

小流域土壤磷的积累特征及其环境效应 ——以黄土高原沟壑区王东沟小流域为例

郭胜利, 车升国, 梁 伟, 党廷辉, 杨勤科

(西北农林科技大学 水土保持研究所, 中科院、水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 了解土壤磷素积累特征对调控磷肥使用、降低农田磷素的环境风险和保障生态环境安全具有重要意义。以黄土高原沟壑区的典型小流域为对象, 分析了 18 年来 (1986 ~ 2004 年) 综合治理条件下流域土壤全磷、有效磷 (Olsen-P) 含量的时空变化特征及其对土壤水溶性磷含量变化的影响。结果表明, 截至到 2004 年, 流域磷素积累由塬面逐步向塬坡和沟道扩展。2004 年, 农田土壤全磷 ($752 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Olsen-P ($20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较 1986 年分别提高了 45% 和 3.5 倍, 相当于每年全磷提高 $13 \text{ mg} \cdot \text{P} \cdot \text{kg}^{-1}$, Olsen-P 每年提高 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 流域 50% 的农田土壤 Olsen-P 含量超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与 1993 年大规模建立果园时相比, 果园土壤全磷每年提高 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{P} \cdot \text{kg}^{-1}$, Olsen-P 每年提高 $3 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2004 年已有 70% 的果园土壤 Olsen-P 含量超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20 ~ 60cm 土层的果园全磷和 Olsen-P 含量也逐渐提高。但林草地的全磷没有显著变化, Olsen-P 依然低于 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。1986 年以来, 无机磷肥的持续投入是流域土壤磷素积累的主导因素。流域土壤 Olsen-P 与全磷存在显著的线性相关关系 ($p < 0.001$); 水溶性磷与 Olsen-P 含量呈显著的指数函数关系 ($p < 0.001$)。土壤磷素大量积累已成为黄土高原水土流失区当前十分迫切的农田环境问题。

关键词: 小流域; 土地利用; 磷肥投入; 土壤磷积累

中图分类号: S143.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 3037(2009)07 - 1171 - 10

1 引言

磷肥的长期投入是导致土壤磷素积累的重要因素^[1~3]。土壤磷素积累与磷素流失、水体富营养化密切相关^[4~9]。土壤表层的含磷水平与径流中的磷素含量呈直线相关^[10,11]。土壤 Olsen-P 含量超过一定阈值, 磷素就会通过亚地表径流而流失^[12,13]。欧美国家, 尤其是英国从 1935 年到 2000 年的 65 年间土壤中磷的积累量达到了 $1000 \text{ kg} \cdot \text{P} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中集约化养殖场中土壤磷素的积累速度达到 $20 \text{ kg} \cdot \text{P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 种植场则为 $10 \text{ kg} \cdot \text{P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[11], 其他西欧国家与英国情况相近^[3]。在我国, 1980 年以来随着磷肥的持续投入, 土壤磷素平衡盈余以年增 11% 的速度不断扩大^[14,15], 农业的非点源污染呈加剧趋势^[16,17]。

黄土高原地区水土流失严重, 土壤肥力贫瘠。土壤对磷肥的固定及其对肥效的影响曾是这一地区广泛关注的内容^[18~20]。但 1980 年以来, 随着土地承包责任制和小流域综合治

收稿日期: 2008-12-08; 修订日期: 2009-04-03。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2005CB121102); 国家自然科学基金 (40771125); 中国科学院科技创新方向项目 (KZCX2 - YW - 424)。

第一作者简介: 郭胜利 (1969-), 男, 河北栾城人, 副研究员, 主要从事土壤生态研究。E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

理的进行,持续大量的磷肥投入使得该地区土壤磷素含量逐渐升高,个别果园土壤 Olsen-P 含量甚至超过了 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21]。但 1980 年以来,对这一地区土壤磷素含量变化、磷积累特征及其环境效应却鲜有报道。

本文以黄土高原沟壑区的典型小流域为对象,研究了 1980 年以来流域土壤磷素的时空演变特征,并分析讨论了磷肥投入、土地利用等对土壤磷素积累的影响。对调控磷肥投入、降低农田磷素的环境风险和保障生态环境安全具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 流域概况

