植物营养与肥料学报 2003,9(2):131～138
Plant Nutrition and Fertilizer Science

农牧交错带土壤磷素动态研究

吴荣贵[1]，林　葆[1]，H. Tiessen[2]
(1 中国农业科学院土壤肥料研究所，北京 100081；2 Saskatchewan 大学土壤系，Saskatoon，SK，加拿大，S7N 5A8)

摘要：对海拔 2600～3000m 农牧交替带不同退化程度的草原、草原开垦后土壤磷素变化进行了系统研究。退化草原包括：轻度(LDP)，中度(MDP)和重度(HDP)3 种类型，耕种土壤开垦年限从 1 至 50 年不等，土壤样品取自甘肃省 7 县市 18 个地点，主要土壤类型为黑钙土。

通过进行磷的分级发现，草原开垦后土壤有机磷组分明显下降。种植 8、16、41 年后土壤有机磷分别下降 8%、20%和 36%；区域性土壤分析结果亦表明，耕种 30 年以上的土壤有机磷平均下降 35%。有机质矿化，土壤侵蚀后由于耕作措施造成的底土与表土混合，以及无机磷肥的施用使得耕种土壤中 Ca-P 明显增加。NaOH 浸提的潜在活性有机磷，随着草原退化程度的增加和耕作年限的延长有递减的趋势。活性有机磷与总有机磷显著相关(R^2 = 0.63)，而活性有机磷的多寡与耕种和施肥明显相关。

关键词：磷的动态；草原土壤；土地利用；农牧交错带
中图分类号：S158.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2003)02-0131-08

Study on the dynamic of soil phosphorus in the transitional areas of grasslands and crop fields

WU Rong-gui[1], LIN Bao[1], H. Tiessen[2]
(*1 Soil and Fertilizer Inst., CAAS, Beijing 100081, China; 2 Dept. of Soil Sci., Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada, S7N 5A8*)

Abstract: This study, conducted on transitional areas of grasslands and crop fields in Gansu, China, deals with the impacts of land use on soil P dynamics. Land uses include three magnitudes of pasture degradation, lightly (LDP), moderately (MDP), and heavily degraded pasture (HDP), and cultivated fields varying 1 to 50 years of cultivation. Soil samples were collected from 18 sites at seven locations lying between 2,600 to 3,000 m above sea level. The dominant soil samples were Chernozem. The objective of this study was to understand soil P dynamics under different land uses.

Phosphorus fractionation showed that proportion of soil organic phosphorus decreased sharply when pasture was put into crop production. Cultivation of grassland resulted in a decrease of organic phosphorus by 8%, 20%, and 36% after 8, 16, and 41 years cultivation, respectively. Regionally, 35% of organic phosphorus was lost within 30 to 50 years cultivation. Cultivation and fertilization significantly raised labile P and calcium associated inorganic phosphorus (Ca-Pi) levels. Mineralization of organic P, incorporation of sub-soil by tillage following erosion, and fertilization were major sources of increased Ca-Pi in topsoil of cultivated fields. In general, Fe- and Al-associated Pi was higher after pasture was cultivated. Soil organic P, especially the potentially labile fraction extracted by NaOH, declined with pasture degradation and cultivation. Labile organic P, extracted by $NaHCO_3$, is highly correlated with total organic P ($R^2 = 0.63$).

Key words: soil P dynamics; grassland soils; land uses; transitional region of pasture and croplands.

收稿日期：2002-06-28
基金项目：加拿大钾磷研究所(PPIC)资助项目。
作者简介：吴荣贵(1960 —)，男，河北藁城人，博士，研究员，主要从事植物营养与土壤退化研究。

我国部分地区,由于土地开发利用不合理,植物残留物被大量移出,植被破坏,覆盖度下降等使土壤退化面积逐年增加。在农牧交替带,一些当地农民为了短期利益,不合理开垦天然草原,使有限的草原载畜量增加,过度放牧十分严重,导致土壤肥力急剧下降[1]。以前,国内外研究草原开垦后的土壤肥力变化多限于土壤碳和氮[2],而对磷的研究报道很少,这主要是因为分离有机磷和无机磷比较困难。然而,磷作为土壤肥力和牧草生产不可缺少的营养元素对改善草原生态环境,保持土壤肥力起到重要作用。所以,本项目就是对高山草原农牧交错带草原退化或开垦耕种后土壤磷的动态变化进行系统研究。

