



## 陕西关中冬小麦/夏玉米区土壤磷素特征

刘琳, 吉冰洁, 李若楠, BATBAYAR Javkhlan, 张树兰, 杨学云

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

**摘要:**【目的】研究陕西关中冬小麦/夏玉米区土壤磷素分布特征及近 30 年农田土壤有效磷变化, 对维持和提高土壤质量和土地生产力, 合理施磷和减磷增效具有重要意义。【方法】利用 2011 年在陕西关中平原冬小麦/夏玉米种植区选择的 10 个典型县、区采集的 458 个土壤样本, 通过与 1980 年土壤普查土壤有效磷含量数据的对比, 分析近 30 年来陕西关中农田耕层土壤有效磷的变化及当前土壤磷库分布特征。【结果】30 年来该区农田耕层土壤有效磷含量整体呈显著上升, 宝鸡市、咸阳市和渭南市的平均有效磷含量分别为 26.09、27.50 和 21.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与第二次土壤普查有效磷含量结果相比, 增幅分别达 334.83%、276.71% 和 231.23%。高有效磷等级地块的比例均有大幅度增加, 其中以有效磷含量 15—30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的增幅最大, 有效磷含量 <10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的降幅最大。有效磷和无机磷总量分布呈现出西部(宝鸡市)和中部(咸阳市)高于东部(渭南市), 而有机磷含量则相反。当前关中地区大面积土壤有效磷含量高于农学阈值, 可满足作物高产时的磷素供应。同时, 宝鸡、咸阳市土壤有效磷含量 >37  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的累积分布概率超过 20%, 水溶性磷含量 >2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的累积分布概率超过 22%, 存在较高的水环境污染风险。【结论】长期集约化高强度种植条件下含磷肥料的过量施用显著提高了土壤有效磷含量。从保护环境和合理利用有限的磷资源角度考虑, 应合理调控磷肥施用, 做到因土施肥, 按需供肥。

**关键词:** 土壤有效磷; 冬小麦/夏玉米体系; 土壤有机磷; 土壤无机磷; 土壤有机质

## Characteristics of Soil Phosphorus in Winter Wheat/Summer Maize Cropping in Shaanxi Guanzhong Plain

LIU Lin, JI BingJie, LI RuoNan, BATBAYAR Javkhlan, ZHANG ShuLan, YANG XueYun

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

**Abstract:** 【Objective】It is of great significance to maintain and improve soil quality and land productivity, meanwhile enhance the phosphorus (P) use efficiency by studying the distribution characteristics and changes of soil phosphorus in winter wheat/summer maize cropping in Shaanxi Guanzhong Plain in recent 30 years. 【Method】Based on 458 soil samples collected in total in 2011 from 10 typical counties in winter wheat/summer maize cropping in Guanzhong Plain analysis data, we compared its Olsen P content with the soil survey data in 1980s, and also explored the distribution characteristics of the current soil phosphorus pools at the regional level. 【Result】The results showed that the soil Olsen P content in the plough layer soils significantly increased during the past 30 years. The mean values of soil Olsen P in Baoji, Xianyang and Weinan were 26.09  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 27.50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and 21.53  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, compared with soil survey data in 1980s, the corresponding increasing rate were 334.83%, 276.71% and 231.23%, respectively. The proportions of cultivated land with higher soil Olsen P levels were significantly increased, with the largest increase was observed in 15-30  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  and the largest decrease in Olsen P <10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The total distribution of soil Olsen P and inorganic

收稿日期: 2019-06-05; 接受日期: 2019-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200205)

联系方式: 刘琳, E-mail: liulin6060@nwfau.edu.cn. 通信作者杨学云, E-mail: xueyunyang@hotmail.com

phosphorus was higher in the west (Baoji City) and the middle (Xianyang City) than in the east (Weinan City), and organic phosphorus content was opposite. At present, the soil Olsen P level in the large area of Guanzhong Plain under winter wheat/summer maize cropping was higher than the agronomic threshold, which could meet the supply of phosphorus in high yield crops. Meanwhile, the cumulative distribution probability of soil Olsen P content (greater than  $37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) was more than 20% in Baoji and Xianyang, the cumulative distribution probability of water-soluble P content (greater than  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) was more than 22%, so there would be a higher risk of water environment pollution. 【Conclusion】 Excessive application of phosphorus fertilizer under long-term intensive and high-intensity planting conditions significantly increased the Olsen P content in soil. Considering the protection of environment and rational utilization of limited phosphorus resources, the application of phosphorus fertilizer should be regulated reasonably, so as to apply fertilizer according to soil and supply fertilizer according to demand.

**Key words:** soil Olsen P; winter wheat/summer maize system; total-organic P; total-inorganic P; soil organic matter

## 0 引言

【研究意义】磷是作物生长的必需元素,参与植物体内多种生物化学过程,对提高作物产量、增强作物抗性和改善作物品质有重要作用<sup>[1]</sup>。由于磷易被土壤固持,施入土壤中的磷通常以作物难利用的形态存在,而农户为了高产,往往会投入更多磷肥。就陕西关中平原而言,超过 50%的农户磷肥施用量远高于当地的推荐量<sup>[2]</sup>。过量的磷肥施入土壤中,往往造成当季磷肥利用率低下,我国主要粮食作物当季磷肥利用率仅为 7.3%—20.1%<sup>[3]</sup>,导致磷资源浪费。虽然我国磷铁矿资源丰富,位居全球第二,但磷是不可再生的资源,有学者预测未来我国将成为全球磷资源危机最严重的国家之一<sup>[4]</sup>。此外,大量残留的磷素也提高了土壤磷素通过地表径流或亚地表径流进入水体,导致富营养化的风险<sup>[5-6]</sup>。因此,了解土壤磷素水平,因土制宜,对合理有效的施用磷肥,实现减磷增效,发展可持续农业是非常必要的。【前人研究进展】土壤磷水平通常用全磷和有效磷来表征,前者是磷的容量指标,但不能反应当季利用潜力,后者是强度指标,可反映土壤中可被当季作物吸收的磷素水平及产量潜力<sup>[7]</sup>。1980 年全国第二次土壤普查时,全国约 79%的耕地土壤磷素处于匮乏状态,有效磷含量平均仅  $7.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低于  $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的土壤面积约占全国耕地面积的 60%。随着磷肥的大量投入,到 2006 年平均土壤有效磷含量已提升到  $21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。根据作物产量对土壤有效磷含量的响应关系,当土壤有效磷含量低于一定水平,作物产量随施磷量的增加而增加,当有效磷含量高于该水平,作物对施磷无显著响应,这一土壤磷水平即为作物达到高产时土壤磷素的农学阈值<sup>[9]</sup>,其值因作物类型、土壤类型及气候条件的差异而变化。据报道,我国大豆、小麦和玉米达到高产时土壤 Olsen P 含量变幅分别为  $8.5\text{—}13.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,

$12.7\text{—}16.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $11.0\text{—}28.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[10-13]</sup>。据此,了解土壤磷素状况,根据土壤磷素水平按需施肥,既可保持作物高产,又可减少环境污染、节约磷资源。