王东沟小流域位于陕西省长武县(东经 $107^{\circ}40' \sim 107^{\circ}42'$,北纬 $35^{\circ}12' \sim 35^{\circ}16'$),为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”和“长武农田生态系统国家野外研究站”的所在地。流域土地面积 8.3 km^2 ,塬面、沟道、塬坡约各占土地面积的 $1/3$,沟壑密度为 $2.78 \text{ 条}/\text{km}^2$,属典型的黄土高原沟壑类型区。塬面海拔 1220 m ,流域内从塬面到沟底的最大高差为 280 m 。大陆季风气候,年均气温 9.1°C ,10 月积温 3029°C ,多年平均雨量 584 mm 。季节性分布不均,7~9 月份降水占总量的 55% 。流域内土地利用类型有农田、果园、荒草地、林地等。主要土壤类型为黑垆土(分布于塬面)和黄绵土(分布于塬坡和沟道),母质为深厚的中壤质马兰黄土。塬面地势平坦,为粮果的主要种植区,塬坡土壤侵蚀严重,为水土流失的主要治理地段。经过“六五”、“七五”期间大规模综合治理,土壤侵蚀模数已由治理前的 $1860 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 下降到目前的 $895 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 以下。

2.2 采样与分析方法

采取近似网格采样方法,同时考虑地貌和土地利用的影响。1986 年,以流域内的耕地为主采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品 80 个^[22],1993 年采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品 131 个^[23];2004 年,采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层样品 315 个, $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土壤剖面 32 个。 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 剖面样品采用直径为 3 cm 的土钻,间隔 20 cm 土层取样。三次样品的处理和分析方法相同:土样风干,磨细过 1 mm 和 0.25 mm 筛后,测定土壤全磷($\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮)、速效磷含量(Olsen 法)^[24]和水溶性磷含量(0.1 M CaCl_2 溶液,1:4 土液比,振荡 1h),提取液中磷素的测定用钼蓝比色法^[25]。

塬面、塬坡上不同利用年限果园土壤全磷和 Olsen-P 间差异分析采用 SAS6.12^[26] 软件进行。

3 结果与分析

3.1 不同利用条件下流域土壤磷素含量的积累

流域进行综合治理之初(1986 年),农田土壤全磷含量平均为 $519 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Olsen-P 含量($4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)属于“极缺磷水平($<5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)”(表 1)。与之相比,2004 年农田土壤全磷($752 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 Olsen-P($20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别提高了 45% 和 3.5 倍,相当于每年全磷提高 $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Olsen-P 提高 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。果园土壤 1993 年 Olsen-P 含量为 $6.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,到 2004 年达到 $28.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提高 3.2 倍。1993 年结果表明,林地和草地 Olsen-P 低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为极缺磷土壤;2004 年尽管也有一定程度提高,但仍然属于极缺磷水平。2004 年农田土壤中 Olsen-P 平均含量为 $20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,个别农田土壤达到了 $53.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;大约 50% 的面积中 Olsen-P 含量超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。果园土壤磷素富集更严重,Olsen-P 含量最高为 $122 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 70% 以上的果园土壤中 Olsen-P 含量超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

20%土壤的 Olsen-P 超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表 2 显示,在塬坡上,10年以上的果园 Olsen-P 就开始积累(超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而塬面,5年以上果园土壤 Olsen-P 含量就开始积累。果园全磷每年的提高速度大约为 $20 \sim 30 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$,Olsen-P 则为 $3 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外,果园 20~60cm 土层的全磷和 Olsen-P 含量也明显提高(图 1)。

表 1 黄土高原王东沟小流域不同土地利用方式下土壤磷素含量变化

Table 1 Soil total P and Olsen-P under different land use patterns in Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

土地利用方式	1986年 ^[22]				1993年 ^[23]				2004年	
	全磷		Olsen-P		Olsen-P		全磷		Olsen-P	
	/($\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$)		/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		/($\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$)		/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
	极值范围	平均	极值范围	平均	极值范围	平均	极值范围	平均	极值范围	平均
农田	317~638	519(80)	1.3~9.6	4.5(80)	1.1~25.3	6.3(83)	564~932	752(35)	3.5~53.8	20.2(35)
果园					3.6~12.6	6.7(10)	540~1460	787(147)	1.8~122.0	28.0(147)
林地					1.0~9.5	2.9(20)	470~911	585(91)	0.6~22.6	4.0(91)
草地					1.0~12.4	2.2(18)	467~867	598(42)	0.7~36.7	5.3(42)
流域平均					1.0~25.3	5.2(131)	467~1223	664(315)	0.6~85.4	17.2(315)

注:括号里面的数字表示样本数。

表 2 利用年限对果园土壤磷素的影响(最小差异法 $\text{LSD}_{0.05}$)

Table 2 Effect of the number of years used on soil total P, Olsen-P in orchards under different land use time

地貌单元	年限	样本数	全磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Olsen-P/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
塬面	5年以下	9	768.0 ± 51.6^B	19.7 ± 5.0^B
	5~10年	9	826.9 ± 61.1^{BA}	27.4 ± 8.4^{BA}
	10~15年	9	937.2 ± 250.2^A	39.3 ± 28.0^A
			$\text{LSD}_{0.05}$	0.13
塬坡	10年以下	12	699.4 ± 41.4^A	19.6 ± 3.2^C
	10~15年	51	826.3 ± 157.5^B	30.7 ± 3.6^B
	15年以上	43	903.5 ± 67.0^B	38.9 ± 5.2^A
			$\text{LSD}_{0.05}$	0.10

