

干湿交替过程中石灰性土壤无机磷的 转化及有效性*

程传敏** 曹翠玉

(南京农业大学自然资源与环境科学系, 210095)

摘 要

盆栽试验和培养试验结果表明:淹水能显著提高石灰性土壤速效磷含量,其作用顺序为,两合土>淤土;淹水促使土壤无机磷组分中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量增加,说明石灰性土壤淹水后土壤磷有效性的提高主要是 Ca-P 体系的活性提高所致。回旱后,土壤速效磷值明显降低,土壤无机磷组分中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 组分均呈降低趋势,土壤无机磷向难溶态转化。淹水降低了外加磷肥的肥效。

关键词 干湿交替, 石灰性土壤, 无机磷形态

淹水条件下,酸性土壤磷素化学的研究,国内外已做了不少工作^[1,7,8,9],取得了较大进展。但石灰性土壤淹水后磷素化学行为的研究报道甚少^[10],其转化机制也很不清楚,尤其是淹水回旱后,石灰性土壤无机磷有效性的变化至今仍无报道。我国北方地区分布有大面积的石灰性土壤,其中水旱轮作占有一定比例。现已发现,石灰性土壤磷肥施用于旱作(如小麦、油菜等)上,其肥效高于稻田。因此,研究水旱轮作中土壤无机磷形态的转化及其有效性,不仅可为麦稻轮作中磷肥的合理运筹提供依据,而且在理论上具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 供试土壤 选用黄泛冲积母质发育的黄潮土系列土壤六个,土样采自江苏省涟水和淮阴两县,采样深度 0—20cm,土壤基本理化性状见表 1。

1.1.2 供试肥料 磷肥:过磷酸钙,含 P_2O_5 11.5%,氮、钾肥分别为尿素和硫酸钾。稻草采自江浦农场,经烘干,粉碎,过筛(20目)备用。基本性状见表 2。

1.1.3 供试作物 小麦:扬麦 5 号;水稻:汕优 63

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验 供试土壤为 5、6 号土,试验设 CK(其中设一盆 CK_0 ,即不种作物不施肥的空白)、稻

*国家自然科学基金资助项目(项目编号:39170461)。

**现在扬州大学农学院农学系。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic properties of soils tested

土壤及 编号 Soil No.	有机质 O.M. g/ kg	全氮 Total N g/ kg	全磷 Total P g/ kg	速效磷 Avail. P mg/ kg	速效钾 Avail. K mg/ kg	pH_{H_2O}	CEC cmol (+)/ kg	CaCO ₃ g/ kg	粘粒 Clay 0.001mm g/ kg
1.(淤土)	17.7	1.23	0.633	9.71	183	7.92	24.0	134	399
2.(淤土)	15.5	1.13	0.690	16.7	174	8.22	23.8	132	468
5.(淤土)	19.2	1.34	0.716	10.8	116	7.98	20.3	113	452
3.(两合土)	13.4	0.99	0.642	7.65	53.0	8.03	10.7	71.4	284
4.(两合土)	15.2	1.03	0.690	17.4	41.4	8.01	6.94	84.4	236
6.(两合土)	12.2	0.92	0.672	7.96	56.7	7.95	11.1	94.5	239

表 2 供试稻草基本性状

Table 2 Basic properties of rice straw used

试样 Sample	全碳 Total C g/ kg	全氮 Total N g/ kg	全磷 Total P g/ kg	全钾 Total K g/ kg	C/ N	C/ P	备注 Note
稻草1	410	3.40	0.89	14.6	121	460	盆栽试验
稻草2	401	4.06	0.78	12.3	98.8	513	培养试验

草、磷肥 (SP)、稻草 +SP 四个处理,肥料用量:稻草 10g/kg,磷肥 0.15g P₂O₅/kg,每盆施入适量的 N、K 及微肥作底肥,按方案称取肥料和土壤,每盆 3kg 土,将肥料和土壤充分混匀后装入盆钵,加水调至田间持水量的 70%,重复三次。供试作物第一茬为小麦(1991 年 10 月 22 日播种,1992 年 5 月 25 日收获),第二茬作物为水稻(1992 年 6 月 20 日移栽,10 月 5 日收获),每茬作物收获后,分别采土样和植株样供分析。

