

黄土地区土壤中磷的含量分布、 形态转化与磷肥合理施用*

彭琳 彭祥林

(中国科学院西北水土保持研究所)

摘 要

黄土地区土壤中全磷与有效磷含量均有由北向南逐渐趋增的趋势,一般是:灌淤土较高,塋土、褐土与黑垆土次之,黄绵土、灰钙土和黑钙土又次之,风沙土较低。土壤有效磷可分为4级,5.5 ppm可作为土壤缺磷临界值,5.5—10.5 ppm作为边缘值。

黄土地区土壤中各形态磷占全磷比例以Ca-P最高,有机磷与O-P次之,Al-P、Fe-P和水溶磷较低。土壤有机磷及其与无机磷的比值与土壤肥力有密切关系,闭蓄态磷及其与磷酸钙的比值似与土壤风化程度有关。磷肥施入土壤后,早期固定较快,20天后渐趋平稳。在高钙土壤中,施入的磷主要转化为Ca-P,低钙土壤则转化为Ca-P、Al-P和Fe-P。

黄土地区磷肥施于低肥土壤或中肥土壤中其肥效优于高肥土壤;施于灌溉土壤优于旱作土壤;与氮肥配施优于单施。

磷肥施用是黄土地区农业生产中的一个重要问题。近半个世纪以来,一直为研究者所重视^[1-17]。在40年代进行的化肥试验中,磷肥多未表现肥效^[3,13]。50年代发现在缺磷土壤上施用磷肥肥效十分明显^[1,2,4]。60年代本区各地陆续证明磷肥的增产作用,并开始农业生产中推广应用^[8]。目前各地已大面积施用^[5,9,14-17]。由于各地土壤条件不同,磷肥肥效也不一致,有些地块施用磷肥不表现明显增产效果。因而各地研究者仍在对磷肥的合理施用进行广泛研究。

磷肥肥效与土壤中磷的状况有密切关系,一些研究者对磷肥在土壤中的形态转化、固定、消长进行了研究^[6,7,10-12],但多集中于塋土,对其他土壤研究较少。关于黄土地区土壤中磷的含量分布则很少研究。作者等在50年代初期^[1,2],在黄土地区进行磷肥试验,首次证明黄土地区施用磷肥有效。此后,还对黄土地区土壤中磷的含量、分布、形态、转化,磷肥的合理施用进行多方面的研究。本文根据上述研究结果,并参考本所以及黄土地区有关单位试验研究的结果,以黄土地区为对象,比较全面地阐明本区土壤中磷的含量分布、形态转化及其与磷肥施用的关系,为磷肥在本区有效施用提供科学依据。

* 参加本项工作的尚有余存祖、戴鸣钧、刘耀宏。

一、研究方法

样品主要采自黄土地区耕作土壤,尚有部分林地及草地土壤,除表层外,还采集了 100 多个土壤剖面,一般深 2 米,少数为 3—5 米。

在几种土壤上进行田间试验,以施氮或氮、钾作对照,在对照的基础上施用磷肥(按 P_2O_5 计)60—120 千克/公顷,小区面积 22 平方米,3—4 次重复。

磷在土壤中的转化:取风干土 200 克,加过磷酸钙水溶液,使土壤有效磷含量(按 P 计)达 250ppm,供试土壤有效磷含量为 7 ppm,故加入过磷酸钙水溶液含 P 243 ppm 并加甲苯以抑制微生物的活动。土壤保持最大持水量的 60%,置于 28—30℃ 下培养,分土壤与肥料接触当时、2 小时、2 天、7 天、20 天、60 天采样测定各级无机磷含量的变化。

测定方法:土壤全磷用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法;土壤有机磷用 Mehta 法^[12],土壤无机磷分级用张守敬-Jackson 法^[13];土壤有效磷用 Olsen 法。

二、研究结果

(一) 土壤中全磷含量和分布

黄土高原地区土壤中全磷 (P_2O_5) 的变幅为 0.021—0.283%,平均为 0.136%,与成土母质(黄土)十分相近,黄土母质全磷含量为 0.091—0.134 ppm,平均为 0.126 ppm。除风沙土外,各类土壤平均含量(表 1)差异较小,并按下列顺序递减:灌淤土>塬土、黑钙