注:A、B、C代表差异显著性,相同字母表示无显著差异。

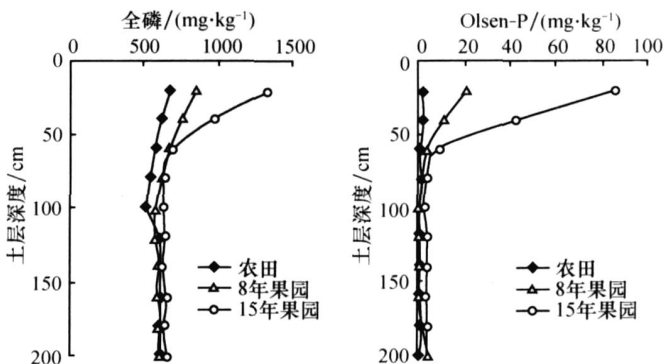


图 1 王东沟流域塬面果园全磷和 Olsen-P 在剖面中的分布

Fig. 1 Distribution of TSP and Olsen-P in 0 - 200 cm of orchard in tableland of Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

3.2 流域中土壤全磷和 Olsen-P的空间积累特征

2004年流域土壤全磷含量平均为 $664 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$,但土壤全磷含量的分布具有显著的空间差异性,从塬面、塬坡到沟道呈现依次降低的分布特征(图 2a)。由图 2提取的信息(表 3)显示,塬面 90%以上土壤全磷含量超过了流域的平均值。其中, $753.5 \sim 803.5 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的斑块占塬面面积的 44%,部分斑块全磷含量达到 $900 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上;塬坡有 50%的土壤全磷含量超过流域的平均值;沟道中,38%的土壤全磷高于流域平均值。

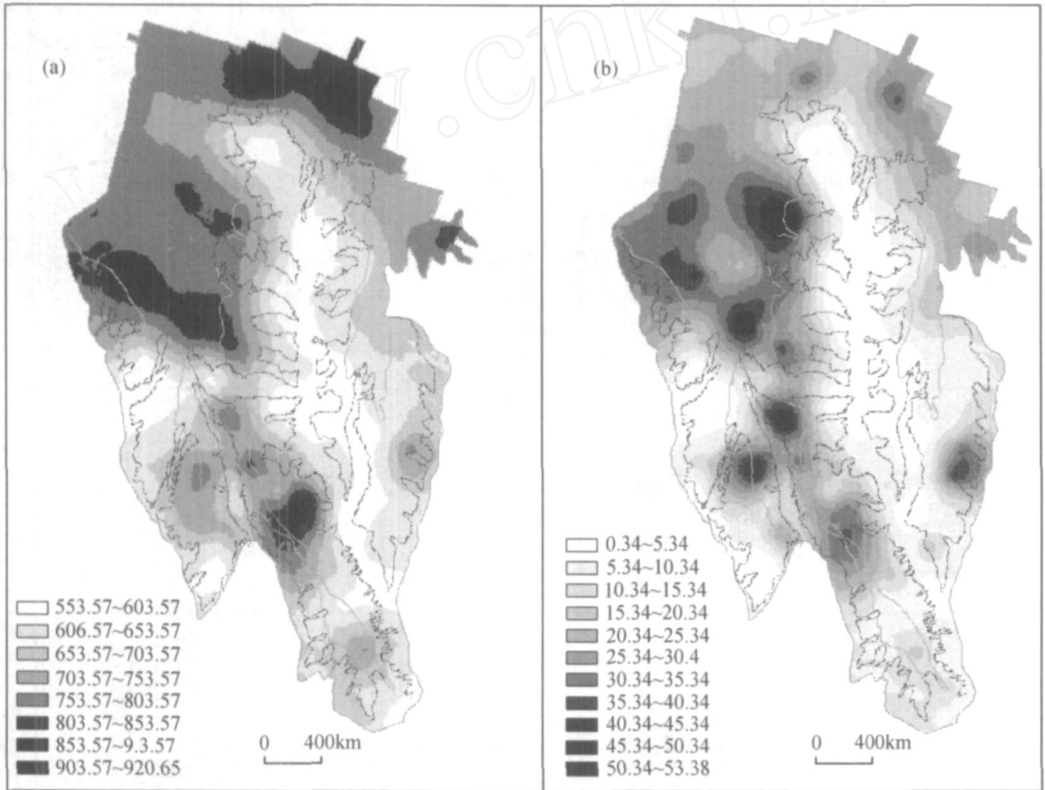


图 2 王东沟小流域土壤全磷 (a)和 Olsen-P (b)含量空间分布图 (2004年)