1.2.2 室内培养试验 培养试验 1(拟旱-淹水):供试土壤见表 1,磷肥 (P₂O₅)用量为 37.5mg/100g,稻草用量为 5.0g/100g。试验分四个处理,同盆栽试验。试验方法:按方案称取稻草和过磷酸钙加入 200.00g 土中,充分混匀,装入 250ml 塑料烧杯中,加水调至田间持水量的 70%,恒温 (25℃ ± 1℃)、恒湿培养 90 天后,再淹水保持 2—3cm 水层恒温培养 90 天。各阶段结束后分别取样备用;培养试验 2(淹水-回旱):肥料用量、处理方式及土重同培养试验 1。土壤与肥料充分混匀后,先将土壤淹水(保持 2—3 cm 水层)恒温 (25℃ ± 1℃)培养 90 天再落干,恒温、恒湿(70%田间持水量)培养 90 天后,分别取样供分析;培养试验 3:供试土壤为 2、4 号土,肥料用量及处理同培养试验 1。试验方法:称取过筛的供试土壤 600.0g,并按用量及处理加入肥料,充分混匀后装入 1000ml 大塑料烧杯中,培养方式如下:

(1)加水调至田间持水量的 70%,恒温恒湿培养 7、15、30、60、90 天后,再淹水培养 7、15、30、60、90 天,各阶段结束后分别采样备用。

(2)先淹水恒温培养 7、15、30、60、90 天后落干,再恒温、恒湿培养 7、15、30、60、90 天,各阶段结束后采样备用。

1.2.3 分析方法 均按土壤农化常规分析方法进行^[2,5,6]。

2 结果与讨论

2.1 干湿交替过程中土壤速效磷的变化

表 3 淹水对土壤Olsen-P的影响(mgP/kg)

Table 3 Effect of flooding on soil Olsen-P (mgP/kg)

土壤样本 Soil sample	拟旱 Dry land (a)	淹水 Flooding (b)	差值 Difference (b-a)	增幅 ¹⁾ Increment (%)	平均增幅 Mean increment (%)	原始土 CK
1(淤土)	8.85	10.4	1.55	17.1	—	9.71
2(淤土)	16.8	19.3	2.50	19.5	—	16.7
5(淤土)	12.5	16.3	3.80	30.2	22.6	11.9
3(两合土)	8.09	10.2	2.11	26.5	—	7.65
4(两合土)	14.8	17.2	2.40	16.5	—	17.4
6(两合土)	5.83	9.73	2.90	42.5	28.4	7.96

1) 增幅(%)=(b-a)/a×100

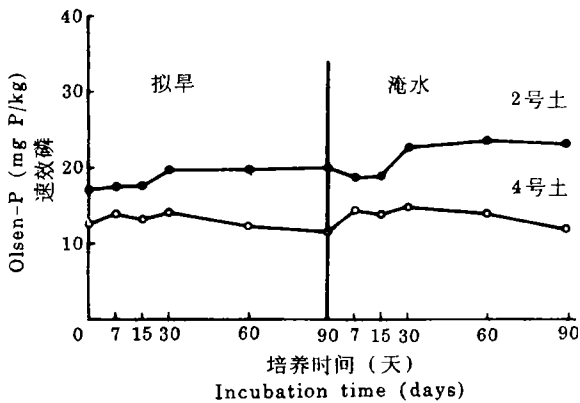


图 1 拟旱-淹水过程中土壤速效磷的动态变化

Fig.1 Dynamics of soil available P during dryland-flooding process

淹水前后土壤速效磷的动态变化结果趋势一致(图 1)。图 1 表明,淹水 30 天时,土壤速效磷增至最高值,以后又有下降趋势。淤土和两合土趋势一致。

旱地施用稻草能活化土壤磷素,提高磷的有效性^[1]。淹水条件下施加稻草同样能活化土壤磷素,提高土壤速效磷和树脂磷量(表 4, 5)。由表 4 结果可知,淹水条件下稻草对土壤磷的活化作用较为显著(b-a均为正值),按其作用大小,两合土 > 淤土,由于稻草含磷很少,可忽略不计,施加稻草导致土壤速效磷增加,可能是由于稻草腐解过程中产生的有机酸与铁络合,减少了土壤对磷的固定。同时,稻草也活化了土壤固相表面吸附的磷,使