为研究农牧交替带土地利用与磷的动态关系,最理想的方法是将土壤中各种组分的磷进行量化,但是,由于磷在土壤中的形态较为复杂,所以对各组分进行绝对量化较为困难。过去普遍采用的 Olsen-P 方法测定出中性或碱性土壤中有效态无机磷,对大部分农田作物体系中磷素有效性的评价具有很好的应用,而对较复杂的农业体系(比如放牧草场或其它天然生态系统)磷的周转速率和供应相互关联,若还用简单的浸提方法测定,则不能正确评价有机质含量较高的土壤中磷素的有效性[3];对所得分析数据不能进行很好地解释。Chang 和 Jackson 的无机磷分级方法[4],以及众多研究者对该方法进行的修改[5]和我国蒋柏藩-顾益初对石灰性土壤无机磷的分级方法[6],都未对有机磷组分作系统分析和解释。70 年代后期,Bowman 和 Cole[7]用 $NaHCO_3$ 和 NaOH 对土壤有机磷进行了浸提,并认为 $NaHCO_3$ 浸提的有机磷为活性磷,而 NaOH 浸提的有机磷相对比较稳定,称为稳定态有机磷,或在某些地区称为潜在活性磷。

80 年代初,Hedley 首次采用连续浸提方法对磷进行分级[8]。Tiessen 等人[9]对该方法又进行了修改,最近十几年很多研究者均采用该方法对磷进行了分级[10~13],并根据各组分相对稳定性将浸提出的有机磷分为活性,潜在活性和较稳定形态。

1 材料与方法

为研究农牧交替带土地利用对土壤磷素的影响,本研究选择了 2 种土地利用方式:放牧草原和相邻并已知开垦年限的耕地。根据植被盖度,鼠害程度(草原退化的一种标志)将放牧草原分为 3 种类型:轻度(LDP,土壤覆盖度接近 100%,鼠害轻),中度(MDP,覆盖度 80% 左右)和重度(HDP,覆盖度 60%左右,鼠害重),开垦的土壤耕种年限自 1 至 50 年不等。

取土方法分为 2 种:为深入研究磷的动态变化,在甘肃省农业大学天祝草原站采用横断样条法(Transect)。同时,为了验证局部地区的分析结果是否与整个调查区域的研究相吻合,在甘肃省 7 个县市 18 个点进行了大范围区域采样,草原土壤在样方(Quadrat)内取土,而相邻耕地采用随机取样,取土深度为 15cm(耕层)。

1.1 横断样条法

土壤样品于 1997 年在甘肃省农业大学天祝草原站 (37°11′47″N,102°47′03″E,海拔 2940m,年平均气温零下 0.3℃,平均降水量 416 mm)采集。土壤样品取自 3 个长度均为 165 m 的平行横断面,横断样条之间平行间距为 10 m。每条横断面穿过 3 个地块:LDP,燕麦地块(耕种 8 年,以 Cult-8 表示),和 MDP。每样条共取土样 34 个(LDP 6 个,MDP 和 Cult-8 各 14 个),取样点间距为 5 m。在此地块东北 300 m 处,又取了 3 个横断面,每个横断面穿过 3 个地块:MDP,燕麦地块(耕种 16 年,以 Cult-16 表示)和油菜地块(耕种 41 年,以 Cult-41 表示),每样条取土 35 个 (Cult-16 14 个,Cult-41 7 个,MDP 14 个)。取土深度均为 15 cm 耕层,土壤类型为黑钙土。土壤母质为冲积和风成混合物。草原主要植被为:重穗披碱草 (*Elymus nutans*),早熟禾(*Poa pratensis*) 和高山嵩草(*Kobresia royleana*)。

由于天祝草原站第一取样点和第二取样点距离较近,均包括 MDP,而且分析后得知两点 MDP 中的土壤肥力状况无显著差异,所以将这 2 个点归纳在一起进行讨论。供试土壤质地为粉粘壤,土壤中粉粒和粘粒含量随耕作时间的增加而减少。土壤基本理化性状列于表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状(甘肃农大天祝草原站)

Table 1 Soil physical and chemical properties of tested soil(Tianzhu,Gansu)

