈显著相关性;土壤黏粒对土壤 Olsen-PAC 的直接影响作用最大并呈显著水平,对 DGT-PAC 的直接影响作用最大并呈负显著水平。

参考文献:

- [1] 俄胜哲,杨志奇,曾希柏,等.长期施肥黄绵土有效磷含量演变及其与磷素平衡和作物产量的关系[J].应用生态学报,2017,28(11):3589-3598.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [3] 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.
- [4] 王永壮,陈欣,史奕.农田土壤磷素有效性及影响因素[J].应用生态学报,2013,24(1):260-268.
- [5] Ziadi N, Whalen J K, Messiga A J, et al. Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems [J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 122:85-126.
- [6] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3 版.北京:中国农业出版社,2010.
- [7] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Vertical distribution of soil total nitrogen and soil total phosphorus in the critical zone on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2018,166:310-316.
- [8] Maharjan M, Maranguit D, Kuzyakov Y. Phosphorus fractions in subtropical soils depending on land use [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018,87:17-24.
- [9] Davison W, Zhang H. In situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels [J]. *Nature*, 1994,367(6463):546-548.
- [10] Mason S, McNeill A, McLaughlin M J, et al. Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods [J]. *Plant and Soil*, 2010,337(1/2):243-258.
- [11] 郑必昭.土壤分析技术指南[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [13] Zhang Y L, Wang Y L, Tan Y R, et al. How air-drying affects DGT P results in calcareous soils [J]. *Polish Journal Environment Study*, 2019,28(3):1507-1515.

- birch (*Betula* spp.) biochar and pyrolysis temperature on soil properties and plant growth [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 224-234.
- [10] 郭彦蓉, 曾辉, 刘阳生, 等. 生物质炭修复有机物污染土壤的研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 8-13.
- [11] 葛晓改, 周本智, 肖文发, 等. 生物质炭输入对土壤碳排放的激发效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 339-345.
- [12] Manuel O, Jose A, Vidal J A, et al. Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8): 1177-1187.
- [13] Mukherjee A, Lal R. The biochar dilemma [J]. *Soil Research*, 2014, 52(3): 217-230.
- [14] 刘铭龙, 刘晓雨, 潘根兴. 生物质炭对植物表型及其相关基因表达影响的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 789-798.
- [15] Kearns J P, Shimabuku K K, Mahoney R B, et al. Meeting multiple water quality objectives through treatment using locally generated char: Improving organoleptic properties and removing synthetic organic contaminants and disinfection by-products [J]. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2015, 5(3): 359-372.
- [16] 王建超, 饶潇潇, 周震峰. 施用生物炭对花生产量及吸收累积邻苯二甲酸酯的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(增刊 1): 329-333.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008: 30-106.
- [18] Zhang Y, Du N, Wang L, et al. Physical and chemical indices of cucumber seedling leaves under dibutyl phthalate stress [J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2015, 22: 3477-3488.
- [19] 张小凯, 何丽芝, 陆扣萍, 等. 生物质炭修复有机物污染土壤的研究进展[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 970-977.
- [20] Salar F S, Shahram T. Effect of biochar on growth and ion contents of bean plant under saline condition [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(S1): 11556-11564.
- [21] 王晓维, 徐健程, 孙丹平, 等. 生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 640-646.
- [22] 樊诗亮. 生物质炭对土壤中邻苯二甲酸二丁酯(DBP)生物有效性及微生物群落结构多样性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [23] 孙海燕, 王炎. 辣椒根系分泌的潜力化感物质对生菜幼苗抗氧化代谢的影响[J]. *植物生理学通讯*, 2012, 48(9): 887-894.
- [24] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 16(4): 444-448.
- [25] 黄韡, 吴承祯, 钱莲文. 生物质炭对铝胁迫下常绿杨生理特征的影响[J]. *莆田学院学报*, 2014, 21(2): 42-45.
- (上接第 242 页)
- [14] Mason S, Hamon R, Zhang H, et al. Investigating chemical constraints to the measurement of phosphorus in soils using diffusive gradients in thin films (DGT) and resin methods [J]. *Talanta*, 2008, 74(4): 779-787.
- [15] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [16] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990.
- [17] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 259-260.
- [18] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2189-2198.
- [19] 滕泽栋, 李敏, 朱静, 等. 解磷微生物对土壤磷资源利用影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 229-235.
- [20] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 612: 522-537.
- [21] Wang J, Chu G X. Phosphate fertilizer form and application strategy affect phosphorus mobility and transformation in a drip-irrigated calcareous soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(6): 914-922.
- [22] Kruse J, Abraham M, Amelung W, et al. Innovative methods in soil phosphorus research: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(1): 43-88.
- [23] Six L, Pypers P, Degryse F, et al. The performance of DGT versus conventional soil phosphorus tests in tropical soils-An isotope dilution study [J]. *Plant and Soil*, 2012, 359(1/2): 267-279.
- [24] Erel R, Annette B, Capowiez L, et al. Soil type determines how root and rhizosphere traits relate to phosphorus acquisition in field-grown maize genotypes [J]. *Plant and Soil*, 2017, 412: 115-132.
- [25] Hou E Q, Chen C R, Kuang Y W, et al. A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30: 1300-1309.