【本研究切入点】冬小麦/夏玉米是陕西关中地区的主要种植方式,其种植面积约占全省的 51.68%,粮食产量贡献约占全省的 52.9%<sup>[14]</sup>,关中平原也是西北地区集约化种植强度最高的地区。当前,该地区的磷素研究多集中于基于土壤养分丰缺和产量的磷肥推荐<sup>[15-17]</sup>、土壤磷素变化和形态分布<sup>[18-20]</sup>,以及局部地区土壤磷素演变<sup>[21]</sup>。缺少针对陕西关中地区较为全面完整的磷素分布特征的文献资料。【拟解决的关键问题】本文利用 1980 年陕西关中地区的土壤普查数据与 2011 年在该地区采集的大量土壤样本的分析数据,研究该地区近 30 年土壤有效磷的变化及当前土壤磷素的分布特征,为维持土壤肥力、合理施用磷肥及实现减磷增效提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为陕西省中部的关中平原冬小麦/夏玉米一年两熟区,属暖温带半湿润气候,平均海拔约 500 m,年均降水量约 500—650 mm。主要土壤以旱耕土垫人为土为主,多为石灰性土壤, pH 介于 7.5—8.5 之间。冬小麦于 10 月初播种,次年 6 月中旬收获,夏玉米在小麦收获后即时播种,于当年 9 月底 10 月初收获。

### 1.2 样品采集

土壤样品采自 2011 年 8—10 月,采集根据地(市)小麦/玉米种植面积选择代表性县(区)。本研究涉及陕西关中地区 3 个地(市)的 10 个具有代表性的县(区),每个县(区)选择 4—18 个乡(镇),每个乡(镇)选择 3—10 个村,每个村选择 4—5 个地块为采样区(点),每个采样区(点)为  $0.5\text{—}0.8 \text{ hm}^2$ 。各地区样品采集分布及样本量如表 1 所示。土壤样本

采集时用直径约 2.8 cm 土钻按棋盘格在采样区（点）采集耕层（0—20 cm）土样 20 钻，混合均匀，装入布袋带回实验室，拣去石砾和动植物残体，风干并过 2 mm 及 100 目筛备用。

1.3 样品分析

土壤有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>，土壤有机质采用重铬酸钾外加热-FeSO<sub>4</sub> 滴定法<sup>[22]</sup>，土壤全磷采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>，土壤水溶性磷采用蒸馏水浸提-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>，土壤有机磷含量采用灼烧法<sup>[23]</sup>，由灼烧后提取的土壤磷含量减去未灼烧提取的土壤无机磷含量得到，土壤无机磷含量由土壤全磷与土壤有机磷的差值得到。

1.4 数据统计与分析

文中的陕西省第二次土壤普查耕地土壤有效磷含

量数据源于《陕西省土壤普查数据》。本文在第二次普查的基础上将土壤有效磷含量等级进行合并，将其划分为 5 个等级，分别为 >40 mg·kg<sup>-1</sup>、30—40 mg·kg<sup>-1</sup>、15—30 mg·kg<sup>-1</sup>、10—15 mg·kg<sup>-1</sup>、<10 mg·kg<sup>-1</sup>。各市平均土壤有效磷含量由各地区、各级别土壤有效磷含量的中值与该级别耕地面积加权平均后得到。

$$P_i = \frac{\sum P_j \times A_j}{\sum A_j} (j=1,2,3,\dots)$$

(1)

式中， $P_i$  为  $i$  地区平均土壤有效磷含量（mg·kg<sup>-1</sup>）； $P_j$  为  $i$  地区土壤有效磷  $j$  等级的中值（mg·kg<sup>-1</sup>）； $A_j$  为  $i$  地区土壤有效磷  $j$  等级内的实际面积（hm<sup>2</sup>）。各市其他磷素形态的平均含量同样由该公式计算得到。

数据分析采用 Excel 2010。

表 1 土壤样品采集地区分布及样本容量

Table 1 Distribution and sample size of soil samples collection area.

地市	县（区）	乡（镇）	样本量
City	County	Town	Sample size
宝鸡	陈仓	虢镇 Haozhen、阳平关 Yangpingguan、盘溪 Panxi、天王 Tianwang、钓渭 Diaowei、潘溪 Panxi、周原 Zhouyuan、	28
	Baoji	慕仪 Muyi	
	岐山	枣林 Zaolin、祝家庄 Zhujiashuang、大营 Daying、凤鸣 Fengming、顾郡 Gujun、益店 Yidian、浦村 Pucun、	36
	Qishan	青化 Qinghua、焦西 Jiaoxi	
扶风	扶风	午井 Wujing、段家 Duanjia、降帐 Jiangzhang、杏林 Xinglin、召公 Zhaogong、城关 Chengguan、法门 Famen、南	64
	Fufeng	阳 Nanyang、天度 Tiandu	
	兴平	赵村 Zhaocun、马嵬 Mawei、南市 Nanshi、庄头 Zhuangtou、桑镇 Sangzhen、汤坊 Tangfang、田阜 Tianfu、	53
	Xianyang	阜寨 Fuzhai、南位 Nanwei、西关 Xiguan、东城办 Dongchengban	
三原	三原	大程 Dacheng、徐木 Xumu、独李 Duli、渠岸 Quan、安乐 Anle、波西 Boxi、高渠 Gaoqu、鲁桥 Luqiao、	56
	Sanyuan	嵯峨 Cuoe、新兴 Xinxing、马额 Mae、陵前 Lingqian、西阳 Xiyang、城关 Chengguan	
	泾阳	王桥 Wangqiao、桥底 Qiaodi、云阳 Yunyang、三渠 Sanqu、泾干 Jinggan、永乐 Yongle、崇文 Chongwen、	34
	Jingyang	高庄 Gaozhuang、太平 Taiping、三渠 Sanqu	
武功	武功	普集 Puji、苏坊 Sufang、大庄 Dazhuang、贞元 Zhenyuan、游风 Youfeng、武功 Wugong、小村 Xiaocun、	53
	Wugong	长宁 Changning	
渭南	临渭	吝店 Lindian、官路 Guanlu、龙背 Longbei、固市 Gushi、孝义 Xiaoyi、官底 Guandi、下吉 Xiaji、官道	46
	Weinan	Guandao、辛市 Xinshi、交斜 Jiaoxia、南师 Nanshi	
	蒲城	荆姚 Jingyao、原任 Yuanren、党睦 Dangmu、陈庄 Chenzhuang、坡头 Potou、椿林 Chunlin、龙阳 Longyang、	33
	Pucheng	城关 Chengguan、翔春 Xiangchun、平路庙 Pinglumiao、贾曲 Jiaqu、兴镇 Xingzhen、三合 Sanhe	
富平	富平	华朱 Huazhu、曹村 Caocun、薛镇 Xuezhen、美塬 Meiyuan、到贤 Daoxian、吕村 Lycun、淡村 Dancun、	55
	Fuping	觅子 Mizi、南社 Nanshe、留古 Liugu、东上官 Dongshangguan、王寮 Wangliao、刘集 Liuji、小惠 Xiaohui、	
		流曲 Liuqu、张桥 Zhangqiao、城关 Chengguan	
合计 Total	10	110	458