利用方式 Land uses	pH	电导 EC (dS/m)	有机碳 TOC %	全氮 TN %	全磷 TP %	粘粒 Clay %
LDP	7.4	0.50	84.5	7.49	0.76	27.3
MDP	7.5	0.53	80.5	7.46	0.82	27.5
Cult-8	7.7	0.47	63.0	6.22	0.78	25.8
Cult-16	7.8	0.42	51.4	5.04	0.89	23.6
Cult-41	7.9	0.40	38.2	3.80	0.92	20.4

1.2 区域取样

为了验证局部地区的研究结果是否能应用于整个甘肃省,1999 年又在海拔 2600~3000m 的 7 个县镇 (肃南、山丹、皇城、天祝、桑科、甘加和那义) 18 个地点进行了区域性取样,土壤样品涵盖了甘肃省主要高山放牧草场,草原土壤采用 50cm×50cm 样方取样[14],以便对草原植被进行调查,

相邻已知开垦年限的耕地采用随机方法取样。草原和耕地取土深度均为15cm。为进行统计分析,区域土样土地利用方式划分如下:3种不同的退化草场LDP,MDP,HDP(分类方法相同),耕种年限1至10年(C1-10),11至30年(C11-30),和31至50年(C31-50)的耕地,共6种利用形式,其土壤样品数分别为11、11、17、13、11和9。

所有土壤样品风干后,过0.15 mm筛,磷的分级采用Tiessen和Moir方法(图1)[15],土壤磷的浸提依次为:树脂膜浸提、0.5 mol/L $NaHCO_3$、0.1mol/L NaOH、1.0 mol/L HCl、浓HCl浸提和$H_2SO_4+H_2O_2$消化。相应组分中的无机磷用钼蓝法测定,土壤浸提液经消化后测定该组分全磷含量,而土壤有机磷含量由全磷减去无机磷得出。树脂膜和1.0 mol/L HCl浸提液中几乎不含有机磷。为验证Tiessen和Moir方法中测定出的有机磷含量是否与传统灼烧方法[16]相吻合,本研究又用灼烧方法测定了部分土壤样品。

1.3　统计分析

所有数据采用SPSS(10.0版,1999)软件进行分析;不同土地利用之间的差异性用Tukey-HSD(Honestly Significant Difference)进行比较[17]。该方法在进行各处理间比较时对误差作了校正。