2.1.1 拟旱-淹水过程中土壤速效磷的变化 拟旱-淹水过程中土壤速效磷的变化值见表 3。结果表明,淹水提高了土壤速效磷的含量,最高的为 6 号土(两合土),增值为 2.90mg P / kg,提高了 42.5%,最低的为 1 号土(淤土),增值为 1.55mg P / kg,提高了 17.1%。说明淹水能显著活化土壤磷素,提高磷的有效性,同一土壤速效磷含量越低,淹水后速效磷的增值越大。淹水对土壤磷活化作用顺序为两合土 > 淤土(平均增幅依次为 28.4% 和 22.6%)。这可能与淤土中氧化物含量较高,而铁的活化度较低有关。

表 4 淹水条件下施加稻草对土壤速效磷的影响(mgP/kg)

Table 4 Effect of rice straw addition on soil Olsen-P under flooding condition (mgP/kg)

土壤 Soil	对 照 (CK)			稻 草 (Straw)			B-A
	拟 旱	淹 水	A	拟 旱	淹 水	B	
	Dryland	Flooding	(b-a)	Dryland	Flooding	(d-c)	
	(a)	(b)		(c)	(d)		
1(淤土)	8.85	10.4	1.55	11.2	15.7	4.50	2.95
2(淤土)	16.0	19.3	3.30	17.9	21.3	3.40	0.10
5(淤土)	19.1	23.9	4.80	19.2	24.9	5.70	0.90
3(两合土)	8.09	10.2	2.11	8.97	12.3	3.33	1.22
4(两合土)	14.8	17.2	2.40	13.4	18.7	5.30	2.90

表 5 淹水条件下稻草对土壤树脂磷的影响(mgP/kg)

Table 5 Effect of rice straw on soil resin-P under flooding condition (mgP/kg)

处 理 Treatment	2号土 (Soil 2)					4号土 (Soil 4)				
	7	15	30	60	90	7	15	30	60	90
	天 (days)					天 (days)				
CK(a)	19.2	19.0	18.3	17.5	17.0	9.97	11.6	12.9	11.7	10.3
稻草(b)	21.0	21.4	23.5	17.5	19.8	15.1	15.3	15.0	13.7	12.7
差值(b-a)	1.80	2.40	5.20	0	2.80	5.13	3.70	2.10	2.00	2.40

其更容易解吸(见表 5)。

淹水提高了土壤原有磷的有效性,但却削弱了外加磷肥对土壤速效磷的贡献。表 6 结果表明,拟旱和淹水培养,外加磷肥都能显著提高土壤速效磷量,但淹水培养,速效磷的提高幅度远小于拟旱培养。以淤土(2号土)为例,拟旱时,外加磷肥使土壤速效磷提高了 265%;而淹水时,仅提高 159%,其它土壤趋势一致。这是因为当土壤溶液磷浓度高时,淹水增加了土壤对磷的吸附,从而降低了磷肥的肥效。这一观点已被田间试验结果所证实^[4]。

表 6 拟旱-淹水培养过程中外加磷对土壤速效磷的贡献(mgP/kg)

Table 6 Contribution of added P to soil Olsen-P during dryland-flooding process (mgP/kg)

土 壤 Soil	Olsen-P增值 (Increase of Olsen-P)			
	拟 旱 (Dryland)		淹 水 (Flooding)	
	$\Delta P^{1)}$	相 对 % Relative increment	$\Delta P^{1)}$	相 对 % Relative increment
1(淤土)	51.7	584	36.2	417
2(淤土)	42.4	265	31.1	159
5(淤土)	50.9	407	33.0	258
4(两合土)	66.4	449	54.1	315
3(两合土)	52.8	653	41.5	506
6(两合土)	52.0	476	43.8	606