2 结果

2.1 耕层土壤有效磷含量变化

陕西关中 3 个代表性（地）市 10 个县（区）小麦/玉米种植区耕层土壤有效磷含量近 30 年的变化如表 2。第二次土壤普查时（1980 年），宝鸡、咸阳和渭

南 3 个（地）市土壤有效磷平均含量分别为 6.0、7.3 和 6.5 mg·kg<sup>-1</sup>。有效磷含量 <10 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积最大，三地市 Olsen P 含量 <10 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积分别占其土地总面积的 85.85%、83.20%和 80.52%，宝鸡市岐山县该类土地分布面积最大，占 97.92%；咸阳市兴平县和渭南市临渭区此含量的土地面积占

比较小，分别占 43.62%和 44.00%；3 个（地）市土壤 Olsen P 含量为 10—15 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积占比居其次，分别占其各自总面积的 9.15%、9.87%和 13.13%，该含量土壤以宝鸡市岐山县面积占比最小，仅占 1.38%；咸阳市兴平县（市）和渭南市临渭区分布面积占比较大，分别为 23.3%和 39.7%。3 个（地）市土壤 Olsen P 含量高于 15 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积比例平均分别为 4.99%、6.93%和 6.36%，且主要在 15—30 mg·kg<sup>-1</sup> 之间。2011 年，宝鸡、咸阳和渭南 3 个（地）市平均土壤有效磷含量分别为 26.09、27.50 和 21.53 mg·kg<sup>-1</sup>，且以 15—30 mg·kg<sup>-1</sup> 含量的土地面积占比最大，分别为 55.00%、46.00%和 57.00%，宝鸡市陈仓区，渭南市临渭区在此区间分布面积最大，分别达 64.29%和 63.04%；咸阳市武功县较低，仅有 30.19%；

宝鸡市岐山县和咸阳市三原县在该等级面积占比提升较大，与 1980 年土壤有效磷分布面积相比，分别扩大了 75.4 和 20.8 倍。宝鸡市、咸阳市和渭南市 Olsen P 含量 > 30 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积分别占 33.00%、36.00%和 20.00%，仅次于 15—30 mg·kg<sup>-1</sup> Olsen P 土地面积；3 个（地）市土壤 Olsen P 含量在 10—15 mg·kg<sup>-1</sup> 之间的土地面积分别为 10%、16%和 18%。而有效磷含量 < 10 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积占比最小，3 个代表（地）市中除渭南市占比为 6%外，宝鸡市和咸阳市面积占比均低于 3%，较 1980 年面积比例降幅分别达 97.67%、96.39%和 92.59%。但渭南市和其他两市有所不同是，土壤有效磷为 10—15 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积居其次，而宝鸡市和咸阳市均以有效磷为 30—40 mg·kg<sup>-1</sup> 的土地面积居其次（表 2）。

表 2 陕西关中地区 1980 年和 2011 年耕层土壤各等级有效磷含量面积比例及平均值  
Table 2 Mean value of Olsen P and proportion of different Olsen P level in surface soil in 1980 and 2011 in Shaanxi Guanzhong Plain

取样地点	1980 年耕层土壤各等级有效磷含量面积比例					有效磷含	2011 年耕层土壤各等级有效磷含量面积比例					有效磷含
Sampling	Proportion of Olsen-P level in surface soil in 1980 (%)					量平均值	Proportion of Olsen-P level in surface soil in 2011 (%)					量平均值
site	>40	30-40	15-30	10-15	<10	Mean of Olsen-P	>40	30-40	15-30	10-15	<10	Mean of Olsen-P
	(mg·kg <sup>-1</sup> )					(mg·kg <sup>-1</sup> )	(mg·kg <sup>-1</sup> )					(mg·kg <sup>-1</sup> )
宝鸡市	0.07	0.09	4.83	9.15	85.85	6.00	15.00	18.00	55.00	10.00	2.00	26.09
Baoji												
陈仓区	-	-	4.18	9.23	86.59	5.80	7.14	14.29	64.29	14.29	-	21.53
Chencang												
岐山县	-	-	0.70	1.38	97.92	3.10	16.67	22.22	52.78	8.33	-	26.54
Qishan												
扶风县	-	-	5.43	8.84	85.73	6.10	17.19	15.63	53.13	9.38	4.69	27.42
Fufeng												
咸阳市	0.27	0.66	6.00	9.87	83.20	7.30	17.00	19.00	46.00	16.00	3.00	27.50
Xianyang												
兴平县	1.62	5.57	25.99	23.20	43.62	13.10	18.87	18.87	50.94	9.43	1.89	28.51
Xingping												
三原县	-	-	2.49	10.09	87.42	5.60	5.36	12.50	51.79	23.21	7.14	21.20
Sanyuan												
泾阳县	-	0.61	6.07	14.17	79.15	7.90	16.13	19.35	51.61	9.68	3.23	26.19
Jingyang												
武功县	-	-	13.05	18.33	68.62	9.60	28.3	24.53	30.19	16.98	-	35.74
Wugong												
渭南市	0.12	0.51	5.73	13.13	80.52	6.50	7.00	13.00	57.00	18.00	5.97	21.53
Weinan												
临渭区	0.20	2.20	13.90	39.70	44.00	6.80	-	4.35	63.04	23.91	8.70	17.70
Linwei												
蒲城县	0.13	0.19	5.08	12.06	82.54	7.00	9.09	15.15	54.55	9.09	12.12	21.89
Pucheng												
富平县	-	0.10	4.10	8.50	87.30	6.00	10.91	18.18	52.73	18.18	-	24.44
Fuping												

2.2 土壤全磷、有机磷、无机磷和有效磷含量及其占全磷比例

关中冬小麦-夏玉米种植区 10 个代表性县（区）土壤全磷含量介于 0.91—1.20 g·kg<sup>-1</sup> 之间；宝鸡、咸阳和渭南 3 个代表性地（市）2011 年土壤全磷平均含量分别为 1.10、1.08 和 0.95 g·kg<sup>-1</sup>，以渭南市稍低（表 3）。宝鸡、咸阳和渭南三市的平均有机磷含量分别为 145.95、155.39 和 237.75 mg·kg<sup>-1</sup>，其占全磷比例分别达 13.27%、14.39%和 25.03%。各县（区）土壤有机磷含量介于 108.54—266.20 mg·kg<sup>-1</sup>，其占全磷比例介于 9.25%—29.15%之间，且渭南市各县（区）有机磷含量普遍高于其他县（区）。宝鸡市、咸阳市和渭南

市的无机磷含量平均分别为 901.26、899.45 和 711.52 mg·kg<sup>-1</sup>，其占全磷比例分别为 81.93%、83.28%和 75.00%，与有机磷占全磷比例趋势相反；宝鸡市扶风县土壤无机磷含量最高，为 1 065.34 mg·kg<sup>-1</sup>，占土壤全磷的 90.75%；渭南市临渭区无机磷含量最小，为 646.93 mg·kg<sup>-1</sup>，其占全磷比例为 70.85%。宝鸡市、咸阳市和渭南市土壤有效磷含量平均分别为 26.09、27.50 和 21.53 mg·kg<sup>-1</sup>，占土壤全磷的比例分别为 2.37%、2.55%和 2.27%。