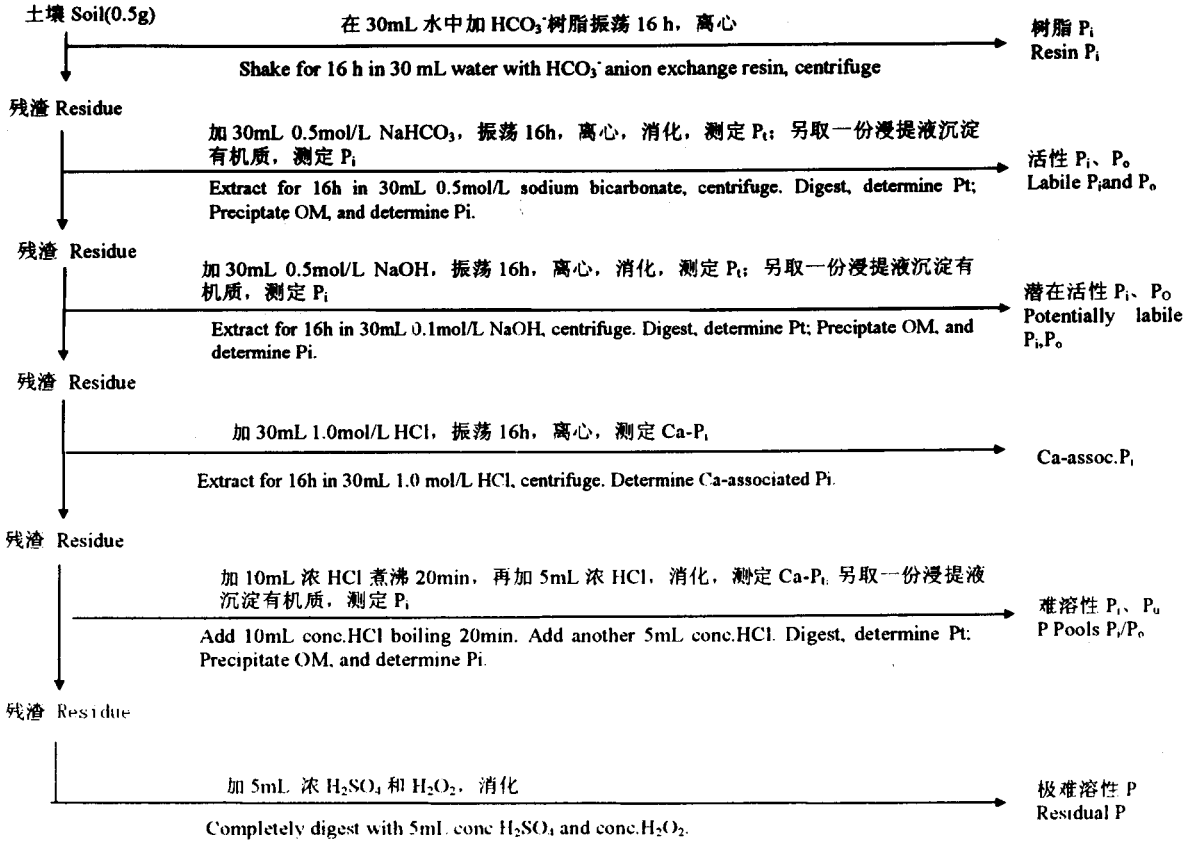

图1　土壤磷的分级流程图

Fig.1　Phosphorus fractionation chart

2　结果与讨论

2.1　草原退化和开垦对磷素动态的影响

磷的分级研究发现,用0.5mol/L $NaHCO_3$浸提的有机磷($NaHCO_3$-Po)随耕种时间的延长而明显下降(表2)。该组分有机磷活性较高,在温带土壤磷的循环中起积极作用[18],因此草原开垦后,可供植物利用的活性有机磷库明显变小。用0.1mol/L NaOH浸提的有机磷(NaOH-Po)下降更加明显,耕种41年后NaOH-Po下降一半以上,平均每年减少1.1%,这充分表明草原土壤开垦种植后较稳定态土壤有机磷库受到破坏。在加热条件下用浓盐酸浸提的有机磷(HHCl-Po)相对比较稳定,虽然短期耕种对HHCl-Po含量没有明显影响,但是耕种41年后该部分磷明显下降,表明潜在的、可以转化的有机磷数量减少。浸提出的3部分有机磷之和的变化趋势与NaOH-Po相似,随着耕种时间的加长,这部分磷含量明显下降。耕种8,16和41年后,其下降程度分别为8%,20%和36%。41年平均年下降量为0.88%。3部分有机磷之和与灼烧法测定的有机磷

显著相关(图2),所以这部分有机磷也可以反映出土壤中有机磷总量的变化趋势。

表2 土地利用方式对土壤有机磷动态的影响(甘肃农大天祝草原站)

Table 2 Land use patterns and soil Po fractions in Tianzhu

土地利用 Land use	$NaHCO_3$-Po	NaOH-Po	HHCl-Po[2)]	合计 Sum-Po[3)]	
	(mg/kg)			(mg/kg)	(%)
LDP	14.7 b[1)]	175 a	141 a	330 a	100
MDP	16.5 a	172 a	136 a	325 a	98
Cult-8	13.1 bc	146 b	145 a	304 ab	92
Cult-16	11.5 cd	119 c	134 ab	265 bc	80
Cult-41	10.0 d	94 d	107 b	211 c	64

1) 同一列之间若字母相同,表明经 Tukey's $HSD_{0.05}$检验差异不显著,以下同。Values in the same column followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's HSD test, same as follows.

2)HHCl 为热浓 HCl,以下同。HHCl stands for concentrated hot HCl., same as follows.

3)三组分($NaHCO_3$-, NaOH- and HHCl-Po)之和,Sum of three Po fractions.

虽然 HHCl-浸提的有机磷绝对含量随耕种时间的延长而降低,但是其相对数量却随耕种时间的延长而增加(表3),表明草原开垦后有机磷活性不但没有提高,还增加了较难分解组分的比例。

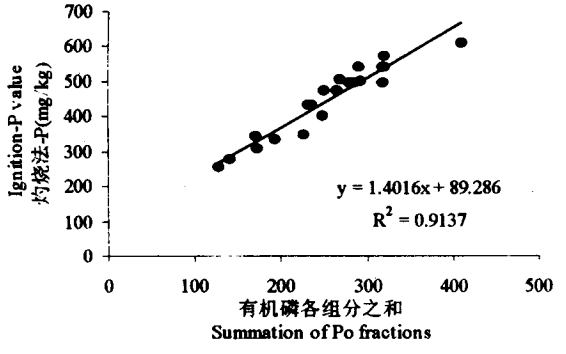

图2 两种有机磷测定方法之比较

Fig. 2 Comparison of two methods of Po determination.