表 1 黄土地区土壤的全磷含量

Table 1 Total phosphate content in soils of loessial region

土壤 Soil	土样数 No. of sample	土壤全磷含量 Total P_2O_5 (%)			0—20 厘米土层中磷素贮量 (千克/公顷) Phosphate store within 0—20 cm soil layer(kg/ha)
		范围 Range	平均值 Average	标准差 S: D.	
风沙土	51	0.021—0.128	0.045	0.027	1305
灰钙土	42	0.050—0.171	0.113	0.043	2553
栗钙土	124	0.070—0.186	0.125	0.026	2825
黄绵土	158	0.097—0.180	0.129	0.015	2890
黑垆土	190	0.079—0.190	0.139	0.021	3128
黑钙土	50	0.077—0.206	0.149	0.032	3353
塬土	393	0.077—0.283	0.152	0.045	3800
灌淤土	38	0.108—0.220	0.161	0.026	4025
黄土母质	14	0.091—0.134	0.126	0.028	2813

土>黑垆土>黄绵土、栗钙土>灰钙土>风沙土。土壤全磷含量与土壤质地密切相关,土壤颗粒愈细,全磷含量愈高。黄土高原土壤粘粒含量由北向南逐渐增加,全磷含量亦呈相同趋势。在陕西省关中地区尚有一种全磷含量较高的灰土,据 11 个土样统计,灰土中全磷含量为 0.313—1.092%,平均为 0.623%,为黄土母质的 4.94 倍,为黄土区土壤平均值的 4.58 倍。灰土在土壤剖面中呈洞穴状或层状分布,其中还杂有瓦片、炭屑、残骨等,显然为人类活动的产物。

土壤全磷剖面分布主要有三种类型(图 1): (1) 渐减型, 如灌淤土的全磷含量在土壤剖面上由上向下逐渐减低, 主要由于灌淤土表层淀积含磷较高的细粒淤泥所致; (2) 均匀型, 如黄绵土和风沙土, 除表层全磷含量略高外, 剖面中全磷含量分布比较均匀, 主要由于这类土壤侵蚀强烈, 土壤剖面发育较弱所形成; (3) 中低型, 如塬土剖面中部粘化层的全磷含量明显低于其上层或下层, 形成一个低谷。这可能由于粘化层淋溶较强, 磷在土壤剖面上迁移所形成。

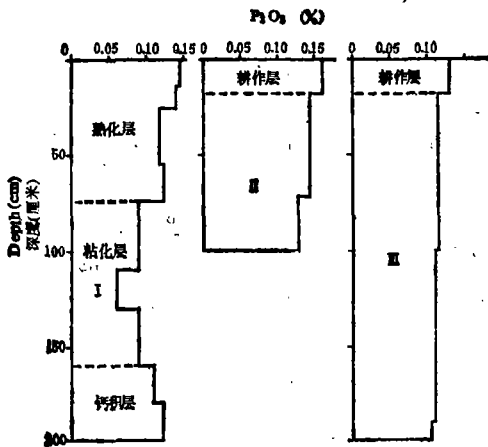
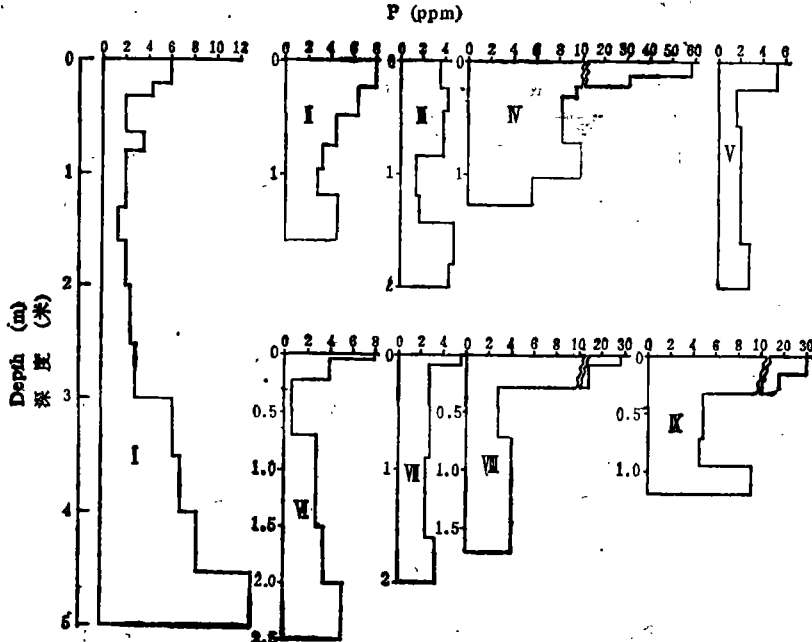