在本研究中，土壤有机磷含量与土壤全磷无相关关系，而无机磷含量与土壤全磷呈极显著的正相关关系（*P*<0.01），决定系数为 0.7132（图 1）。

表 3 陕西关中各县市小麦/玉米区耕层土壤全磷、有机磷、无机磷和有效磷含量及其占土壤全磷的比例

Table 3 Soil total P (TP), organic P (OP), inorganic P (IP) and Olsen P contents in surface soil and the its proportions in TP in wheat/maize cropping in Shaanxi Guanzhong Plain

取样地点 Sampling site	全磷含量 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	有机磷含量 Total-organic P (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机磷/全磷 (Total-organic P/Total P) (%)	无机磷含量 Total- inorganic P (mg·kg <sup>-1</sup> )	无机磷/全磷 (Total-inorganic P/Total P) (%)	有效磷含量 Olsen P (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/全磷 (PAC) (%)
宝鸡市 Baoji	1.10	145.95	13.27	901.26	81.93	26.09	2.37
陈仓区 Chencang	1.05±0.17	203.00±116.9	19.32	847.96±197.97	80.68	21.53±9.63	2.05
岐山县 Qishan	1.19±0.19	232.20±155.02	19.48	960.04±223.48	80.52	26.54±10.10	2.23
扶风县 Fufeng	1.17±0.25	108.54±99.52	9.25	1065.34±255.48	90.75	27.42±11.73	2.34
咸阳市 Xianyang	1.08	155.39	14.39	899.45	83.28	27.50	2.55
兴平县 Xingping	1.15±0.21	172.48±115.28	14.97	979.55±216.54	85.03	28.51±14.63	2.48
三原县 Sanyuan	0.98±0.16	166.56±125.93	17.08	808.36±199.83	82.92	21.20±11.31	2.16
泾阳县 Jingyang	1.09±0.18	186.63±129.61	17.07	906.97±208.66	82.93	26.19±13.39	2.40
武功县 Wugong	1.20±0.21	177.72±114.73	14.87	1017.36±179.73	85.13	35.74±17.25	2.98
渭南市 Weinan	0.95	237.75	25.03	711.52	75.00	21.53	2.27
临渭区 Linwei	0.91±0.17	266.20±120.66	29.15	646.93±196.70	70.85	17.70±7.00	1.95
蒲城县 Pucheng	0.92±0.15	232.87±80.54	25.22	690.41±153.68	74.78	21.89±11.64	2.38
富平县 Fuping	0.96±0.18	263.76±106.22	27.49	695.86±184.71	72.51	24.44±12.24	2.55

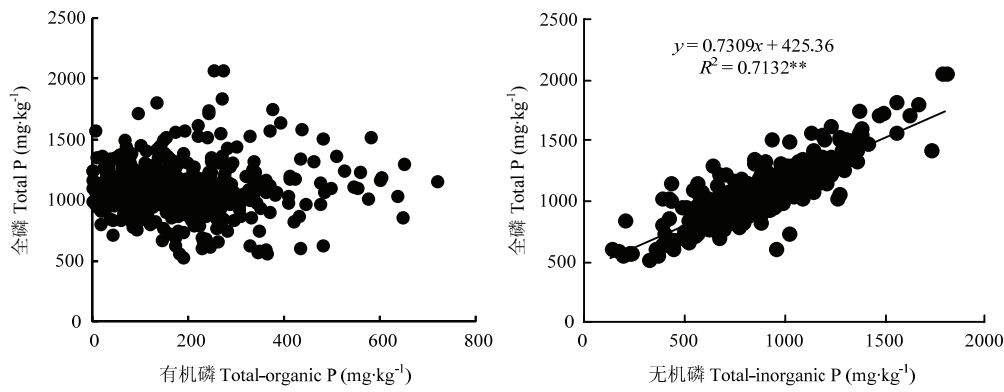
表中全磷、有机磷、无机磷和有效磷含量数据为平均值±标准差

The data of total P, total-organic P, total-inorganic P and Olsen P content in the table were Mean±SD

2.3 土壤全磷、有效磷及水溶性磷累积分布概率

依据《中国土壤》中土壤全磷含量分级标准<sup>[24]</sup>，宝鸡市、咸阳市和渭南市土壤全磷含量为Ⅰ级（>1.0 g·kg<sup>-1</sup>）的累积分布概率分别为 74.81%、67.01%和 38.24%、；Ⅱ级（0.8—1.0 g·kg<sup>-1</sup>）的累积分布概率分别为 21.37%、28.35%和 44.12%（图 2）。整体上，土壤全磷的高值区主要集中于宝鸡市和咸阳市。土壤适宜有效磷含量为 17—37 mg·kg<sup>-1</sup>，低于 17 mg·kg<sup>-1</sup>则作物对施磷肥有正效应，但超过 37 mg·kg<sup>-1</sup>将会提高环

境污染风险<sup>[12-13]</sup>。基于 2011 年陕西关中土壤测定结果，从西向东经由宝鸡市、咸阳市和渭南市土壤有效磷含量在 17—37 mg·kg<sup>-1</sup>的累积分布概率逐渐减少，分别为 60.30%、53.10%和 54.51%，低于 17 mg·kg<sup>-1</sup>的累积分布概率逐渐增大，分别为 19.85%、25.77%和 36.30%，而高于 37 mg·kg<sup>-1</sup>的累积分布概率分别为 19.85%、21.13% 和 8.89%。水溶性磷在土壤中含量较低，其在渭南、咸阳和宝鸡三市的累积分布概率基本一致，差异较小。由长期定位试验结果发现<sup>[13]</sup>，土壤



\*\*表示在 0.01 水平上显著相关。下同 Asterisks denote 0.01 level significances (\*\* $P < 0.01$ ). The same as below

图 1 土壤有机磷含量、无机磷含量与土壤全磷的关系

Fig. 1 The correlation between soil total-organic P, total-inorganic P and soil total P