Fig. 2 Spatial distribution of Soil total P (a) and Olsen-P (b) at Wangdonggou catchment in 2004

表 3 王东沟流域土壤全磷含量水平的面积分布 (2004年)

Table 3 Distribution of the area percentage of TSP in Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

土壤全磷 / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	面积比例 /%			
	流域平均	塬面	塬坡	沟道
553.5 ~ 603.5	13.5	0.6	17.5	26.5
603.5 ~ 653.5	22.8	5.5	32.9	35.0
653.5 ~ 703.5	16.7	9.7	20.5	21.9
703.5 ~ 753.5	15.0	18.3	15.1	10.6
753.5 ~ 803.5	21.3	43.8	8.7	4.7
803.5 ~ 853.5	8.9	18.4	4.4	1.2
853.5 ~ 903.5	1.8	3.6	1.0	0.2
903.5 ~ 920.6	0.0	0.1	0.0	0.0
合计	100	100	100	100

流域土壤 Olsen-P 空间分布特征与土壤全磷基本一致。以土壤 Olsen-P 含量高于 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为石灰性土壤达到富磷水平考虑, 可发现, 塬面上, 土壤 Olsen-P 超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占塬面面积的 87%; 塬坡, 35% 的面积高于 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 沟道内, 25% 的面积高于 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 4)。此外, 塬面和塬坡存在显著的 Olsen-P 高值中心 (图 2b)。

表 4 王东沟流域土壤 Olsen-P 面积分布 (2004 年)

Table 4 Distribution of the area percentage of Olsen P in Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

土壤 Olsen-P/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	面积比例 / %			
	流域平均	塬面	塬坡	沟道
0.34 ~ 5.34	16.0	1.3	19.3	32.1
5.34 ~ 10.34	18.6	5.2	27.8	26.8
10.34 ~ 15.34	12.9	6.6	17.7	16.1
15.34 ~ 20.34	11.9	15.7	9.8	9.0
20.34 ~ 25.34	15.4	27.6	7.9	7.1
25.34 ~ 30.34	11.9	20.9	7.5	4.7
30.34 ~ 35.34	8.7	13.7	7.5	3.5
35.34 ~ 40.34	3.0	6.0	1.6	0.6
40.34 ~ 45.34	1.0	2.0	0.6	0.1
45.34 ~ 50.34	0.4	0.9	0.3	0.0
50.34 ~ 53.38	0.1	0.1	0.1	0.0
合计	100	100	100	100

上述的结果表明, 截至 2004 年流域土壤磷素的积累在塬面大范围出现, 其次是塬坡和沟道, 整个流域存在由塬面逐步向塬坡和沟道扩展的趋势。这一趋势既与不同地貌类型上的土地利用方式密切相关, 也与流域水土流失及其治理不无关系。具体原因需要进一步研究。

3.3 流域土壤全磷、Olsen-P 和水溶性磷的关系

除了没有磷肥投入的沟道外, 在塬面的黑垆土、塬坡的黄绵土上, 都会看到 Olsen-P 含量随着土壤全磷含量线性升高的趋势 (图 3)。但 Olsen-P 与土壤全磷的关系在不同地貌单

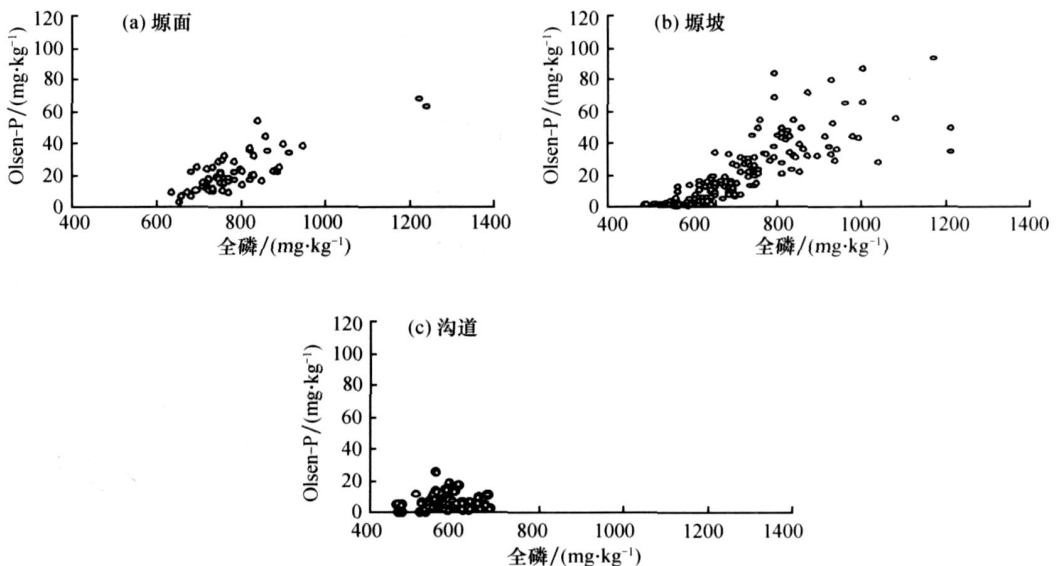


图 3 王东沟流域不同地貌单元上土壤全磷对 Olsen-P 的影响

Fig. 3 Effects of total soil P on Olsen-P in tableland, sloped land and Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

