

退化红壤肥力障碍特征及重建措施

Ⅲ. 典型地区红壤磷素积累及其环境意义^①

鲁如坤 时正元

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 本文研究了红壤典型地区土壤磷素的不断积累情况,并初步提出了可能造成面源磷污染水体的土壤有效磷临界参考水平。这一水平在以径流为主和以下渗水流为主的不同土壤上临界值不同,在旱地土壤和水稻土上数值也不同。作者认为红壤区目前的土壤有效磷水平大部分都处于上述临界值以下,但在冲积土区的水稻土上,特别是高产水稻土区,以及城郊蔬菜区都有数量不等的土壤已达到或超过这一临界值,面源磷的污染在这类土壤上已成为现实威胁。作者建议应开展我国不同地区面源磷对环境影响的研究。

关键词 红壤磷素积累;面源磷污染

在本系列报告的前两部分^[1,2]中着重讨论了退化红壤肥力障碍及其重建措施,这里将较详细地对磷素积累及其环境意义加以讨论。

面源磷(农田磷)的污染问题愈来愈受到人们的重视。但这是一个比较复杂的问题。本文仅从土壤养分的角度来探讨土壤磷素积累及其环境意义。

1 材料和方法

表 1 供试代表性土壤的基本性质

序号	试验号	土壤	母质	采集地点	pH	全氮 (N%)	有效磷 (P, mg/kg)	交换钾 (K ₂ O, mg/kg)
21	1	红壤	红砂岩	江西兴国	4.70	0.112	3.6	39.1
23	2	红壤	紫砂岩	江西兴国	5.13	0.05	2.0	53.7
26	3	红壤性 水稻土	红砂岩	江西兴国	4.7	0.05	49.0	58.2
55	9	赤红壤	花岗岩	广东东莞	5.6	0.163	3.7	51.8
90	16	砖红壤	玄武岩	广东徐闻	4.6	0.05	1.0	27.5
125	18	红壤	红砂岩	江西余江	4.9	0.13	1.2	71.6
-	17	红壤(长试)	第四纪粘土	江西鹰潭	4.6	0.04	3.7	69.0
-	19	红壤性 水稻土(长试)	第四纪粘土	江西进贤	6.0	0.09	12.9	102
-	-	潮土	黄河冲积	河南封丘	8.45	0.08	3.0	106.3
-	20	红壤性 水稻土	第四纪粘土	浙江金华	5.5	0.11	6.9	50

典型地区选择在江西余江县的洪湖乡。这里的土壤是典型的退化丘陵红壤及其发育的红壤性水稻土。共采土 79 个,并在 4 块农田中建立档案。测定养分在 4 年中的变化。室内

^① 国家攻关(96-044-03-12)和中科院重大项目(kz-95T-04-01 和 kz951-AJ-301-01)的支持

试验研究了土壤有效磷水平和水溶磷的关系,采用了江西、湖南、福建、广东等省红壤,砖红壤及红壤性水稻土标本 14 个和河南的潮土 1 个,一部分土壤的基本化学性质列于表 1。

供试土壤除去测定有效磷和水溶磷外并对其中 3 种土壤加入不同量的磷培育,然后测定有效磷和水溶磷(水:土=20:1)以观察加入的磷在固液相间的分布,磷的测定方法见土壤农业化学分析方法^[3]。

2 结果和讨论

2.1 典型地区土壤磷素的积累

为了研究丘陵区红壤的磷素变化选择了江西省余江县洪湖乡,这里分布着典型的第三纪红砂岩和第四纪红色粘土发育的退化红壤及红壤性水稻土,土壤养分的变化从根本上决定于农田养分平衡,研究表明^[4]我国南方农田土壤磷素平衡均处于盈余状态,而且盈余以不同速度增长。我们一些研究也证明江西省、余江县和其所属的洪湖乡 3 级农田磷素的平衡也处于较大的磷素盈余状态(表 2,为了比较,在表中也列出了氮钾的平衡)。

从表 2 可以看出 90 年代中期,江西省不论全省或在典型的县、乡,农田磷素平衡均处于较大的盈余状态。这种平衡状况预示着土壤磷素的积累。研究还表明自 1986 年到 1995 年,江西省磷素盈余以每年 4% 的速率增长^[4]。为了证实土壤素的积累,我们在洪湖乡采集了 79 个标本,包括水田和旱地,并和 1982 年该乡土壤普查的结果(标本 27 个)相对照,结果列于表 3。