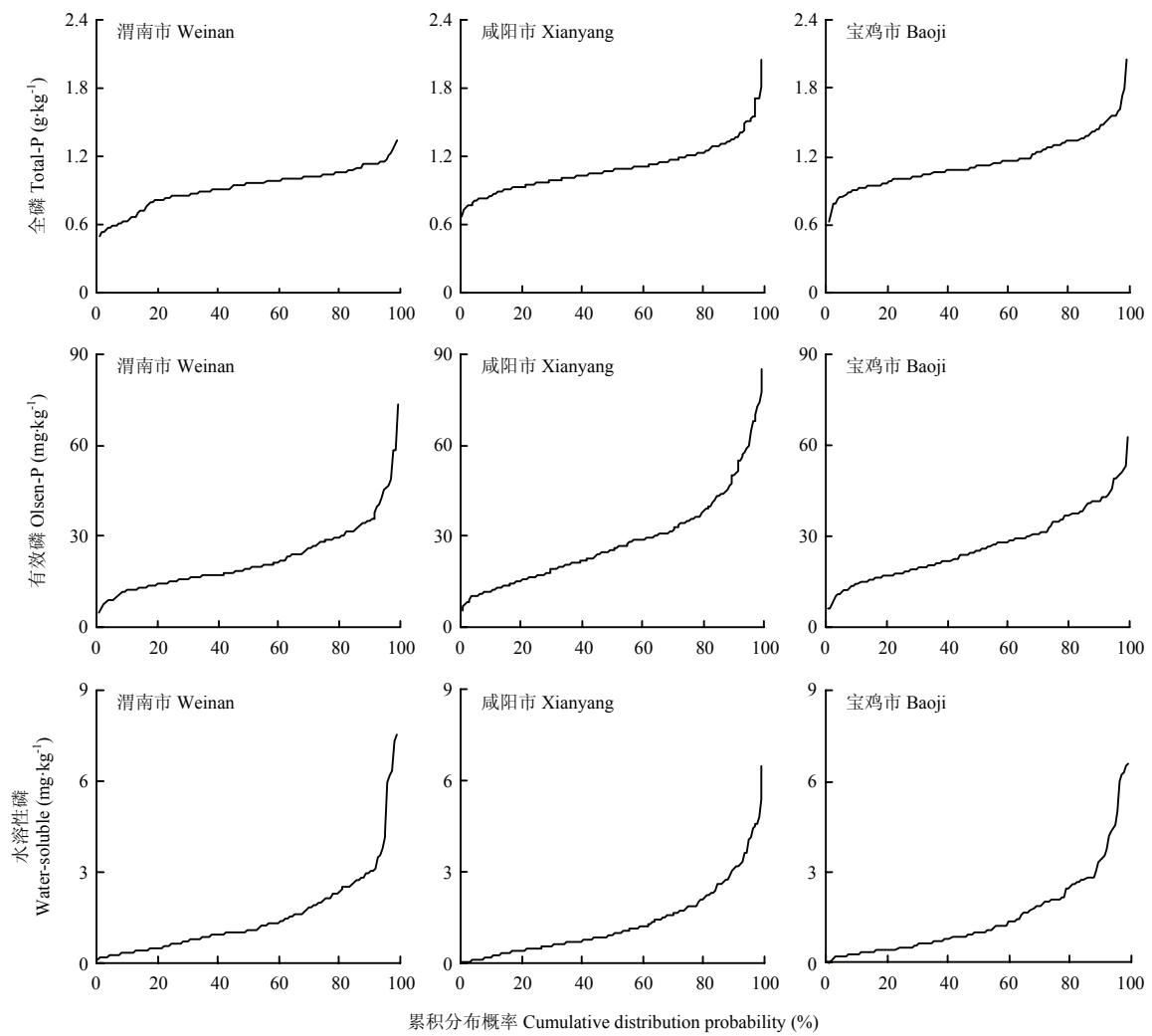


图 2 陕西关中地区土壤全磷、有效磷和水溶性磷的累积分布概率

Fig. 2 The cumulative distribution probability of soil total P, Olsen P and water-soluble P in Shaanxi Guanzhong Plain

水溶性磷含量 $>2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时累积量显著上升,存在淋溶风险,基于2011年土壤测定结果,宝鸡市、咸阳市和渭南市水溶性磷含量 $>2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的累积分布概率分别为27.48%、21.76%和26.67%。

土壤有效磷含量与其在土壤中存在的各形态磷素有较大关系<sup>[25]</sup>。本研究表明,有效磷和全磷、水溶性磷和全磷以及水溶性磷和有效磷之间均呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),决定系数分别为0.1845、0.1997

和0.0916(图3)。土壤有效磷占全磷比值被称为磷素活化系数(PAC),用于反映土壤磷素的有效性。结果显示,10个县(区)土壤磷活化系数均 $>2$ ,表明土壤磷素有效性较高,土壤全磷较易向土壤有效磷转化。耕层土壤有效磷每增加 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤全磷和水溶性磷分别增加7.25和 $0.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同样,土壤全磷与水溶性磷呈极显著正相关关系,表明土壤水溶性磷含量随土壤全磷的增加而增加。

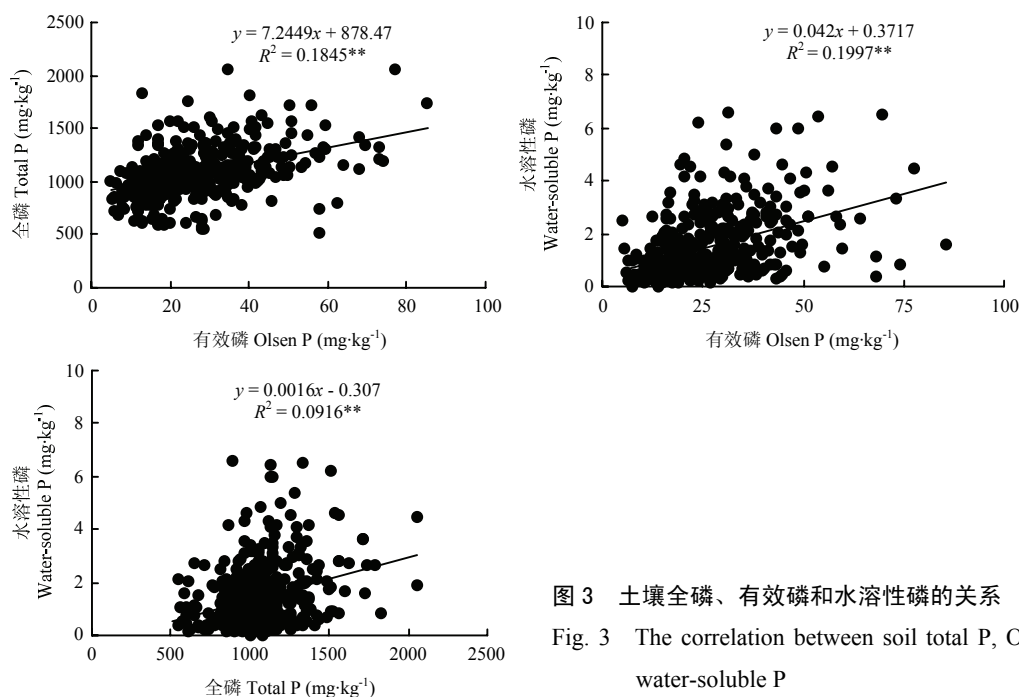


图3 土壤全磷、有效磷和水溶性磷的关系

Fig. 3 The correlation between soil total P, Olsen P and water-soluble P

## 2.4 土壤磷素与土壤有机质的相关关系

土壤有效磷、无机磷和土壤磷活化系数(PAC, 有效磷/全磷)与土壤有机质含量均呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),决定系数分别为0.0679、0.0840和0.0171(图4)。有机质量每增加 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤有效磷和无机磷含量分别增加0.86和 $18.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而土壤有机磷含量与土壤有机质含量无显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 土壤有效磷变化及原因

全国第二次普查(1980年)时,我国土壤大面积缺磷,平均土壤有效磷含量仅为 $7.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>,土壤有效磷含量 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 即为土壤磷素养分丰缺的高等级<sup>[26]</sup>。关中地区也不例外,宝鸡、咸阳和渭南3个(地)市土壤有效磷平均含量分别为6.0、7.3和 $6.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。有效磷含量 $<10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤分布面积最大,占总面积