1) ΔP 为施磷与对照处理速效磷之差。

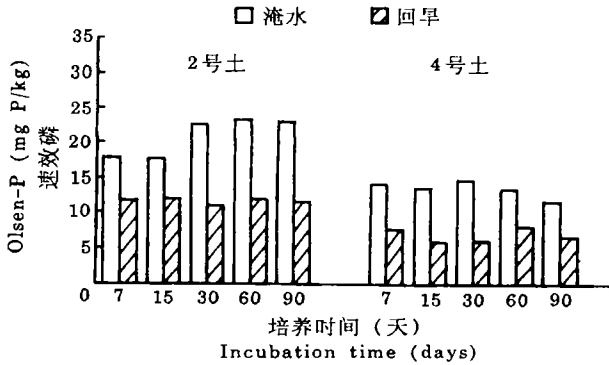


图2 淹水-回旱过程中土壤 Olsen-P 的动态变化

Fig.2 Dynamics of soil Olsen-P during flooding-drying process

速效磷为 23.9mg P / kg, 回旱后降低至 14.9mg P / kg, 下降幅度为 37.5%。

表7 淹水-回旱过程中土壤速效磷的变化 (mgP/kg)

Table 7 Changes of soil Olsen-P during flooding-drying process (mgP/ kg)

土壤 Soil	Olsen-P		
	淹水培养 (a)	回旱培养 (b)	差值 (b-a)
	Flooding	Dryland	Difference
1(淤土)	10.4	9.64	-0.76
2(淤土)	19.3	17.2	-2.10
5(淤土)	23.9	14.9	-9.00
4(两合土)	17.2	12.1	-5.10
3(两合土)	10.2	8.20	-2.00
6(两合土)	5.41	3.38	-2.03

2.2 干湿交替过程中土壤无机磷的形态转化及其生物有效性

2.2.1 石灰性土壤无机磷的组分 供试土壤无机磷各组分的测定值见表 8。结果表明, (1) 供试土壤以 Ca-P 为主, Ca-P 组分中, Ca₂-P 仅占无机磷总量的 2% 左右, Al-P、Fe-P 含量约占 5—15%, Ca₁₀-P 所占比例最大, (2) O-P 含量淤土大于两合土, 淤土平均为 126mg P/ kg, 两合土为 73.0mg P/ kg; 而 Ca₁₀-P 两合土则高于淤土, 淤土平均为 279mg P/ kg, 两合土则高达 393mg P/ kg, Fe-P 和 Al-P 含量淤土约相当于沙土的 2 倍。

2.2.2 麦-稻轮作中土壤无机磷组分的活性及其生物有效性 土壤速效磷是评价土壤供磷水平的重要指标。周鸣铮等的研究表明, 红壤旱耕地 Al-P 是速效磷的主要来源^[3], 而石灰性土壤则以 Ca₂-P 为主, 其次才是 Fe-P 和 Al-P^[2]。³²P 同位素平衡与土壤无机磷分级相结合的方法是 Dumbar 与 Baker 首先提出并应用的^[6]。到目前为止, 此法仍是研究与确定土壤速效磷最可靠的方法, Dumbar 与 Baker 认为, 经³²P 同位素交换平衡后再进行分级

2.1.2 淹水-回旱过程中土壤速效磷的变化 淹水土壤排干后, 土壤经历着与淹水过程完全相反的物理化学变化, 使土壤性质发生改变, 导致土壤中养分的有效性降低, 其中磷素尤为突出。由图 2 可知, 两合土和淤土回旱后土壤速效磷值均降低, 回旱 30 天时降至最低值, 以后又逐渐回升, 两种土壤趋势一致。

由表 7 可知, 由于回旱后土壤表面吸附的磷活性降低, 使所有土壤速效磷值均明显低于淹水培养。以 5 号土(淤土)为例, 淹水时土壤

表 8 供试土壤无机磷组分的含量及相对量

Table 8 Contents (mgP/kg) and relative percentages of inorganic P fractions in tested soils

土壤 Soil	含量 (mgP/kg)						占无机磷总量的相对百分数 (%)					
	Content						Relative percentage					
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
1(淤土)	8.10	18.0	41.5	75.8	136	260	1.50	3.33	7.69	14.1	25.3	48.1
2(淤土)	13.8	13.3	43.5	90.3	169	264	2.31	2.23	7.31	15.2	28.5	44.5
5(淤土)	11.4	12.6	43.8	45.4	73.8	314	2.27	2.52	8.75	9.08	14.7	62.6
4(两合土)	18.0	28.5	20.4	38.1	83.4	404	3.03	4.81	3.45	6.42	14.1	68.2
3(两合土)	6.03	29.1	25.1	52.6	127	381	0.97	4.69	4.05	8.47	20.4	61.4
6(两合土)	10.3	16.8	27.3	47.9	62.6	404	1.80	2.94	4.80	8.42	11.0	71.0