从表 3 可以看出,在 1982 年,在所采农田标本中,极高和高一级的田块均为 0。而大部分田块(占 88.9%)有效磷是属于低和极低水平范围。但经过 15 年,情况有了很大变化,高和极高两级田块由原来 0 增加到 53%。即该乡差不多一半以上的田块有效磷素已达到较高水平。原来占 88.9% 的低和极低有效水平田块已迅速降低到 25.4%。表 3 结果充分表明,洪湖乡农田土壤有效磷水平有了显著的提高。即有了积累。

为了进一步验证土壤磷素水平的积累我们测定了农民的 4 个田块,在 4 年中(1997~2000)每年测定各个田块的养分投入、产出并计算出磷素平衡状况。同时,测定 4 块土壤 4 年中有效磷的变化,结果列于表 4。

从表 4 可以看出典型田块磷素平衡显著过量。从 4 年的结果看,后两年盈余有较大的降低,这说明该田块的磷肥施用趋于合理。但总的看磷素平衡都有较大盈余,反映在有效磷(P,下同)水平上,这 4 年中有了显著增加,平均从 28.1 上升到 34.2mg/kg。

以上结果都证明,红壤区土壤的磷素水平是不断上升的,这对于克服红壤区养分最大的

表 2 江西省、余江县、洪湖乡 3 级农田养分平衡

省县乡	年份	养分平衡(%)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
江西省	1995	108	112	-10
余江县	1995	33	131	-23
洪湖乡	1994	23	137	-17

$$* \text{养分平衡}(\%) = [(\text{投入量}/\text{产出量}) - 1] \times 100$$

表 3 1982~1996 年洪湖乡农田有效磷的动态变化

分级	有效磷(P) (mg/kg)	占标本(%)	
		1982	1996
极高	>20	0	31.7
高	15~20	0	21.5
中	10~15	11.1	21.5
低	5~10	81.5	24.1
极低	<5	7.4	1.3

结果充分表明,洪湖乡农田土壤有效磷水平有了显著的提高。即有了积累。

表 4 洪湖乡典型田块 4 年间的磷素平衡和有效磷变化(平均值)

年份	磷素平衡(%)	有效磷(P, mg/kg)
1997	348	28.1
1998	273	-
1999	191	-
2000	191	34.2

以上结果都证明,红壤区土壤的磷素水平是不断上升的,这对于克服红壤区养分最大的

限制因素——磷是一件好事。但也有其不利的一面。当磷积累到一定程度就会成为污染源的一个重要因素。

土壤磷素积累是一个世界性问题,特别在发达国家包括美国及西欧。比如西欧7个国家(英、法、瑞典、荷兰、丹麦、爱尔兰)磷(P)盈余 $2.3\sim 57.2\text{kg}/\text{hm}^2$,磷素平衡由 $15\sim 260\%$ 。英国平均盈余 $10\text{kg}/\text{hm}^2$,根据英国5532个标本分析表明,42%的标本土壤有效磷达到极高,30%达到高,即高和极高的田块达到72%,^[5]而美国的一些州,土壤有效磷水平属“高”和“极高”的土壤占50%以上^[6]所以,在美国有人认为非点源的磷是污染水体的首要原因^[7]。既然我国红壤区土壤磷素水平处于不断积累之中,那么它们对于环境(主要是水体环境)的影响如何?现在是否已有影响?将来如何?成为当前人们关心的重大问题。为了回答这些问题,我们进行了以下试验。很显然要充分回答以上问题仍需要进行更多的工作。

2.2 供试土壤的水溶磷水平

为了研究红壤区某些土壤在现在土壤磷素水平条件下的水溶磷状况。我们对采自南方3省的一些土壤进行了有效磷和水溶磷的测定(土:水=1:20)。以求了解在目前有效磷水平和在一定降雨条件下,径流和渗漏水可能的水溶磷水平。结果列于表5。

从表5可知,所有红壤砖红壤旱地土壤,在现在的土壤有效磷水平(变幅为 $1.5\sim 15\text{mg}/\text{kg}$)范围内,均未测出明显的水溶磷含量,这说明,目前在这些土壤上不论是通过径流或是渗漏水都不会对当地水体环境造成威胁。在表5所列土壤中有(6个)水稻土它们由不同母质发育,其中3个(146、26和38号)土壤有效磷高达40、50和 $60\text{mg}/\text{kg}$ 。并且都出现了水溶磷,分别达到0.13、0.29和 $0.36\text{mg}/\text{L}$ 。大部分冲积母质和紫色砂页岩母质的水稻土,有效磷水平较高,可能是施磷造成的。这类高磷水稻土对环境可能造成的威胁将在下面讨论。