的80%—86%。2011年3个(地)市的平均有效磷含量分别达26.09、27.50和 $21.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,较1980年土壤有效磷含量分别提高了334.83%、276.71%和231.23%,其中以含量15— $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 等级的土地面积占比增幅最大,达到50%左右。一方面,大量的养分投入是导致该地区近30年土壤有效磷含量显著提升的主要原因。以杨学云等<sup>[27]</sup>在扶风县所做调查结果为例,1997年时纯 $\text{P}_2\text{O}_5$ 投入量为 $178.04\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,年盈余量达 $127.63\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。常艳丽等<sup>[2]</sup>在关中地区所做的养分投入调查结果显示,冬小麦、夏玉米纯 $\text{P}_2\text{O}_5$ 投入量分别为 $(183\pm121)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $(45\pm88)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,远超当地推荐施磷量,大体相隔十几年的调查结果显示出非常一致的投入量,表明该区域磷素投入一直处于大量盈余的状态。当磷素长期盈余时,大量磷素累积在耕层土壤中,导致土壤全磷和Olsen P随之升高<sup>[18,28]</sup>;此外,全国土壤有效磷含量也随氮磷平衡施肥技术的推



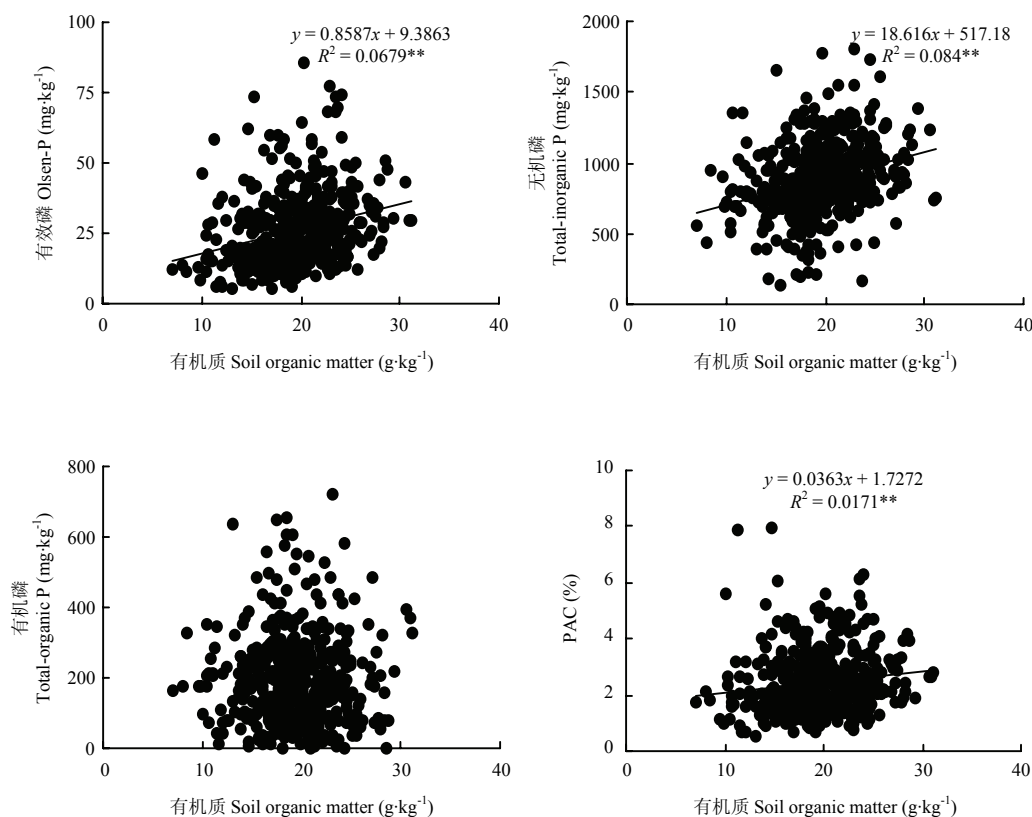


图4 土壤有机磷、无机磷、有效磷及土壤磷活化系数(PAC)与土壤有机质的关系

Fig. 4 The correlation between total-organic P, total-inorganic P, Olsen P and PAC with soil organic matter

广显著提高, 且仍在进一步提高<sup>[21]</sup>。另一方面, 该区域近十多年来采用大型联合收割机作业, 小麦季留茬高且颖壳等多散落在地里, 加之玉米季秸秆大面积还田逐步推广, 可能也是造成土壤有效磷提高的原因, 因为秸秆还田增加了磷素投入, 但肥料磷并未做相应调整。由表3可知, 关中地区土壤有效磷含量由西向东呈递增趋势, 同样, 土壤全磷、无机磷也大体为由西向东呈递增趋势。不同地区磷肥用量上的差异是造成关中地区耕层土壤有效磷含量东西差异的主要原因, 这与常艳丽等<sup>[2]</sup>在该地区的肥料投入调查结果也相吻合。

### 3.2 土壤磷形态分布

石灰性土壤磷素主要以无机磷形态存在, 有机磷占比较低。农田耕作管理措施、有机碳、碳酸钙含量等都会不同程度的参与并影响土壤磷素的吸附-解吸、固定-矿化等过程, 从而影响土壤磷素形态、含量及比例。有效磷在全磷中的比值反应了磷素供应强度和容量的关系。李学敏等<sup>[29]</sup>研究认为土壤磷素活化系数(PAC)低于2时全磷转化率低, 磷素供应强度小。

本研究结果显示, 10个县(区)土壤磷活化系数(PAC)均大于2, 表明土壤磷素有效性较高, 土壤全磷较易向土壤有效磷转化, 这主要与关中壤土耕层磷位低, 土壤有效磷供应强度较大有关<sup>[30]</sup>。而贾兴永等<sup>[25]</sup>研究的同一区域土壤样本Olsen P含量约为10 mg·kg<sup>-1</sup>的PAC仅为1.54%。很显然, PAC不仅与土壤性质有关, 也与长期施用含磷肥料有关。由于长期过量施用含磷肥料(化肥、有机肥及秸秆等), 土壤磷素出现累积, 从而提高了土壤全磷含量, 有效磷(Olsen P)作为土壤全磷中最活跃的部分也随土壤全磷增加而升高<sup>[28]</sup>。然而, 贾兴永等<sup>[25]</sup>在全国选择的14个样点进行的研究显示, 全磷、有效磷和水溶性磷含量之间均没有相关关系, 这应该与其研究中土壤本身有关, 性质各异的土壤磷素含量本身差异很大, 磷固定或无效化的能力及影响因素也有很大不同。此外, 这也可能与所选土壤的施肥历史等相关, 在其研究中, 土壤有效磷含量变幅仅为3.62—18.8 mg·kg<sup>-1</sup>, 变幅相对较小。