表 9 小麦种植前土壤³²P比活度及各组分活性磷百分数Table 9 ³²P specific activity and the relative percentages of active P in different soils before wheat planting

土号 Soil No.	组 分 Fraction	土壤 ³² P比活度		“活性固相磷” Active P(%)
		Specific activity of ³² P		
		Bq/g土	Bq/μg P·g土	
5号土	Ca ₂ -P	1.96×10 ⁴	1.75×10 ³	100
	Ca ₈ -P	9.77×10 ³	3.42×10 ²	19.5
	Al-P	2.26×10 ⁴	3.85×10 ²	22.0
	Fe-P	9.70×10 ⁴	6.88×10 ²	32.9
	O-P	7.73×10 ³	50.0	2.85
	Ca ₁₀ -P	1.59×10 ³	5.51	0.574
6号土	Ca ₂ -P	2.65×10 ⁴	2.45×10 ³	100
	Ca ₈ -P	1.14×10 ⁴	6.92×10 ²	28.3
	Al-P	2.26×10 ⁴	6.25×10 ²	25.5
	Fe-P	5.96×10 ⁴	1.10×10 ³	45.0
	O-P	8.03×10 ³	87.7	3.58
	Ca ₁₀ -P	1.15×10 ³	6.70	0.274

分析, 每级提取液中所提出的“活性固相磷”量对总提取量的百分比, 乃是这部分磷有效性的最良好的指标。该法在计算上以提取的 Ca₂-P 量为“活性固相磷”, 以其比值为 100%, 其余与之比较。

表 9 中数据可以看出, 种植前两种土壤 Fe-P 提取的活性固相磷最高, 分别为 32.9% (淤土) 和 45.0% (两合土), 其次为 Al-P 分别为 22.0% (淤土) 和 25.5% (两合土), 再次为 Ca₈-P, 分别为 19.5% (淤土) 和 28.3% (两合土), 这说明两种土壤中 Ca₂-P 为速效磷源, Fe-P 为缓效磷源, Ca₈-P 与 Al-P 相当, 其有效性略低于 Fe-P, 亦属缓效磷源, 而 O-P 和 Ca₁₀-P 则是潜在磷源。

从表 10 结果可以看出小麦收获后, 土壤中 Fe-P 提取的“活性固相磷”所占比例亦最高 (30.7—72.3%), 其次是 Al-P (17.2—43.5%), 再次为 Ca₈-P (10.3—24.7%), 由此可见, 各级形态无机磷的有效性顺序为 Ca₂-P > Fe-P > Al-P > Ca₈-P, 这说明石灰性土壤在淹水过程

表10 小麦收获后土壤³²P比活(Bq/gP/g) 及各组分活性磷含量(%)Table 10 ³²P specific activity and relative percentages of active P in different soils after wheat harvesting

土号 Soil No.	处理 Treat- ment	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca ₁₀ -P	
		1 ¹⁾	2 ²⁾	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
5 号 土	空白	4.95	100	5.24	10.6	8.54	17.2	1.52	30.7	1.28	2.59	1.49	0.301
	对照	3.89	100	4.84	12.4	1.28	32.9	1.35	34.8	1.03	2.65	2.40	0.618
	稻草	3.75	100	5.49	14.6	7.46	19.9	1.62	43.3	0.93	2.48	1.99	0.530
	SP	1.90	100	4.70	24.7	6.82	35.9	1.04	54.7	1.10	5.79	1.91	1.004
	SP +	2.14	100	4.43	20.7	5.98	27.9	1.22	56.9	1.11	5.19	1.71	0.800
	稻草												
6 号 土	空白	3.82	100	7.08	18.5	15.6	40.9	2.42	63.4	1.48	3.87	2.20	0.576
	对照	3.61	100	6.61	18.3	15.7	43.5	2.61	72.3	1.29	3.57	1.84	0.509
	稻草	7.19	100	3.37	10.3	14.1	19.6	3.45	48.0	1.36	1.89	2.09	0.287
	SP	3.09	100	7.35	23.8	10.1	32.7	1.83	39.2	1.09	3.53	1.49	0.483
	SP +	3.51	100	7.09	20.2	8.85	25.2	1.90	54.2	1.13	3.22	1.70	0.483
	稻草												