2.3 施磷后土壤有效磷和水溶磷的变化及其环境意义

2.3.1 施磷引起的土壤有效磷和水溶磷的变化

前面讨论了南方一些旱地土壤,在目前土壤有效磷水平下,不会对当地水体环境造成威胁。但是,由于红壤区土壤磷素的发展趋向是不断积累。如果这一趋势继续下去土壤有效磷达到某种水平就有可能威胁到环境,这是一个重要的问题。土壤有效磷水平和水溶磷水平的关系,涉及一些土壤因素,需要进一步研究。但是,土壤水溶磷水平,从总的趋向看,必然和土壤有效磷水平呈正相关,所以找到一个水溶磷开始出现的土壤有效磷水平应该是可能的。为此,我们选了5个土壤(旱地红壤和砖红壤各1个,3个红壤性水稻土,分别加入不同量的磷(KH_2PO_4)以了解土壤有效磷和水溶磷的关系及出现水溶磷的土壤有效磷水平。首先看一下旱地土壤的情况(表6)。从表6可知,土壤有效磷(加磷60天后,假定已达到基本平衡)和加磷量(9级用量)是直线相关,两种

表5 红壤区土壤的有效磷水平和水溶磷

序号	土壤	地点	有效磷 (P,mg/kg)	水溶磷 (P,mg/L)
21	红壤	江西兴国	3.6	Tr*(极少,下同)
23	红壤	江西兴国	2.0	Tr
26	红壤性水稻土	江西兴国	49.0	0.29
30	赤红壤	福建漳州	15.3	Tr
31	赤红壤	福建南靖	1.7	Tr
38	冲积性水稻土	福建漳州	61.0	0.36
47	冲积性水稻土	福建诏安	13	Tr
50	冲积性水稻土	福建诏安	8.2	Tr
90	砖红壤	广东徐闻	1.0	Tr
121	页岩坡积水稻土	湖南衡南	5.9	Tr
122	紫色土	湖南衡南	1.5	Tr
123	红壤	湖南湘潭	1.9	Tr
146	冲积水稻土	海南屯昌	39	0.13
19	红壤	江西进贤	17.2	Tr

土壤的 r 分别达到 0.9829(砖红壤)和 0.991(第四纪红壤), 均达到 0.01 水平显著, 其它 3 种土壤也有类似情况。砖红壤在加磷低于 240mg/kg 时(540kg/hm²)无水溶磷出现。这说明砖红壤强大的固定磷的能力, 在加磷达 360mg/kg 时水溶磷出现并达到 0.22mg/L。第四纪红色粘土发育的退化红壤。在加磷量达到 480mg/kg 时(1080kg/hm²) 才出现水溶磷(0.11mg/L)。因此, 在南方的红壤和砖红壤上, 不仅当前不存在农田土壤磷素对水体环境的威胁, 而且较长的一段时间内也不大可能会出现这种威胁。

从表 7 可以看出, 红壤性水稻土开始出现水溶磷的有效磷水平在 35~40mg/kg。而红壤和砖红壤旱地土壤, 出现水溶磷的有效磷水平为 50~70mg/kg。这里也显示了旱地和水田土壤的差别, 由此(从表 6 和表 7), 可以认为供试土壤水溶磷(0.1mg/L)出现的有效磷水平, 旱地在 60mg/kg 左右而水田在 40mg/kg 左右。

表 6 旱地土壤加磷后土壤磷素的变化(60天后)

土 壤	加磷量 (P)mg/kg	Olsen-P mg/kg	水溶磷 (p)mg/L
砖红壤	0	1.0	Tr*
	21.6	1.0	Tr
	36.6	2.9	Tr
	60	5.9	Tr
	72	7.3	Tr
	240	30.4	Tr
	360	46.2	0.22
	480	83.6	0.47
第四纪红壤 (江西余江长试 NK)	0	Tr	Tr
	21.6	0.8	Tr
	36.6	2.1	Tr
	60.0	4.1	Tr
	72.0	5.5	Tr
	90.0	6.5	Tr
	240	24.4	Tr
	360	44.4	Tr
480	70.4	0.11	

表 7 水田土壤加磷后土壤磷素变化(60天后)

土 壤	加磷(p)量 (mg/kg)	Olsen-p (mg/kg)	H ₂ O-p (mg/L)
第三纪水田 (江西余江)	0	12	Tr
	21.6	17.9	0.06
	36.6	25.0	0.09
	60.0	35.8	0.17
	72.0	36.2	0.27
第四纪水稻土 (江西进贤)	0	17.2	Tr
	21.6	19.4	Tr
	36.6	23.1	Tr
	60.0	30.5	0.03
第四纪水稻土 (浙江金华)	0	6.9	Tr
	21.6	26.4	Tr
	36.6	30.9	Tr
	60.0	38.1	0.06
	72.0	40.9	0.1