元上存在差异。在塬面上,随着土壤全磷含量提高,土壤 Olsen-P含量呈显著的直线线性增加。但塬坡地上,土壤全磷在 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 含量以下时,随着土壤全磷含量提高,土壤 Olsen-P含量没有显著提高;但当土壤全磷高于 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,随着土壤全磷含量提高,土壤 Olsen-P含量呈显著的直线线性增加。沟道内,土壤全磷与 Olsen-P不存在显著线性关系(图 3)。

水溶性磷是反映磷素流失的重要指标。图 4 显示,在黄土高原沟壑区的农田和果园上,随着土壤 Olsen-P 的提高,水溶性磷也会随之而提高。这一结果预示着黄土区潜在的土壤磷素淋失和环境影响。

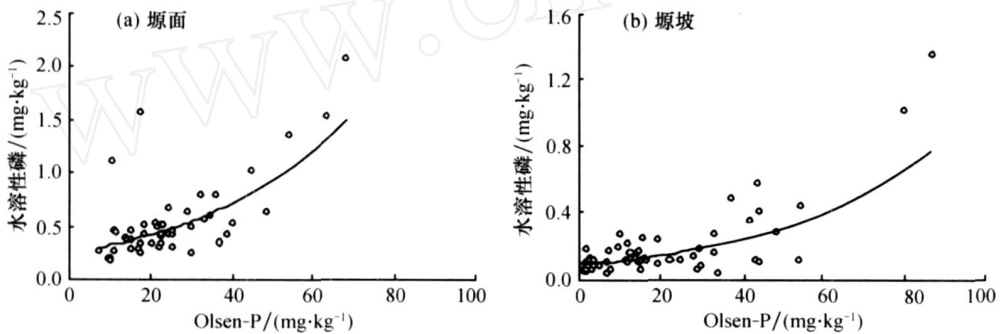


图 4 王东沟流域塬面与坡地土壤 Olsen-P 与水溶性磷的关系

Fig. 4 Relationship between $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Olsen-P in tableland and slopland of Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

4 讨论

1980 前流域磷肥投入总量为 6.2 t ,且 98% 为有机肥,单位面积的平均施磷量极低(图 5)。因此,1986 年的测定值反映了流域大量施用磷肥前的土壤供磷水平(表 1)。1993 年,农田和果园土壤 Olsen-P 含量分别达到了 6.3 和 $6.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明随着磷肥投入的增加,流域耕地土壤的供磷水平虽有缓解但仍属于“缺磷水平”($5.0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。之后,随着无机磷肥的持续大量投入(图 5a),到 2004 年时农田土壤的供磷水平已经达到高磷水平(超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由于 1990 年后 50% 以上磷肥投入到果园(图 5b),所以,果园土壤的全

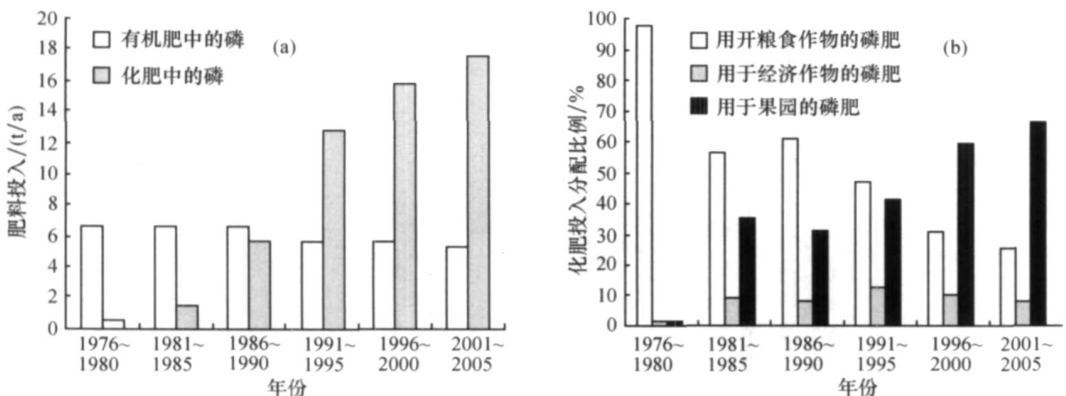


图 5 流域磷肥投入量 (a) 与投入分配比例 (b) 的演变

Fig. 5 Changes in input of fertilizer P and ratio of fertilization in Wangdonggou catchment, the Loess Plateau