1) ³²P比活; 2) 各组分活性磷含量(%)。

表11 小麦和水稻吸收各组分磷的相对量(mgP/kg,盆栽试验)

Table 11 Relative content of different P fractions assimilated by wheat and rice in the pot experiment (mgP/kg)

土壤编号 Soil No.	ΔP ¹⁾					
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
小麦 5	1.20	17.1	3.85	-1.73	-0.37	-3.13
收后 6	0.96	2.89	0.03	-1.48	-1.60	0
水稻 5	2.41	1.68	-15.6	14.9	17.7	-14.1
收后 6	1.68	9.62	-0.96	4.71	8.02	-19.3

1) ΔP为CK与空白(未种作物)处理各组分磷含量之差。

中有效磷的提高,与土壤中 Fe-P 有密切关系,这与提取方法测出的 Fe-P 结果偏高是否有关,有待进一步的研究。

遗憾的是,由于客观的原因(中科院原子能所核反应堆发生故障)标记³²P 未能及时提供,所以水稻收获后这项测定未能进行。为此,我们改用普通方法进行了土壤无机磷分级分析。所得结果列于表 11。将小麦和水稻收获后空白土壤(不施肥不种作物)无机磷各组分减去对照(不施肥种作物),其差值为植物吸收各组分磷的相对值。由表 11 可知,旱作条件下 Ca₈-P, Al-P 差值较大,分别为 17.1mg P/kg 和 3.85mg P/kg (淤土), 2.89mg P/kg 和 0.03mg P/kg (两合土),说明 Ca₈-P 和 Al-P 是小麦利用的缓效磷源,而水田条件下, Fe-P 和 O-P 差值较大,是水稻吸收的主要磷源。以淤土为例,分别为 14.9mg P/kg 和 17.7mg P/kg,其次是 Ca₈-P 为 1.68mg P/kg,而 Al-P 贡献较小,说明淹水种稻后 Fe-P 的有效性提高,部分闭蓄态磷也可被水稻吸收利用。

将土壤各形态磷与速效磷、植株吸磷量求相关,发现淹水后 Fe-P、O-P 与土壤速效磷的相关性提高,分别由 0.6684* 提高到 0.7688** 和由 0.3775 提高到 0.7350*。说明小麦最有效的磷源是 Ca_2 -P, 其次是 Ca_8 -P, Al-P 和 Fe-P, 水稻则是 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Fe-P、O-P 和 Al-P。培养试验结果趋势一致。

淹水对土壤无机磷形态转化的影响见表 12, 结果表明, 淹水后所有土壤 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 均有增加, Al-P 和 O-P 略有降低, Fe-P 变化不大。这与盆栽试验结果一致。以淤土(2 号土)为例: 淹水后 Ca_2 -P 增加了 8.20mg P / kg, Ca_8 -P 增加了 5.10mg P / kg, 淹水使 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 分别提高了 78.1% 和 48.1%, 而 Al-P 和 Fe-P 变化较小, 说明石灰性土壤淹水后土壤磷的有效性提高, 主要是 Ca-P 体系的活性提高所致, 其次才是 Fe-P 和 Al-P 体系的作用。土壤无机磷各组分的动态变化趋势一致(图表未附)。

表 12 淹水前后土壤无机磷组分及其相对含量

Table 12 Contents and relative percentages of inorganic P fractions before and after flooding