表3 土地利用方式对土壤有机磷各组分比例的影响(%)(甘肃农大天祝草原站)

Table 3 The proportion of Po fractions with land use in Tianzhu.

土地利用 Land use	$NaHCO_3$-Po	NaOH-Po	HHCl-Po
LDP	4.4 a	52.8 a	42.7 c
MDP	5.4 a	52.9 a	41.7 c
Cult-8	4.3 a	47.9 bc	47.8 ab
Cult-16	4.3 a	45.0 c	50.7 a
Cult-41	4.7 a	44.4 c	50.8 a

草原退化和开垦与无机磷(Pi)的动态变化列于表4。树脂膜浸提的无机磷植物有效性较高,随耕种时间的增加,树脂膜磷有增加的趋势,然而耕种时间少于16年时,未达到0.05显著水平,耕种41年后,其土壤中的有效磷(树脂磷 + $NaHCO_3$ 浸提磷)明显高于其它土地利用方式,其原因与土壤有机磷的矿化和当季施用无机磷肥有关。

0.1mol/L NaOH 浸提的无机磷主要是铁/铝-磷(Fe/Al-Pi),随耕种时间的延长土壤中 Fe/Al-Pi 含量有增加的趋势(表4)。Lilienfein 等人也发现在施肥农业中 NaOH 浸提的磷明显增加[17]。耕种土壤中 Fe /Al-Pi 的提高与土壤中有机磷的矿化有关,这反映出土壤中的磷已向次生矿物转化,这也是土壤退化的一种表现。

用稀盐酸浸提的磷是与钙结合的无机磷(Ca-Pi),其含量随耕种时间的增加而明显提高。为了查明 Ca 增加的原因,以甘肃农大天祝草原站开垦16年(Cult-16)的地块为例对耕种土壤中不同来源的 Ca-Pi 进行了推算。又因为该地块与中度退化草原(MDP)相邻,所以 MDP 土壤中的 Ca-Pi 含量 163 mg/kg(表5)作为参照值进行比较。以前的研究表明,该土壤 15 至 45cm 土体中全 P 含量基本不变[19]。测定得知:1)亚层中的土壤 Ca-Pi 含量为 209mg/kg(表5),耕种 16 年后,因土壤遭受各种侵蚀,而导致 92% 的表土被底土替换(通过对土壤铯的放射强度测定得知)[1],因侵蚀而导致底土上移,使表土中的 Ca-Pi 增至 $\left(\frac{8}{100}\times 163+\frac{92}{100}\times 209\right)=$ 205mg/kg;2)通过计算磷的投入与产出得知[1],16年因施用磷肥使土壤表土中的磷增加了大约 32mg/kg,这些磷主要以 Ca-Pi 形态存在;3) MDP 开垦耕种 16 年后,有机磷矿化量为 60mg/kg(由表2计算

得出);4) 从表 4 计算可知,其它形态的无机磷(Pi)　增加量为 16mg/kg。

表 4　土地利用方式对土壤无机磷动态变化的影响(mg/kg,甘肃农大天祝草原站)

Table 4　Effect of land use on Pi fractionations in Tianzhu

土地利用 Land use	LDP	MDP	Cult-8	Cult-16	Cult-41
树脂-P Resin-P (1)	23.6 b[1)]	20.5 b	19.5 b	24.6 b	42.0 a
$NaHCO_3$-Pi (2)	20.5 b	18.1 b	20.3 b	22.2 b	33.9 a
(1) + (2)	44.1 b	38.6 b	39.8 b	46.8 b	75.9 a
NaOH-Pi	15.1 b	15.2 b	15.1 b	18.6 b	28.9 a
DHCl-Pi[2)]	140.4 c	163.3 c	160.7 c	281.7 b	371.3 a
HHCl-Pi	96.1 a	104.6 a	97.4 a	108.7 a	102.7 a
合计 Sum-Pi[3)]	295.7 c	321.7 c	313.0 c	455.8 b	578.9 a
未浸提出-P Residual-P	72.1 a	73.2 a	70.7 a	66.0 ab	58.9 b

1) 同一行之间若字母相同,表明经 Tukey's $HSD_{0.05}$检验差异不显著,以下同。
Values in the same row followed by the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's HSD test.