作为比较, 我们也测定了在华北平原广泛分布的潮土的水溶磷情况(表 8)。从表 8 可以看出石灰性的潮土, 在土壤有效磷 10mg/kg(7.3mg/kg)以下即出现水溶磷。这一数值比红壤的旱地和水稻土都低得多。这说明, 在北方地区, 虽然一般雨量较少, 渗漏水量不大, 但在灌溉条件下, 特别是大水漫灌时, 渗漏水将会有一定量的磷进入地下水, 这应引起重视。

表 8 华北潮土加磷后的磷素变化(加磷 60 天后)

加磷(p)量(mg/kg)	有效磷(p mg/kg)	水溶磷(p mg/L)
0	3.0	0.09
21.6	7.3	0.13
36.6	12.1	0.23
60.0	20.4	0.43
72.0	26.3	0.54

从以上结果可以知道, 不同土壤出现水溶磷(0.1mg/L)时土壤有效磷水平是不相同的。它决定于土壤一系列的性质。

2.3.2 土壤水溶磷水平的环境意义 土壤水溶磷水平高到一定程度就会影响水体环境。但这个关系也是比较复杂的, 它涉及到一系列的因素, 其中主要的至少有雨量, 降雨强度和

土壤磷的缓冲能力等,后者决定磷在固液相间的分配。不过,我们仍然有可能在定性基础上讨论一下土壤水溶磷水平的环境意义。

一般认为地表水磷(P)浓度只要达到0.1mg/L,即可造成富营养化。^[8]封闭型的湖水磷浓度(全磷)达到0.035~0.1mg/L即为高富营养化湖;开放型的湖泊,当湖水全磷(P)达到0.08~0.1mg/L时有70%的湖泊会出现高富营养化。因此湖水全磷浓度在0.1mg/L似乎是一个重要的界限,达到这一界限,大多数湖泊(开放型)都可能出现富营养化。而对封闭型湖泊达到这一界线时已是将高富营养化湖了^[9]。美国环保局的标准认为径流中可溶磷(DP)应<0.04mg/L,全磷应<0.1mg/L。^{P⁽¹⁰⁾}。因此,农田径流中全磷不应超过0.1mg/L,水溶磷不应超过0.04mg/L。我们根据这一假定讨论一下土壤水溶磷的环境意义。

(1)径流磷。进入地表水的磷大部分由径流带入,径流中磷浓度和土壤的水溶磷有关,在雨量大和径流量大的情况下,径流可溶磷浓度通常小于土壤水溶磷浓度,反过来则可能大于土壤水溶磷浓度。另外还决定于径流所影响的土层深度。在一般情况下,只影响土表2~5厘米。中科院红壤生态站的结果表明坡地上径流量占雨量的80~90%;径流中固体部分有磷富集现象,因为径流中土粒较细。因此径流磷和土壤水溶磷之间的关系也比较复杂。就径流可溶磷部分来说,如果假定径流可溶磷大体上和土壤水溶磷水平相近,根据表6结果则旱地红壤、砖红壤有效磷达到40~50mg/kg就应该认为是一个临界水平。这时水溶磷水平已经可能通过径流对水体环境构成威胁了。如果在红壤区水田上形成径流,则这一临界值要低一些。表7结果表明在水稻土有效磷达到20~40mg/kg时,水溶磷可能已接近或略超过0.04mg/L的指标了。

(2)渗漏水磷。通常认为通过渗漏水进入水体的磷所占比重不大。但是,也应看到,如果以0.1mg/L作为渗漏水中磷污染的临界指标。当渗漏水为100mm时,每公顷只要随渗漏水下移的磷达到0.1kg/hm²。就可对水体环境构成威胁了。所以达到有害水平时渗漏水是很少的。

一般说,渗漏水磷浓度常常低于用通常方法测定的土壤水溶磷浓度,这是因为土壤有效磷常随土壤深度增加而显著减少。根据这一点并且按渗漏水磷浓度不应>0.1mg/L的指标,从表6表7结果看,可以有条件地认为在红壤区旱地上土壤有效磷在50~70mg/kg(以60mg/kg计),在水稻土上土壤有效磷在30~40mg/kg(以40mg/kg计)时,是面源磷通过渗漏水污染水源的一个大致的临界指标。