土号 Soil No.	Ca_2 -P		Ca_8 -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca_{10} -P	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
各 组 分 磷 含 量 (mg/kg)												
Content												
1	8.89	9.18	18.2	20.3	42.0	40.4	80.5	78.4	140	88.5	296	299
2	10.5	18.7	10.6	15.7	42.0	44.2	99.7	84.5	142	137	252	280
5	11.4	16.2	15.3	29.0	61.2	51.8	85.7	95.8	158	105	295	281
4	14.6	12.3	13.4	28.5	30.0	20.7	44.5	47.7	106	69.3	448	470
3	7.32	9.17	10.6	24.6	28.1	21.4	48.4	45.1	96.4	64.4	400	390
6	6.06	8.94	10.9	16.9	31.3	23.6	48.5	47.2	106	70.9	420	422
各 组 分 磷 占 无 机 磷 总 量 的 百 分 数 (%)												
Relative percentage												
1	1.52	1.71	3.10	3.77	7.16	7.89	13.8	14.6	24.0	16.5	50.5	55.6
2	1.88	3.22	1.90	2.71	7.64	7.62	17.9	14.6	25.5	23.6	45.2	48.3
5	1.82	2.80	2.45	5.01	9.76	8.96	13.7	16.6	25.2	18.1	47.1	48.6
4	2.22	1.90	2.05	4.39	4.57	3.20	6.78	7.36	16.1	10.7	68.3	72.5
3	1.24	1.65	1.80	4.43	4.76	3.86	8.20	8.14	16.3	11.6	67.7	70.3
6	0.97	1.52	1.76	2.87	5.02	4.01	7.78	8.01	17.0	12.0	67.5	71.6

a 拟旱培养; b 淹水培养。

结合我们其它的实验结果¹⁾可以看出, 淹水后石灰性土壤磷有效性增加主要有如下原因: (1) 淹水使土壤 pH 降低, 有利于磷酸盐的溶解, ΔpH 与土壤速效磷呈正相关 ($r = 0.8108$, $n = 5$); (2) 淹水后土壤铁铝氧化物向无定型态转化, 使 FeA (pH 6.0, 0.2mol / L $(NH_4)_2C_2O_4-H_2C_2O_4$ 浸提) 含量增加, FeA 与 Fe-P 呈显著正相关 ($r = 0.9367^*$, $n = 5$); (3) 淹水后虽然土壤对磷的吸附增加, 但解吸也增加, 被吸附的这部分磷短期内对作物仍然有效; (4) 本文结果表明, 淹水使土壤 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 含量提高, 使磷酸钙盐向有效态转化。

1) 程传敏, 曹翠玉, 水旱轮作条件下灰性土壤无机磷的形态转化及有效性的研究(待刊)。

表13 拟旱—淹水过程中外加磷使土壤各组分磷提高的相对量(%)

Table 13 Effects of added P on the increase (%) of different soil P fractions during dryland-flooding process

土号 Soil No.	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca ₁₀ -P	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	577	409	130	140	121	64.7	48.9	49.9	11.3	23.6	18.7	11.4
2	506	171	267	185	150	63.6	48.4	65.7	15.4	19.7	10.4	/
5	489	207	185	88.0	86.7	45.0	53.1	38.2	/	24.5	/	15.4
4	488	506	232	84.3	104	93.8	57.5	63.2	/	13.8	/	2.52
3	760	504	383	176	128	144	53.6	88.9	1.65	24.9	1.93	12.5
6	986	563	161	176	121	115	238	76.8	10.4	18.1	/	0.666

a 拟旱; b 淹水。

表14 淹水—回旱过程中土壤无机磷组成的变化(mgP/kg)

Table 14 Changes of soil inorganic P fractions during flooding-draining process (mgP/kg)

土号 Soil No.	Ca ₂ -P		Ca ₈ -P		Al-P		Fe-P		O-P		Ca ₁₀ -P	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	9.18	7.74	20.3	33.0	42.4	47.5	78.4	41.2	88.5	138	299	207
2	18.7	17.9	21.0	22.4	40.0	17.1	84.5	71.0	91.1	199	270	323
5	16.2	3.89	29.0	61.7	51.8	31.1	95.8	63.5	105	146	381	357
4	12.3	12.6	28.5	36.6	20.7	9.90	47.7	42.7	69.3	78.9	470	458
3	9.17	8.46	24.6	34.0	21.4	8.94	45.1	36.3	64.4	72.4	390	381
6	8.94	2.92	16.9	31.3	23.6	18.8	47.2	36.8	70.9	82.1	422	410