2) DHCl 指 1.0 mol/L HCl, 以下同。DHCl refers to 1.0 mol/L HCl, same as follows.

3) 浸提出的 Pi 之和(Resin-, $NaHCO_3$-, NaOH-, DHCl- and HHCl-Pi),以下同。Total of Resin-, $NaHCO_3$-, NaOH-, DHCl- and HHCl-Pi, same as follows.

表 5　不同土层中土壤磷组分的变化趋势(mg/kg)(甘肃农大天祝草原站)

Table 5　Phosphorus fractions in soil profile of Tianzhu

磷的分级 P fractions	MDP 表层 (0~15cm)	亚层 (25~45cm)
树脂-P(Resin-P)	20.5	2.0
$NaHCO_3$-Pi	18.1	3.7
NaOH-Pi	15.2	4.1
DHCl-Pi	163.3	209.0
HHCl-Pi	104.6	89.0
全磷 Total-P	819.0	780.0

以上推算和计算出的 Ca-Pi 平衡情况列于表 6。显然,计算值(181 mg/kg)与实际测定值(182 mg/kg)较为一致。由此可以推断,土壤中 Ca-Pi 增加的原因为:1)有机磷的矿化;2)表土遭受侵蚀后,底土与表土混合;3)磷肥施用。在增加的 120 mg/kg 磷中,经有机磷矿化而转化成的 Ca-Pi 占 38%(扣除转化为其它形态的 P 16 mg/kg),底土上移和施用磷肥分别占 Ca-Pi 增加量的 35% 和 27%。

草原退化和开垦对不同磷组分在总浸提量中所占的比例也有较明显的影响(图 3)。图中的活性磷(Labile-P)指树脂和 $NaHCO_3$ 浸提的有机、无机磷之和。活性磷占总浸提磷的 7%~10%,高于热带土壤中的活性磷含量(4%~5%)[17],原因之一就是被测土壤中有机磷含量较高,使得活性有机磷和矿化磷含量增加。用 NaOH 浸提的 Fe/Al-P 和用 HHCl-浸提的难溶解磷所占比例随草原退化和开垦时间的增加而降低,DHCl-浸提的 Ca-P 则相反。未浸提出的磷也有下降的趋势,这部分磷主要以难溶的(复)钙磷为主。

图 3 还表明,不同磷组分的相对数量表明土壤发生或风化的程度[20]。本研究中 LDP 和 MDP 用 NaOH 浸提的磷较高,但是这不表明该退化草原含 Fe/Al-Pi 较高或风化程度强,因为 LDP 和 MDP 中用 NaOH 浸提的磷大部分是有机磷(表 7),而无机磷只占 8%。但是草原开垦耕种 41(Cult-41)年后,Fe/Al-Pi 则上升到 24%,表明有机磷已向 Fe/Al-Pi 和 Ca-Pi 形态转化。

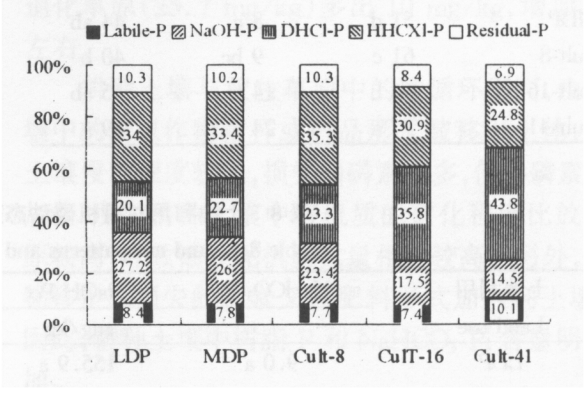

图 3　草原退化和耕种时间与不同组分磷在总浸提量中的比例(%,甘肃农大天祝草原站)

Fig. 3　Relative proportions of extracted P (Pi + Po) in total extracted in Tianzhu.