图 1 土壤剖面中全磷量的分布¹⁾

Fig. 1 The content of total-P(P_2O_5) in soil profiles

(二) 土壤有效磷的含量和分布
土壤有效磷含量(表 2)的变化与土壤全磷相似, 按有效磷平均含量计, 也是灌淤土 > 塬土 > 褐土、黑垆土 > 黄绵土、灰钙土 > 风沙土, 有由北向南逐步递增趋势。有效磷含量变幅较全磷宽, 全磷含量高低相差 10.5 倍, 有效磷在土壤剖面的分布(图 2)大多呈中低型, 这可能由于淋溶造成有效磷迁移所致。

黄土地区土壤有效磷含量分布呈现一些地域特征。



I. 塬土(杨陵), II. 黑垆土(洛川), III. 栗钙土(大同), IV. 污灌土(兰州), V. 风沙土(榆林), VI. 灰钙土(靖远), VII. 黄绵土(安塞), VIII. 林地土壤(子午岭), IX. 灌淤土

图 2 土壤剖面中有效磷的分布

Fig. 2 Content of available-P in different soil profiles

1)图 1 中 I 为塬土(中低型); II 为灌淤土(渐减型); III 为黄绵土(均匀型)。

表 2 黄土地区土壤有效磷含量

Table 2 Content of available-P in soils of loessial region

土 壤 Soil	土样数 No. of sample	土壤有效磷含量 Content of available-P in soils (P, ppm)		
		范 围 Range	平均值 Average	标准差 S. D.
风沙土	11	0.3—6.0	3.0	1.6
栗钙土	36	0.8—13.3	3.4	2.3
黄绵土	252	0.3—16.5	4.0	2.0
灰钙土	78	0.5—17.9	4.3	2.6
黑垆土	110	0.5—23.7	5.9	6.1
褐 土	237	0.5—18.3	6.2	6.4
矮 土	295	1.0—31.3	8.5	5.7
灌淤土	34	2.0—21.0	12.4	11.6

黄土地区的成土母质——黄土有效磷含量比较丰富。据对黄土地区各地黄土 19 个样品测定,有效磷含量为 5.3—28.0 ppm, 平均为 13.7 ppm。对陕西省扶风县新集村东 0—40 米黄土岩层有效磷测定,表层平均含量为 5.1 ppm, 1.7—40 米岩层为 5.9—16.3 ppm, 平均为 9.8 ppm ($n = 28$), 较表层土壤高 66.1%, 在黄土各岩层中,埋藏层的有效磷含量平均为 11.1 ppm ($n = 9$), 高于淤积层 (8.9 ppm, $n = 8$)。

古居民点遗址的土壤有效磷含量高于普通土壤。例如,陕西省岐山县周原遗址的有效磷含量为 8.6—31.3 ppm, 平均为 18.0 ppm ($n = 8$), 较附近普通农田土壤平均含量 (8.3 ppm, $n = 6$) 高 1 倍以上。

城市附近的污灌土壤有效磷含量大大高于一般土壤。据测定,严重污染土壤的耕层有效磷含量高达 133—274 ppm, 平均为 208 ppm, 较一般农田土壤含量高 15.9—68.3 倍。污染深度一般为 0—20 厘米,有些地块深达 1 米。

在一些严重侵蚀土壤上,有效磷含量为 0.6—6.5 ppm, 平均为 2.5 ppm, 低于一般农田土壤。如在其上植树种草,可供土壤有效磷大幅度提高。据对严重侵蚀土壤地区林地、草地测定,林地林毡层 (0—8 厘米) 为 14 ppm, 草地与灌木林地表层 (0—20 厘米) 为 7.2 ppm, 较严重侵蚀土壤高几倍至十几倍。