a 淹水; b 回旱。

石灰性土壤在外加磷条件下,水田与旱地类似,主要转化为 Ca₂-P和 Ca₈-P,其次才是 Fe-P和 Al-P,除 Ca₁₀-P变化不大外,其余各组分均略有增加,其中 Ca₂-P增加 2—6 倍, Ca₈-P为 1—2 倍, Fe-P和 Al-P略有增加。淹水土壤与旱地的区别在于:(1)淹水使磷肥对 Ca₂-P和 Ca₈-P的贡献减弱;以 2 号土(淤土)为例,旱培养时 Ca₂-P提高了 5.06 倍, Ca₈-P提高了 2.67 倍,而淹水培养则分别提高了 1.71 倍和 1.85 倍;(2)淹水削弱了外加磷肥对 Al-P的贡献,而增加了 Fe-P组分,仍以 1 号土为例,旱培养时施加磷肥 Al-P、Fe-P分别提高 121% 和 48.9%,淹水时则相应提高了 64.7% 和 49.9%,这种作用在加入稻草时更加明显。综上所述,淹水条件下,外加磷主要转化为 Ca₂-P和亚稳态的 Ca₈-P,其次为 Fe-P、Al-P,且前两个组分的比例较大(表 13)。

2.2.3 淹水—回旱过程中土壤无机磷组成的变化 回旱以后土壤无机磷组分除 Ca₁₀-P 变化不大外,其余组分均有所变化。除个别土壤异常外, Ca₂-P、Al-P、Fe-P 组分均呈降低趋势。 Ca₈-P 和 O-P 有所提高。可见,回旱后土壤磷的有效性降低,土壤无机磷向难溶态转化(表 14)。土壤无机磷组分的动态变化结果也与之一致。

参 考 文 献

1. 鲁如坤,牟润生,1965:磷肥对水稻和旱作的肥效及其后效的研究。土壤学报,第 13 卷 2 期,152—159 页。
2. 顾益初,蒋柏藩,1990:石灰性土壤无机磷分级的测定方法。土壤,第 22 卷 2 期,101—102 页。

3. 陆允甫、周鸣铮, 1987: 红壤旱耕地速效磷测定方法与指标的研究。土壤学报, 第 24 卷 4 期, 325—334 页。
4. 曹翠玉、史瑞和, 1991: 徐淮地区石灰性土壤磷肥残效的研究。土壤, 第 24 卷 2 期, 71—76 页。
5. Chang S. C., M. L. Jackson, 1957: Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci., 84: 133—144.
6. Dumber A. D., D. E. Baker, 1965: Use of isotopic dilution in a study of inorganic phosphorus fractions from different soils. S. S. S. A. P., 29: 259—262.
7. Sah R. N., D. S. Mikkelsen, 1986: Transformations of inorganic phosphorus during flooding and draining period of soil. S. S. S. A. J., 50: 62—67.
8. Sah R. N., D. S. Mikkelsen, 1986: Effects of anaerobic decomposition of organic matter on sorption and transformations of P. I. effects on P sorption. Soil Sci., 142: 267—274. II. effects on amorphous iron and P transformations. Soil Sci., 142: 346—351.
9. Sah R. N., D. S. Mikkelsen, 1989: Phosphorus behavior in flooded-drained soils. S. S. S. A. J. 53. 1718—1732.
10. Shari zia M et al., 1992: Evaluation of phosphorus fertility status of calcareous Alkaline soils under rice based cropping sequences. Soil Sci. Plant Nutr. 38(1): 7—13.

TRANSFORMATION AND AVAILABILITY OF INORGANIC PHOSPHORUS IN CALCAREOUS SOILS DURING FLOODING AND DRAINING ALTERNATING PROCESS

Cheng Chuanmin and Cao Cuiyu

(Nanjing Agricultural University, 210095)

Summary

Pot and incubation experiments were carried out to study the effect of alternate flooding and drying on the transformation and availability of phosphorus in calcareous soils. The results indicated that flooding significantly increased P availability in calcareous soil and enhanced the transformation of inorganic phosphate into more available fractions such as $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Fe-P . After draining and drying the process reversed in the soils.

Key words Flooding–draining alternating, Calcareous soils, Inorganic phosphorus fractions