表 6 草原土壤开垦 16 年后 Ca-Pi 收支平衡(甘肃农大天祝草原站)

Table 6 The balance of Ca-Pi after 16 years' cultivation in Tianzhu

Ca-Pi 来源 Ca-Pi source	含量 Concentration (mg/kg)
原土壤 Ca-Pi Original pasture soil, MDP	163
施入磷 Addition of P fertilizer during 16 years	+32
有机磷的矿化 Po mineralization	+60
转化为其它无机磷 Increase in other Pi fractions	-16
底土与表土混合 Incorporation of subsoil	(209-163)×92% =42
以上五项之合 Sum of above five sources	281
测定值 Actual after 16-year cultivation	282
平衡 Balance	-1

用 $NaHCO_3$ 浸提的无机磷比例在耕种土壤上明显较高,表明若用该浸提剂浸提无机磷,则只能用在有机质含量较低的土壤上,而对活性有机磷含量较高的草原土壤则并不适应。因此,草原土壤应用 $NaHCO_3$ 同时浸提有机和无机磷才能正确评价有效磷含量。

2.2 区域性草原退化和开垦对磷动态的影响

区域性土壤样品分为 6 组:轻度(LDP),中度(MDP)和重度(HDP)3 种不同退化程度的草场,以及 3 类不同耕种年限(C1-10、C11-30 和 C31-50)的相邻耕地。区域土壤样品的分析结果与局部性土壤样品基本一致(表 8)。土壤中的活性有机磷(即 $NaHCO_3$ 浸提 Po),基本不受土地利用方式的影响,但是潜在有效性(或稳定态)有机磷(NaOH-Po)随耕种时间的延长而明显下降。耕种时间在 30 年以上时这部分有机 Po 下降了大约 2/3。更稳定态的 HHCl-Po 对不同土地利用的反应不明显。浸提出的有机磷总量以轻度退化草原最高,达 316 mg/kg 以上,随草原退化程度的加重或开垦时间的加长,有机磷总量逐渐下降。土壤有机磷的多寡取决于土壤中有机质数量以及有机质分解的速度。一般而言,耕种时间愈长,有机质分解数量愈多,所以有机磷数量也愈少。开垦时间 30~50 年,平均下降 35%,这与在天祝草原站所得结果相一致,天祝草原站开垦 41 年后,土壤有机磷下降量达 36%。

表 7 不同组分无机磷的比例(%)
(甘肃农大天祝草原站)

Table 7 The proportion of Pi in total extracted (Pi + Po) in Tianzhu

土地利用 Land use	$NaHCO_3$-Pi	NaOH-Pi	HHCl-Pi
LDP	58 c	8 c	40 b
MDP	51 d	8 c	44 ab
Cult-8	61 c	9 bc	40 b
Cult-16	66 b	14 b	45 ab
Cult-41	77 a	24 a	49 a

区域样品分析还发现,耕种时间较短的土壤(C1-10),其树脂磷(Resin-P)较高,达 42 mg/kg(表 9),而耕种 30 年以上的土壤(C31-50)其 Resin-P 仅为 28 mg/kg,这可能是由于新开垦的耕地,土壤原有的平衡被打破,有机质矿化速度相对较快,释放出较多的活性磷;近几年磷肥用量明显增加,这也是导致 Resin-P 增加的重要原因之一。

草原开垦种植作物后土壤中的 $NaHCO_3$-Pi 有

表 8 土地利用对有机磷动态变化的影响(区域样品分析结果)

Table 8 Land use patterns and soil Po fractions on regional scale

土地利用 Land use	$NaHCO_3$-Po	NaOH-Po	HHCl-Po	合计 Sum-Po	
		mg/kg		mg/kg	%
LDP	9.0 a	155.9 a	151.6 a	316.5 a	100
MDP	8.6 a	143.4 ab	156.7 a	308.7 a	98
HDP	7.2 a	140.4 ab	150.7 a	298.3 a	94
C1-10	6.8 a	105.6 abc	163.6 a	276.0 a	87
C11-30	5.7 a	67.6 bc	133.1 a	206.4 a	65
C31-50	7.7 a	55.9 c	143.0 a	206.6 a	65

增加的趋势,而用 NaOH 浸提的 Fe/Al-Pi 在不同土地利用下差异不显著。Fe/Al-Pi 的绝对数量不受土地利用方式的影响,但是 Ca-Pi 在耕种土地上明显提高,说明大部分施入的磷肥或矿化磷转变成 Ca-Pi,反映出土壤退化后导致了土壤中的化学变化,形成了次生磷矿物。较稳定形态的磷(HHCl-Pi),其含量不受土地利用形式的影响。