磷和 Olsen-P含量得到迅速提高。在塬面和塬坡土壤上都可看到土壤 Olsen-P随着土壤全磷含量线性升高的现象(图 3)。这些结果表明,随着近 20年来磷肥的持续投入,黄土地区的农田、果园土壤正逐步由原来的“缺磷”或“极缺磷”水平演变为磷素积累状态。

不同地貌单元上,全磷与 Olsen-P线性关系存在差异。其原因可能与磷肥的投入和土壤磷素含量有关。塬面,土壤磷素含量总体高于塬坡,而且磷肥投入较早。在塬坡地上,土壤本身磷素严重缺乏,加上土壤对磷肥吸附固定作用强烈,致使磷肥施用初期,大量磷肥被吸附固定,Olsen-P随土壤全磷提高的趋势不明显;但随着土壤对磷素吸附的饱和,土壤对磷素的吸附固定能力会逐渐降低,而土壤供磷能力会迅速提高^[27~29]。本研究中,当土壤全磷高于 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,表现出全磷与 Olsen-P呈显著的线性关系。由图 3线性回归方程可以初步估算无论塬面黑垆土还是塬坡黄绵土,全磷每升高 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 Olsen-P就会升高大约 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

目前国外已有的研究发现,磷素大量淋失与土壤 Olsen-P升高到一定的水平密切相关。例如,在英格兰,土壤 Olsen-P含量超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷素就会通过亚地表径流而流失^[12],在北爱尔兰地区这一临界值则为 $22 \text{ mg Olsen-P} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[13]。在荷兰,土壤磷吸附饱和度达到 25%时,就会出现土壤磷素大量流失的现象^[30]。赵小蓉等^[31]室内模拟试验发现,陕北黄绵土上,水溶性磷与 Olsen-P呈线性关系,土壤 Olsen-P发生淋失的“突变点”为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究结果显示,水溶性磷与 Olsen-P呈指数变化关系(图 4),土壤 Olsen-P淋失的“突变点”更值得关注。

从流域尺度上看,全磷和 Olsen-P较高的部分主要分布在塬面和塬坡部位。与流域土地利用中农田果园分布的位置基本一致。由于 1980年以来,磷肥的大量投入,目前许多果园和农田土壤都有磷素富集的报道^[21,32,33]。在黄土高原地区,渭北旱塬作为粮果生产基地,未来化肥投入依然是提高土壤生产力的重要措施。如何维持土壤生产力,同时降低磷肥施用量和潜在的环境风险成为当前十分迫切的问题。

5 结论

(1) 到 2004年流域 50%农田和 70%果园土壤 Olsen-P含量超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,农田土壤全磷 ($752 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 Olsen-P ($20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)较 1986分别提高了 45%和 3.5倍,相当于每年全磷提高 $13 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$,Olsen-P提高 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每年果园全磷的提高速度大约为 $20 \sim 30 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$,Olsen-P为 $3 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,果园 20~60 cm土层的全磷和 Olsen-P含量也明显提高。磷肥的长期投入是流域磷素积累的主要驱动因素。

(2) 截至到 2004年,塬面 90%、塬坡有 50%、沟道 38%以上面积的土壤全磷含量超过了流域的平均值 $664 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$,塬面和塬坡中部分斑块全磷含量达到 $900 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上;土壤 Olsen-P超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占塬面面积的 87%,占塬坡面积的 35%,占沟道面积的 25%。流域磷素积累由塬面逐步向塬坡和沟道扩展。

(3) 塬面或塬坡上,当土壤全磷高于 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以后,与 Olsen-P存在显著的线性相关关系;但水溶性磷与 Olsen-P含量呈指数函数关系。如何维持土壤生产力,同时降低磷肥施用量和潜在的环境风险成为当前十分迫切的研究课题。

参考文献 (References):

- [1] Withers P J A, Edwards A C, Foy R H. Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil

- [J]. *Soil Use and Management*, 2001, 17: 139 - 149.
- [2] Shapley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century [J]. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 176 - 181.
- [3] Isemann K. Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication [J]. *Fert. Res.*, 1990, 26: 253 - 269.
- [4] Edwards A C, Withers P J A. Soil phosphorus management and water quality: A UK perspective [J]. *Soil Use and Management*, 1998, 14: 124 - 130.
- [5] Graetz D A, Nair V D, Portier K M, et al. Phosphorus accumulation in manure-impacted Spodosols of Florida [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, (75): 31 - 40.
- [6] Shapley A N, Foy R H, Withers P J A. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: An overview [J]. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 1 - 9.
- [7] Djodjic F, Bergstrom L, Grant C. Phosphorus management in balanced agricultural systems [J]. *Soil Use and Management*, 2005, (21): 94 - 101.
- [8] Lin C, Eshel G, Roehl K E, et al. Studies of P accumulation in soil/sediment profiles used for large-scale waste water reclamation [J]. *Soil Use and Management*, 2006, (22): 143 - 150.
- [9] Bravo C, Torrent J, Giráldez J V, et al. Long-term effect of tillage on phosphorus forms and sorption in a vertisol of southern Spain [J]. *Europ. J. Agronomy*, 2006, (25): 264 - 269.
- [10] Pote D H, Daniel T C, Shapley A P, et al. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 855 - 859.
- [11] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Relationships between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff [J]. *J. Environ. Qual.*, 1999, 28: 170 - 175.
- [12] Heckrath G, Brooker P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment [J]. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 904 - 910.
- [13] Jordan C, McGuckin S O, Smith R V. Increased predicted losses of phosphorus to surface waters from soils with high Olsen-P concentrations [J]. *Soil Use and Management*, 2000, (16): 27 - 35.
- [14] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究——全国和典型地区养分循环和平衡现状 [J]. *土壤通报*, 1996, 27(5): 193 ~ 196. [LU Ru-kun, LIU Hong-xiang, WEN Da-zhong, et al. Research on agroecosystem nutrient cycling and balance in the typical areas, China——The status quo of nutrient cycling and balance in national and typical areas. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(5): 193 - 196.]
- [15] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. *磷肥与复肥*, 2003, 19(1): 4 ~ 8. [LU Ru-kun. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4 - 8.]
- [16] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策——21世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. *中国农业科学*, 2004, 34: 1008 ~ 1017. [ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 34: 1008 - 1017.]
- [17] 马林, 王方浩, 马文奇, 等. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 170 ~ 174. [MA Lin, WANG Fang-hao, MA Wen-qi, et al. Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in Northeast China for middle and long period. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8): 170 - 174.]
- [18] 谢建昌, 于天仁, 姚文华. 黄土性土壤对磷钾的供应能力 [J]. *土壤专报*, 第 33 号 (土壤农业化学). 北京: 科学出版社, 1958. [XIE Jian-chang, YU Tian-ren, YAO Wen-hua. Ability to supply phosphorus and potassium of less soils. *Soil Reported*, No. 33 (Soil Agricultural Chemistry). Beijing: Science Press, 1958.]
- [19] 黎耀辉. 陕西省关中地区石灰性土壤上影响磷肥肥效因素的探讨——土壤的某些农化性质对磷肥肥效的影响 [J]. *土壤学报*, 1965, 13(1): 39 ~ 45. [LI Yao-hui. Effect of the chemical properties of calcareous soils on the response of the yield of crops to phosphate fertilizer, Guanzhong section, Shaanxi. *Acta Pedologica Sinica*, 1965, 13(1): 39 - 45.]
- [20] 彭琳, 彭祥林. 黄土地区土壤中磷的含量分布、形态转化与磷肥合理施用 [J]. *土壤学报*, 1989, 26(4): 344 ~ 352. [PENG Lin, PENG Xiang-lin. Studies on contents distribution forms and transformation of soil phosphorus and the rational