表 3 土壤有效磷含量分级

Table 3 Levels of available-P in soils

级 别 Levels	有效磷含量 Content of available-P (ppm)	统计数 (n) Figures	作物相对产量 Relative yields of crop (% average)	施磷增产率 Increasing yield (%) from P added		施磷增产机率 Probability (%) of increasing yields from P added
				范 围 Range	平均值 Average	
I	<5.5	37	75±12	7—82	39	100
II	5.5—10.5	35	82±11	1—55	25	86
III	10.5—20.0	25	92±9	1—25	10	56
IV	>20.0	6	99±5	0—5	3	0

土壤有效磷含量与土壤肥力水平关系十分密切。在农业生产中,一般常以常年作物产量表示土壤肥力水平。据98个地块统计,土壤有效磷与常年作物产量呈极显著正相关($r = 0.991^{***}$, $n = 98$),与施磷增产率呈极显著负相关($r = -0.998^{***}$, $n = 91$)。按照土壤有效磷含量与作物相对产量计算,可分为4级(表3)。

(三) 土壤中磷的形态及其转化

黄土地区土壤中各形态磷含量及其占全磷比例顺序为:磷酸钙(Ca-P) > 有机磷和闭蓄态磷(O-P) > 磷酸铝(Al-P) > 磷酸铁(Fe-P) > 水溶磷,分述如下:

1. 有机磷与无机磷 土壤中磷主要为无机磷,占全磷85.1%(平均值,下同),有机磷只占14.9%,土壤有机磷(y, ppm)与有机质(x, %)呈极显著正相关,回归方程为: $y = 18.1 + 96.5x$, $r = 0.8686^{***}$, $n = 28$ 。土壤有机磷含量及其与无机磷比值往往与土壤肥力水平有密切关系(表4)。

表4 不同肥力水平的土壤有机磷含量

Table 4 Content of organic-P in soils of different fertility

土壤肥力水平 Levels of soil fertility	土样数 No. of sample	土壤有机磷含量 (P-ppm) Content of Org.-P in soil	有机磷占全磷的比 例(%) Org.-P in total- P in soil	无机磷 有机磷 Inorg.-P Org.-P
高	6	156—338* 230±74	21.3—26.8 24.7±2.1	2.8—3.7 3.2±0.5
中	7	90—128 110±14	13.9—20.0 16.7±2.0	4.0—6.2 5.0±0.7
低	31	19—123 65±27	3.7—19.4 12.7±4.5	4.1—26.0 8.3±4.5

* 变幅
平均值±标准差, 下同。

2. 磷酸钙与闭蓄态磷 黄土地区土壤中磷酸钙(Ca-P)含量较高,平均含量为386 ppm,占全磷量(平均)的68.4%,高于我国南方土壤。闭蓄态磷(O-P)平均为71ppm。

表5 不同风化程度土壤的磷酸钙与闭蓄态磷含量

Table 5 Content of Ca-P and O-P in soils with different degree of weathering

土壤风化程度 Degree of soil weathering	土样数 No. of sample	Ca-P		O-P		Ca-P O-P
		含量 Content(P-ppm)	占全磷 (%) of in. total P	含量 Content(P-ppm)	占全磷 (%) of in total P	
稍强	6	155—332	36.6—64.8	116—182	24.9—43.1	0.9—2.4
		220±72	48.2±10.6	153±27	35.1±9.4	1.5±0.7
中	6	386—460	56.5—68.4	70—140	11.4—21.8	2.8—6.0
		403±33	60.6±4.1	114±25	15.0±7.5	3.7±1.2
低	26	334—507	62.7—81.2	22—74	8.3—12.8	5.4—27.3
		420±31	74.9±5.7	42±14	7.6±2.8	11.6±5.1

占全磷的 13.1%，也低于我国南方土壤。黄土地区土壤与我国南方土壤相比，其风化程度都较弱。土壤中 O-P 含量以及 $\frac{Ca-P}{O-P}$ 与土壤风化程度似有一定关系(表 5)。