长期平衡施用化学氮、磷肥, 提高了作物产量进而大大增加了通过作物根茬和根系分泌物等进入土壤



的有机物含量,从而提升了土壤有机质含量<sup>[31-33]</sup>。本研究表明,陕西关中平原冬小麦/夏玉米区土壤有效磷含量随土壤有机质升高而显著上升,可能是因为该区域土壤为石灰性土壤,施入土壤中的肥料磷主要以  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  为主,土壤有机质与  $\text{Ca}^{2+}$  结合后通过提高难溶性磷化物活性,或与磷酸根竞争土壤表面吸附位点,或形成有机-无机复合体而屏蔽吸附位点,从而降低了土壤对磷的吸附<sup>[34]</sup>。本研究表明,土壤有机磷含量和有机质并无显著相关(图4),这与 SUBRAMANLAM<sup>[35]</sup>研究结果较为一致;但 SAMADI<sup>[36]</sup>等在澳大利亚西南部石灰性土壤上研究结果表明,土壤有机磷含量和有机碳呈显著正相关关系。杨学云等<sup>[18]</sup>在该区域同类型土壤上的研究结果表明,即使是长期大量施用有机肥,土壤有机磷虽然也有提高,但依然以无机磷为主,其原因在于有机肥中 60%—80%的磷以无机态存在<sup>[37]</sup>。即使是有机磷,也会很快矿化而只有难矿化的少部分有机磷累积下来,这也很好的解释了土壤无机磷含量与土壤有机质的正相关关系(图4)。有机质对土壤磷素的影响比较复杂<sup>[38]</sup>,除与自身有机磷含量有关外,也可能与土壤酸碱度、母质、磷存在形态或矿化有关。在本试验中,关中平原小麦/玉米种植区土壤有机磷分布为东部渭南远高于西部宝鸡和中部咸阳,而后二地(市)较接近,这种分布特征可能与三地(市)地下水位有关。渭南地区地下水位较高,秋涝严重,在雨季尤其是玉米生长后期遇到连阴雨或暴雨时,常有大量积水,持续时间较长;同时该区域  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温较其他地(市)约高出  $200^\circ\text{C}$  左右(陕西土壤),有利于作物生长,但通气不畅造成了土壤有机物累积<sup>[39]</sup>。

### 3.3 土壤磷素管理

土壤磷素农学阈值和环境阈值对于指导合理施肥有重要意义。在保证作物高产和环境安全的前提下,我国土壤 Olsen P 对作物最佳产量响应的临界值变幅为  $10.9\text{—}21.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[11]</sup>。BAI 等<sup>[11]</sup>在关中冬小麦/夏玉米种植区的研究结果表明,冬小麦土壤 Olsen P 农学阈值为  $16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,夏玉米为  $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,当土壤有效磷含量超过此值时,作物产量对磷肥施用没有明显增产反应;我们在关中地区基于磷肥利用效率与 Olsen P 含量响应关系的研究同样发现,当小麦/玉米种植体系中有效磷含量介于约  $17\text{—}40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,作物既可达到高产,也能保持很高的磷肥利用效率<sup>[40]</sup>。在本研究中,除渭南市临渭区平均土壤有效磷含量为  $17.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  外,其他县(区)土壤有效磷含量均介于  $21\text{—}36$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,均超过了该区域小麦、玉米的农学阈值,即土壤中的磷素可以满足作物生长、高产时对磷素的需求。

土壤水溶性磷含量随有效磷的增加而增加,当有效磷含量超过土壤磷素淋失临界值时,水溶性磷会迅速增加,存在极高的环境污染风险<sup>[41]</sup>。陕西长期定位试验结果表明<sup>[12]</sup>,当有效磷含量超过  $37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,土壤水溶性磷含量显著升高。在本研究中,土壤有效磷与土壤水溶性磷含量呈显著正相关关系。宝鸡市、咸阳市土壤有效磷含量超过  $37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的累积分布概率占 20%以上,表明宝鸡市和咸阳市大面积地区存在较高的磷素淋失风险。从环境保护的角度来说,在该区域及时监测、因土施肥、合理调控尤为重要。

## 4 结论

土壤磷的有效性是由多个因素综合作用的结果,其中以施肥影响效果最大。从 1980 年到 2011 年,陕西关中各地区土壤速效磷含量显著上升。10 个县(区)平均土壤有效磷含量均高于土壤农学阈值,满足作物达到高产时土壤磷素的供应条件。关中西部宝鸡市和咸阳市土壤磷素累积要高于渭南市,3 个代表地(市)均以  $15\text{—}30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  土壤有效磷等级面积分布最广。值得注意的是,宝鸡市和咸阳市土壤有效磷含量超过  $37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的累积分布概率也较高,存在较大的淋失风险。

## References

- [1] HEUER S, GAXIOLA R, SCHILLING R, HERRERA-ESTRELLA L, LOPEZ-ARREDONDO D, WISSUWA M, DELHAIZE E, ROUACHED H. Improving phosphorus use efficiency: A complex trait with emerging opportunities. *Plant Journal*, 2017, 90(5): 868-885.
- [2] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 孙本华, 张树兰, 杨学云. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.  
CHANG Y L, LIU J M, LI Y H, SUN B H, ZHANG S L, YANG X Y. Investigation and evaluation of fertilization under winter wheat and summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi Province. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 51-61. (in Chinese)
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.

- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [4] 孙志立. 重新认识磷矿加工的的科学合理性实施循环经济可持续发展战略. 化肥工业, 2013, 40(2): 1-5.
- SUN Z L. Understanding a new scientific rationality of phosphate rock processing and implementation of strategy for sustainable development of cyclic economy. *Chemical Fertilizer Industry*, 2013, 40(2): 1-5. (in Chinese)
- [5] DJODJIC F, BORLING K, BERGSTROM L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 678.
- [6] AULAKH M S, GARG A K, KABBA B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics. *Soil Use & Management*, 2010, 23(4): 417-427.
- [7] POULTON P R, JOHNSTON A E, WHITE R P. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. *Soil Use & Management*, 2013, 29(1): 4-11.
- [8] LI H, HUANG G, MENG Q, MA L, YUAN L, WANG F, ZHANG W, CUI Z, SHEN J, CHEN X, JIANG R, ZHANG F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant and Soil*, 2011, 349: 157-167.
- [9] 习斌. 典型农田土壤磷素环境阈值研究-以南方水旱轮作和北方小麦玉米轮作为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- XI B. Study on the environment threshold of soil Olsen-P in farmland: Case of southern paddy-upland rotation and northern wheat and maize rotation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [10] 王月立, 马强, 姜春明, 宇万太. 潮棕壤速效磷产量临界值和淋溶临界值的计算. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 171-176.
- WANG Y L, MA Q, JIANG C M, YU W T. Calculating the critical value for yield and leaching of Olsen-P in aquic brown soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 171-176. (in Chinese)
- [11] TANG X, MA Y B, HAO X Y, LI X Y, LI J M, HUANG S M, YANG X Y. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant and Soil*, 2009, 323: 143-151.
- [12] BAI Z H, LI H G, YANG X Y. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2): 27-37.
- [13] KHAN A, LU G Y, AYAZ M, ZHANG H T, WANG R J, LV F L, YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 256: 1-11.
- [14] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. *Shaanxi Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 付莹莹, 同延安, 李文祥, 赵佐平, 王留好. 陕西关中灌区冬小麦土壤养分丰缺指标体系的建立. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 897-900.
- FU Y Y, TONG Y A, LI W X, ZHAO Z P, WANG L H. Establishment of soil nutrient index system for winter wheat in Guanzhong irrigation areas of Shaanxi province. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(5): 897-900. (in Chinese)
- [16] 马志超, 张明学, 周仓军, 王录科, 王银福, 翟丙年. 关中西部冬小麦氮磷钾养分丰缺指标及经济最佳施肥量研究. 中国农学通报, 2014, 30(24): 210-216.
- MA Z C, ZHANG M X, ZHOU C J, WANG L K, WANG Y F, ZHAI B N. Study on abundant or lack index of nitrogen, phosphorus and potassium and optimum economic fertilizing of winter wheat in Western Guanzhong District. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(24): 210-216. (in Chinese)
- [17] 马志超, 张明学, 周仓军, 马丽, 王录科, 王银福, 马治贤. 关中西部玉米氮磷钾养分丰缺指标及经济最佳施肥量研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 145-151.
- MA Z C, ZHANG M X, ZHOU C J, MA L, WANG L K, WANG Y F, MA Z X. Abundant/lack index of nitrogen, phosphorus, and potassium for maize in Western Guanzhong and determination of economic optimum fertilization rate. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(11): 145-151. (in Chinese)
- [18] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 李生秀, 张树兰. 长期施肥对壤土磷素状况的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 837-842.
- YANG X Y, SUN B H, GU Q Z, LI S X, ZHANG S L. The effects of longterm fertilization on soil phosphorus status in manural loessial soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 837-842. (in Chinese)
- [19] 杨利玲, 杨学云, 古巧珍, 孙本华. 长期施肥对旱地土壤有机磷及其组分的影响. 土壤通报, 2007, 38(5): 942-945.