- application of phosphorous fertilizer in loessial region *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(4): 344 - 352.]
- [21] 刘子龙, 张广军, 赵赵阳, 等. 陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 50 ~ 53. [LIU Zi-long, ZHANG Guang-jun, ZHANG Zheng-yao, *et al* Survey on soil nutrient of apple orchards in the major production area of Shaanxi *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(2): 50 - 53.]
- [22] 杨平, 彭琳, 郭明航, 等. 王东沟试验区土壤资源调查报告 [A]. 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究 [C]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991. 285 ~ 292. [YANG Ping, PENG Lin, GUO Ming-hang, *et al* Survey of soil resources at the Wangdonggou watershed. In: LI Yu-shan, SU Shan-min. Efficient Ecological and Economic System in Wangdonggou Watershed of Changwu County. Beijing: Scientific and Technical Publishers of China, 1991. 285 - 292.]
- [23] 党廷辉, 李青. 长武王东沟流域土壤养分分布特征与培肥途径 [A]. 郝明德, 梁银丽. 长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术 [C]. 北京: 气象出版社, 1998. 120 ~ 130. [DANG Ting-hui, LI Qing. Distribution of soil nutrients and soil fertility improvements at the Wangdonggou watershed of Changwu. In: HAO Ming-de, LIANG Yin-li. Principles and Techniques of Agro-ecosystem Structure, Function, and Adjustment in Changwu Station. Beijing: Meteorology Press of China, 1998. 120 - 130.]
- [24] Olsen S R, Cole C V, Watanable F S, *et al* Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate [M]. U. S. Department of Agricultural Circulars, 1954. 939.
- [25] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters [J]. *Anal Chim. Acta*, 1962, 27: 31 - 36.
- [26] SAS Release (6.12) [M]. SAS Institute Inc., Cary, USA, 1998.
- [27] Delgado A, Torrent J. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils [J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 2000, 64: 2031 - 2037.
- [28] Guertal E A, Eckert D J, Traina S J, *et al* Differential phosphorus retention in soil profiles under no-till crop production [J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1991, 55: 410 - 413.
- [29] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 33 ~ 39. [GUO Sheng-li, DANG Ting-hui, LIU Shou-zan, *et al* Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(1): 33 - 39.]
- [30] Breeuwsma A, Silva S. Phosphorus Fertilization and Environmental Effects in the Netherlands and the Po Region (Italy) [M]. Rapport-DLO Staring Centre, Wageningen, 1992. 57.
- [31] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估——淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系 [J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3011 ~ 3017. [ZHAO Xiao-rong, ZHONG Xiao-ying, LI Gui-tong. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. The relationships between soil properties adsorption characteristics and the leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3011 - 3017.]
- [32] 隋鹏飞, 史进元, 李文祥. 陕西省红富士苹果果园施肥调查 [J]. 土壤肥料, 1995, (1): 35 ~ 37. [SUI Peng-fei, SHI Jin-yuan, LI Wen-xiang. Fertilization survey of Red Fuji apples in Shaanxi province. *Soils and Fertilizers*, 1995, (1): 35 - 37.]
- [33] 李会民, 程雪绒, 徐驰, 等. 咸阳地区苹果园土壤养分状况调查及建议 [J]. 陕西农业科学, 2002, (2): 10 ~ 12. [LI Hui-min, CHENG Xue-rong, XU Chi, *et al* The investigation and advice of orchards nutrient in Xianyang area. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2002, (2): 10 - 12.]

Phosphorus Accumulation in Soils of a Catchment on the Loess Plateau and Potential Environmental Implications

GUO Sheng-li, CHE Sheng-guo, LIANG Wei, DANG Ting-hui, YANG Qin-ke

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest University of Agriculture and Forestry/CAS, Yangling 712100, China)

Abstract: Understanding soil phosphorus accumulation in environment plays an important role in control of phosphate fertilizer application, reduction in environmental risk and guarantee ecological environment security. Phosphorus application to agricultural soils in arable cropping systems and orchard systems often exceeds P uptake by crops and apple trees in the Loess Plateau, China. Taking a catchment as a model, we investigated changes in fertilizer P input, land uses, and fertilization practices in intensive farming systems from 1985 to 2004 in Wangdonggou catchment in the Loess Plateau. Soil total P (TSP), Olsen-P, and water soluble P (WSP) in soils were measured across landforms of the small catchment of Wangdonggou. For STP with more than $664 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the watershed, it accounted for 90% in tableland, 50% in slopeland, and 38% in gullies, respectively. Some blocks in the tableland and slopeland were high P level with more than $900 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. For Olsen-P with more than $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, it accounted for more than 87% in tableland, 35% in slopeland, and 25% in gullies. The amount of inorganic P fertilizer added 2 t in 1985 into the catchment, increased to 16 t in 2004. The orchard area covered 2% of the total area in 1986, increased to 33% in 2004, cropland area decreased from 50% in 1985 to 28% in 2004. The increase of orchard area and P fertilization mainly contributed to P fertilizer input into the catchment, inorganic P fertilizer played an important role in P fertilizer input. The percentage of 65% in the P fertilizer added into the catchment was applied in orchard and 25% applied in crops in 2004. The area of Olsen-P with more than $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ covered 50% of the cropland area and 70% of the orchard land area in 2004. In 2004, soil total P and Olsen-P in cropland soil were $752 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $20.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The net total P accumulation in the cropland soil was $13 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ and the net Olsen-P accumulation $1.0 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. For the orchard land, the net total P accumulation ranged from 20 to $30 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ and the net Olsen-P accumulation 3 - $4 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. In addition, TSP and Olsen-P in 0 - 60 cm of orchard land soil increased with years. There is no significant change in STP and Olsen-P of woodland and grassland. There is significant relationship between STP and Olsen-P in tableland and slopeland of the catchment, the significant exponential function between WSP and Olsen-P were developed in tableland and slopeland, respectively. Phosphorus accumulation in soils has become a serious agriculture environmental issue in a region with soil and water losses on the Loess Plateau, China.

Key words: small catchment; land use; fertilizer P input; P accumulation