3. 水溶磷、磷酸铝和磷酸钙 黄土地区这三种形态的磷酸盐含量都很低,平均只占土壤全磷含量的 1.0—3.8%，水溶磷 (1mol NH₄Cl 提取)与有效磷呈显著正相关 ($r = 0.864^{**}$, $n = 20$); 磷酸铝与有效磷呈显著正相关 ($r = 0.449^*$, $n = 20$); 磷酸铁与有效磷呈显著负相关 ($r = -0.473$, $n = 20$)。

磷在土壤中转化的研究表明,土壤对磷的固定较快,磷肥与土壤接触后立即测定,土壤对磷的固定率为 26.7—31.3%; 平均为 28.7%, 2 天后为 38.9%, 7 天后为 49.4%, 20 天后为 59.7%, 60 天后的测定结果与 20 天相近。可见磷肥施入土壤后,早期固定较快,20 天后渐趋平稳。施入土壤中的磷在不同土壤中转化方向各不相同,在高钙土壤 (CaCO₃ 含量为 15.0%) 中施入的磷主要转化为磷酸钙; 在低钙土壤 (CaCO₃ 含量为 3.4%) 中则分别转化为 Ca-P、Al-P 和 Fe-P, 磷肥施入 7 天后测定结果表明, Ca-P 和 Al-P 各增加 23 ppm, Fe-P 增加 15 ppm, 共增加 61 ppm, 同期,水溶磷减少 43ppm (图 3)。

(四) 磷肥的合理施用

1. 磷肥施于低肥土壤或中肥土壤上的肥效高于高肥土壤 由图 4 可见,施磷平均增产率、增产机率、施入每千克 P₂O₅ 增产小麦千克数均随土壤肥力水平增高而降低。在低、中肥土壤上施用磷肥平均增产 11.6—46.5%, 达显著或极显著水平, 磷肥在

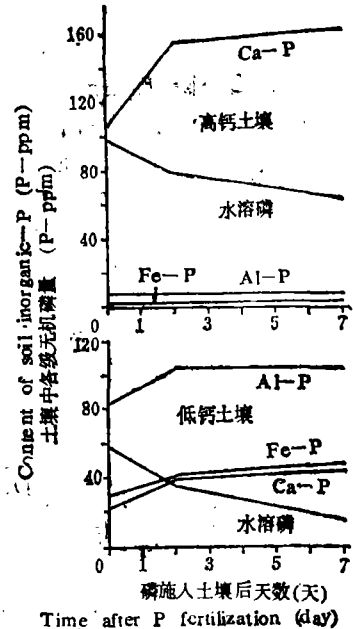


图 3 磷肥施入土壤后无机磷含量的变化

Fig. 3 Content variation of inorganic-P in soil after P fertilization

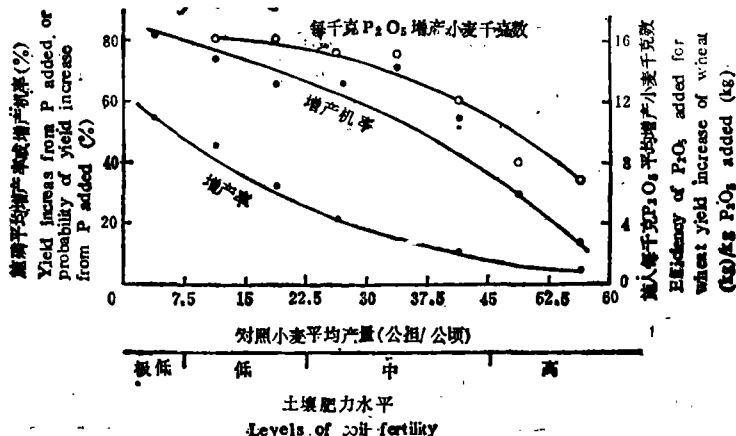


图 4. 不同肥力土壤施磷增产效果 (1072 组小麦田间试验资料统计)

Fig. 4 Response to P fertilizer application in soils of different fertility (data counted from 1072 groups of field experiments)