2.4 几点讨论

1. 对于我国南方广大的旱地土壤和砖红壤,目前土壤的有效磷水平(3~15mg/kg)不至于因农田磷造成对当地水体环境的威胁。但是一部分水稻土,特别是冲积母质发育的水稻土,有些田块有效磷已经较高(40~50mg/kg)已对水源构成现实威胁。虽然他们并不占南方水稻土的主体但也应引起重视。另外,在本地区的水稻土高产区(太湖、杭嘉湖、鄱阳湖等)以及城郊的菜园土壤,已有相当部分有效磷水平达到或超过临界水平。更应引起重视。

2. 土壤磷素水平,特别是有效磷水平直接关系到面源磷素进入水体的数量和影响,结果证明,本地区土壤磷素在不断积累之中。这种积累一方面增加了土壤磷的供应能力。另一方面,积累到一定程度,就会对水体环境造成威胁,初步结果认为在有大量径流的旱地红壤和砖红壤上,有效磷达到40~50mg/kg。水稻土达到20~40mg/kg已是危险水平。在以下渗水流为主的地方,旱地红壤砖红壤有效磷达到60mg/kg也已达到危险水平。

(下转第238页)

- 3 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类(修订方案). 北京: 中国农业出版社, 1995
- 4 Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy (8th ed). Washington: USDA-NRCS, 1998
- 5 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质. 土壤学报, 1979, (16)3: 277~281
- 6 琚中和, 刘勋. 红壤水分特征的初步研究. 土壤通报, 1980, (3): 8~12
- 7 福建土壤普查办公室编. 福建土壤. 福州: 福建科学技术出版社, 1991, 362~365
- 8 王明珠等. 低丘红壤区水资源的时空变异及综合开发利用, 见: 中国科学院红壤生态站编. 红壤生态系统研究(第三集). 北京: 中国农业出版社, 1995, 243~282
- 9 张斌, 张桃林. 南方东部丘陵地区季节性干旱成因及其对策研究. 生态学报, 1995, 15(4): 413~419
- 10 Jianfei Chen. Effects of different planting patterns in hilly orchard on soil ecological environment. In: Zhihong Cao. Soil, Human and Environment Interactions. China Science and Technology Press, 1998, 66~70
- 11 李志杰等. 培肥提高水分利用率及其在持续农业中的作用, 见: 现代土壤科学研究. 北京: 中国农业出版社, 1994, 150~153
- 12 王殿武等. 冀西北高原旱作农田土壤水分动态与提高水分作物生产力研究. 土壤学报, 1999, 30(1): 7~10
- 13 Henry D. Forth Fundamentals of Soil Science (sixth edition). New York: John Wiley & Sons, 1978: P. 94~95
- 14 姚贤良. 红壤水问题及其管理. 土壤学报, 1996, 33(1): 13~20
- 15 杨金楼等. 设施园艺滴灌应用技术研究. 土壤物理与农业持续发展, 1995, 76~86

★★
(上接第 231 页)

这一危险水平显然受一系列因素的影响, 包括土壤性质、地形、雨量等。特别应提到施磷后的时间。如果在施磷后立即遇到大雨, 这一危险水平就低得多。本文水溶磷水平是在施磷 60 天后的结果。

3. 尽管目前大部分红壤区土壤(旱地和水田)在现有土壤有效磷水平下还不至于因面源磷造成水体污染。但在冲积土区, 在城郊蔬菜种植地区这一威胁已实际存在。因为在上述地区已有相当部分土壤有效磷水平达到或接近危险水平, 少部分甚至超过。这就是为什么土壤磷的积累, 面源磷对水体的影响, 应该提上日程的原因。

参 考 文 献

- 1 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施 I. 退化状况评价及酸害纠正措施. 土壤, 2000, 32(4): 198~200
- 2 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施 II. 磷、氮、钾库重建措施. 土壤, 2000, 32(6): 310~314
- 3 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 1999
- 4 鲁如坤等. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价及动态变化研究. 中国农业科学, 2000, 32(22): 63~67
- 5 Edwards A. C. et al. Proc. The fert. soc. 1997, No 404.
- 6 Sharpley, A. N. et al. JEQ 1994 23: 437~451
- 7 Lyons J. b. et al. JEQ 1998 27: 895~903
- 8 Johnston, A. E. Proc. fertilizer soc. 1997, No 396
- 9 Foy, R. H. et al. Proc fertilizer soc. 1995, No 365
- 10 Sharpley, A. N. et al. JEQ 1994, 23. 437