- YANG L L, YANG X Y, GU Q Z, SUN B H. Effects of long-term fertilization on organic phosphorus and its components in rain-fed soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5): 942-945. (in Chinese)
- [20] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 刘选卫, 刘利花. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 I. 有机质、全磷和速效磷. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 787-789.
- XIE L H, LV J L, ZHANG Y P, LIU X W, LIU L H. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil I. Organic matter, total phosphorus and available phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 787-789. (in Chinese)
- [21] 强红妮. 关中西部耕地土壤磷素历史演变状况分析. *陕西农业科学*, 2011(6): 87-89.
- QIANG H N. Analysis of historical evolution of soil phosphorus in cultivated land in West of Guanzhong. *Shaanxi Agricultural Science*, 2011(6): 87-89. (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 168-169, 179-181.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 168-169, 179-181. (in Chinese)
- [23] SAUNDERS W M H, WILLIAMS E G. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *Journal of Soil Science*, 1955, 6(2): 254-267.
- [24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995: 904.
- National Soil Census Office. *Chinese Soil*. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 904. (in Chinese)
- [25] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其土壤性质关系的研究. *中国土壤与肥料*, 2011(6): 76-82.
- JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(6): 76-82. (in Chinese)
- [26] 谢如林, 谭宏伟. 我国农业生产对磷肥的需求现状及展望. *磷肥与复肥*, 2011, 16(2): 6-9.
- XIE R L, TAN W H. The present and future demand of phosphate fertilizer in China in the light of agricultural production. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2011, 16(2): 6-9. (in Chinese)
- [27] 杨学云, 黎青慧, 孙本华, 郝兴顺. 陕西省典型农区农田生态系统养分平衡研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(2): 99-104.
- YANG X Y, LI Q H, SUN B H, HAO X S. Study on nutrients balance of farming ecosystem in typical areas of Shaanxi Province. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2001, 29(2): 99-104. (in Chinese)
- [28] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 李生秀, 郝兴顺. 长期施肥磷素盈亏及其对土壤磷素状况的影响. *西北农业学报*, 2007, 16(5): 118-123.
- YANG X Y, SUN B H, GU Q Z, LI S X, HAO X S. Phosphorus balances and its effects on soil phosphorus status under a 12 year long term fertilization. *Acta Agriculturae Boreali Occidentalis Sinica*, 2007, 16(5): 118-123. (in Chinese)
- [29] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究. *土壤通报*, 1994, 25(6): 259-260.
- LI X M, ZHANG J M. Study of phosphorus status on fluvo-aquic soil in Hebei Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 259-260. (in Chinese)
- [30] 程文礼. 关中壤土土体供磷能力评价. *土壤通报*, 1986(3): 101-103.
- CHENG W L. Evaluation of phosphorus supply capacity in Guanzhong soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986(3): 101-103. (in Chinese)
- [31] 展晓莹, 任意, 张淑香, 康日峰. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4728-4737.
- ZHAN X Y, REN Y, ZHANG S X, KANG R F. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4728-4737. (in Chinese)
- [32] YANG X Y, SUN B H, ZHANG S L. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system. *Journal of Integrative Agriculture*, 2010, 13(2): 402-414.
- [33] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 孟远夺, 董燕, 李荣, 马义兵. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047-1056.
- YANG F, XU Y, CUI Y, MENG Y D, DONG Y, LI R, MA Y B. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047-1056. (in Chinese)
- [34] ZHOU M, RHUE R D, HARRIS W G. Phosphorus sorption characteristics of sandy coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 1364-1369.
- [35] SUBRAMANLAM V, SINGH B R. Phosphorus supplying capacity of heavily fertilized soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 47: 115-122.
- [36] SAMADI A, GILKES R J. Forms of phosphorus in virgin and fertilised calcareous soils Western Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 585-601.

- [37] JOHNSTON A E, POULTON P R, SYERS J K. Phosphorus, potassium and Sulphur cycles in agriculture soil [C]. Proc. No. 465, IFS, York, UK. 1995.
- [38] 孔庆波, 自由路, 杨俐苹, 胡浩, 魏义常, 卢艳丽, 章明清. 黄淮海平原农田土壤磷素空间分布特征及影响因素研究. 中国土壤与肥料, 2009(5): 10-14.
- KONG Q B, BAI Y L, YANG L P, HU H, WEI Y C, LU Y L, ZHANG M Q. Spatial distribution characteristic and its influential factors of soil phosphorus in region of the Huang-Huai-Hai plain. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(5): 10-14. (in Chinese)
- [39] 尹逊霄, 华珞, 张振贤, 滑丽萍, 高娟. 土壤中磷素的有效性及其循环转化机制研究. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 95-101.
- YIN X X, HUA L, ZHANG Z X, HUA L P, GAO J. Study on the effectiveness of phosphorus and mechanism of its circle in soil. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 26(3): 95-101. (in Chinese)
- [40] 姚珊, 张东杰, Batbayar Javkhlan, 刘琳, 李若楠, 周江香, 张树兰, 杨学云. 冬小麦-夏玉米体系磷效率对壤土磷素肥力的响应. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1640-1650.
- YAO S, ZHANG D J, BATBAYAR J, LIU L, LI R N, ZHOU J X, ZHANG S L, YANG X Y. Responses of phosphorus use efficiency to soil phosphorus fertility under winter wheat-summer maize cropping in loess soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1640-1650. (in Chinese)
- [41] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 李浩浩, 李贵桐, 林启美. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值. 生态学报, 2004, 24(10): 2275-2280.
- ZHONG X Y, ZHAO X R, BAO H J, LI H H, LI G T, LIN Q M. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. I. Leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2275-2280. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)