一定施量范围内,低、中肥土壤的施磷增产率($y, \%$)与磷肥用量(x , 千克/公顷)呈极显著正相关。 $y_{低肥} = 39.3 + 86.8 \log x$ ($r = 0.997^{***}$, $n = 7$); $y_{中肥} = 19.6 + 30.8 \log x$ ($r = 0.940^{***}$, $n = 7$) 低肥土壤回归系数 b 值较高,表明增产曲线陡峻,中肥土壤的 b 值较低,增产曲线平缓。在高产土壤上施用磷肥平均只增产 6.8—7.0%,均未达到显著水平。

2. 在同等肥力水平条件下,磷肥施于灌溉土壤上的肥效优于旱作土壤 黄土地区大多数农田缺磷,施用磷肥效果明显。近年来,在旱地大面积施用磷肥,增产明显,对当地农业生产有较大促进作用,因而认为磷肥应优先施于旱作农田。由表 6 可见,在同等肥

表 6 不同肥力水平条件下,旱地与灌溉地施用磷肥的效果

Table 6 Comparison of response to P fertilizer application between nonirrigated land and irrigated, under different levels of soil fertility

土壤肥力水平 Levels of soil fertility	利用方式 Application pattern	统计组数 No. of group	小麦平均产量*(公担/公顷) Mean yield of wheat (q/ha)		施磷增产率 (%) Increasing yield (%) from P added	增产机率(%) Probability (%) of increasing yield from P added	每千克 P_2O_5 增产小麦千 克数 Efficiency of P_2O_5 added for wheat* increasing yield of wheat (kg)/ P_2O_5 added (kg)
			对照 CK	施磷 P-fertilizer application			
低肥土壤	旱地	85	11.4±2.1	17.4±6.6	52.2	81.2	15.2
	灌溉地	45	12.5±1.4	19.2±6.3	53.8	86.7	18.3
	旱地	90	18.3±2.2	22.2±4.9	20.8	54.4	11.3
	灌溉地	125	18.7±2.3	27.5±6.8	46.9	98.4	20.7
中肥土壤	旱地	40	25.8±1.8	30.2±4.5	17.1	60.0	11.7
	灌溉地	152	26.0±2.0	32.5±4.9	24.9	97.4	16.5
	旱地	26	32.4±1.7	36.2±4.6	11.7	50.0	10.2
	灌溉地	146	33.3±2.3	40.0±4.4	20.0	92.5	16.4
	旱地	6	41.5±2.7	43.4±3.0	4.5	16.7	3.9
	灌溉地	133	41.1±2.1	46.0±4.4	11.9	85.0	13.0

* 平均值±标准差。

表 7 磷肥、氮肥配施与磷肥单施的增产效果

Table 7 Efficiency comparison between the combined application of P and separate application of N and P

土壤肥力水平 Levels of soil fertility	统计组数 No. of group	对照区作物(小麦)产量 (公担/公顷) Corp (wheat) yield of control (q/ha)	施肥较对照增产率(%) Increasing yield (%) to fertilizer application		
			N	P	NP
极低	11	5.2±1.5	101	52	145
低	48	11.8±1.5	42	21	103
	94	17.4±1.9	30	29	78
中	52	25.6±2.0	18	12	41
	10	32.8±2.3	14	4	32
	24	40.4±2.0	9	4	22

力水平条件下或对照产量相近时, 磷肥施于灌溉土壤的增产效果和增产机率均高于旱作土壤。因此, 在黄土地区不应忽视对灌溉土壤施用磷肥。

3. 在磷、氮均缺的土壤上, 磷肥与氮肥配合施用优于磷肥单施 在黄土地区大多数土壤缺氮, 施用磷肥应与氮肥配用。由表 7 可见, 磷肥与氮肥配施的增产率大大高于磷肥单施, 因而当前农民普遍喜用氮磷复合肥。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院西北生物土壤研究所, 土壤组, 1959: 古耕普通黑褐土的磷肥肥效问题。土壤通报, 第 2 期, 7—16 页。
- [2] 中国科学院西北生物土壤研究所, 土壤组, 1959: 普通黑褐土过磷酸钙粒肥的肥效。土壤通报, 第 2 期, 17—19 页。
- [3] (前)中央农业试验所, 1941: 棉花肥料试验。农报, 第 5 卷, 21—24 期, 481—484 页。
- [4] 西北农业科学研究所土壤肥料系, 1956: 西北区磷肥试验初步小结。西北农业科学技术汇刊, 第 2 期, 77—79 页。
- [5] 西北水土保持研究所土壤肥力室磷肥组, 1977: 陕北杏子河流域川地黄绵土磷肥试验。土壤, 第 4 期, 193—197 页。
- [6] 吕殿青, 1980: 石灰性土壤中腐殖质与磷的吐纳关系及其存放性。土壤通报, 第 5 期, 9—11 页。
- [7] 华天懋、李昌纬, 1986: 磷肥在壤土中的形态转化及磷素消长规律。土壤通报, 第 1 期, 4—7 页。
- [8] 李仲平, 1962: 山西石灰性褐色土磷肥肥效试验。土壤通报, 第 1 期, 49—56 页。
- [9] 李友宏, 1987: (宁夏)麦田施磷效果与施用量的探讨。土壤通报, 第 3 期, 13—14 页。
- [10] 李祖榜, 1980: 关于石灰性土壤上磷的固定速度数量与固定强度问题。陕西农业科学, 第 5 期, 10—13 页。
- [11] 李鼎新, 1980: 关中壤土磷素状况及影响磷素有效性因子的研究。土壤通报, 第 6 期, 1—4 页。
- [12] 胡定宇, 1988: 磷肥在陕西关中平原壤土中某些变化特性的研究。土壤肥料, 第 3 期, 37—40 页。
- [13] 张乃凤, 1941: 地力之测定。土壤季刊, 第 2 卷 1 期, 96—112 页。
- [14] 张裕生, 1986: 陕西省磷肥的肥效及其合理施用。土壤肥料, 第 5 期, 45—46 页。
- [15] 彭琳、彭祥林, 1985: 旱地小麦磷肥适宜用量。中国科学院西北水土保持研究所集刊, 第 2 集, 63—69 页。
- [16] 彭琳、彭祥林, 1986: 关中旱地磷肥经济施用措施。陕西农业科学, 第 1 期, 21—23 页。
- [17] 彭琳等, 1986: 渭北高原旱地小麦化肥施用效果。干旱地区农业研究, 第 1 期, 23—39 页。
- [18] Mehta, N. C., 1954: Determination of organic phosphorous in soils I. Extraction method. Soil Sci Amer. Proc., 18: 443—448.
- [19] S. C. Chang, Jackson, M. L., 1957: Fraction of soil phosphorous. Soil Sci., 84: 133—144.

STUDIES ON CONTENTS DISTRIBUTION FORMS AND TRANSFORMATION OF SOIL PHOSPHORUS AND THE RATIONAL APPLICATION OF PHOSPHOROUS FERTILIZER IN LOESSIAL REGION

Peng Lin and Peng Xianglin

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica)

Summary

Status of soil phosphorus and rational application of phosphorus fertilizer were studied by field trials. Results obtained showed that (1) variation of soil total P and available P contents were both increasing from the north to south and the contents of different soils were in the following order: irrigation warped soil > manured loessial soil, cinnamon soil, dark loessial soil > yellow cultivated loessial soil, sieroezm, chestnut soil > aeolion sandy soil; (2) contents of available P were divided into five levels (P-ppm): <2.0 (very low), 2.0—5.5 (low), 5.5—10.5 (medium), 10.5—20.0 (high), >20.0 (very high). Meanwhile the corresponding yield increment with phosphorus fertilizer applied were 72, 36, 25, 10, 3% respectively; the probability of yield increase from phosphorus fertilizer applied were 100, 100, 86, 56, 0%. Results pointed out that the critical value of soil available-P is 5.5 ppm; (3) it is suggested that the content of organic-P and inorganic-P/organic-P ratio of soil may be the one of the fertility indexes of soil. Content of O-P and Ca-P/O-P ration of soil can provide the division for the degree of soil weathering; (4) The general tendency of response to P fertilizer application were soils of low and medium fertility > those of high fertility, irrigated soils > non-irrigated soils, and the application of P fertilizer combined with N fertilizer was better than single application of P fertilizer.