表 9　土地利用对无机磷动态的影响 (mg/kg,区域样品分析结果)

Table 9　Land use patterns and soil Pi fractions on regional scale

土地利用 Land use	LDP	MDP	HDP	C1-10	C11-30	C31-50
树脂磷-P Resin-P (1)	14.3 b	10.7 b	8.8 b	42.1 a	21.2 ab	27.7 ab
$NaHCO_3$-Pi (2)	12.5 b	9.7 b	9.7 b	28.8 a	27.6 ab	25.5 ab
(1) + (2)	26.8 b	20.4 b	18.5 b	70.9 a	48.8 ab	53.2 ab
NaOH-Pi	17.0 a	14.1 a	14.0 a	18.0 a	12.0 a	21.4 a
DHCl-Pi	196.6 b	201.2 b	219.1 b	240.4 ab	385.0 a	299.0 ab
HHCl-Pi	110.1 a	110.2 a	110.2 a	119.9 a	115.6 a	115.3 a
合计 Sum -Pi	350.4 b	345.8 b	361.9 b	449.0 ab	561.3 a	488.9 ab
未浸提出-P Residual-P	72.7 a	75.1 a	76.1 a	80.1 a	74.4 a	76.6 a

3　讨论

草原开垦后土壤有机磷明显下降。种植 8、16、41 年后土壤有机磷分别下降 8%、20% 和 36%。区域性土壤分析也得出相似的结果,耕种 30 年以上的土壤有机磷平均下降 35%。有机磷下降的主要原因是:随着草原开垦后土壤有机碳的矿化和损失,磷作为有机碳矿化时的附属产品也同时被土壤微生物分解(或吸收),进而转化成难溶态 Ca-P。另外,草原开垦耕种后,土壤侵蚀严重,富含有机质的表土受到强烈侵蚀,所以土壤有机磷明显下降。

潜在活性有机磷(NaOH-Po)受土地利用的影响较明显,草原开垦后其数量锐减。因此,可供土壤微生物利用的有机磷库变小,限制了转化成活性有机、无机磷的速度,降低了磷的供应强度。与轻度退化草原相比,尽管开垦时间较短的地块(天祝 Cult-16)其稳定态 HHCl-Po 含量变化不大,但是草原退化和耕种使其数量明显下降。

$NaHCO_3$ 浸提的有机磷一般由低分子有机物质组成,如核糖核酸,核苷酸,甘油磷酸盐等[7],在微生物作用下可迅速分解成植物可利用形态,这部分磷与总有机磷(三组分之和)显著相关($y = 13.26x + 127.9, R^2 = 0.63$),尽管这部分有机磷只占总有机磷的一小部分(4.5% 左右),但是,因为其活性较高,在植物生长中起到重要作用。开垦土壤 $NaHCO_3$-Po 数量减少,必须提供外来磷源以补充磷的供应,才能维持或提高作物产量。

草原退化或开垦对有机磷各组分的相对数量和绝对数量的影响有所不同。一般而言,随耕种时间的延长用浓盐酸浸提的难降解态有机磷的绝对数量降低,但是其相对数量却明显增加,表明草原退化和耕种使活性有机磷组分最先分解,而剩余部分则是较难分解的有机磷。这充分表明潜在的土壤(磷)肥力在耕种土壤中也已降低。

草原土壤中植物吸收的磷素主要来自植物残体或土壤有机质的缓慢分解,在这种封闭式循环圈内[21],有机质分解速度受土壤微生物活动的制约[22],所以若有机质数量较少,微生物活性亦低,则使活性磷含量(树脂-P,$NaHCO_3$-Pi,$NaHCO_3$-Po)相对较少。轻度退化的草原有机质含量较高,微生物活性亦较高,所以活性磷总量(35.8 mg/kg)比重度退化草原(25.7 mg/kg)多出 10 mg/kg,增加 40% 左右。

耕种土壤与放牧草原中的磷循环不同,由于土壤中的磷以作物秸秆或产品形式被移出土体,同时土壤侵蚀程度较大,损失的磷素较多,使得磷素循环加快,所以耕种土壤中有机质的矿化程度比放牧草原较高,导致活性无机磷数量相对较高。另外,被植物移走或损失的磷素又以肥料形式加入到土壤中,因此,耕种土壤中树脂-P 和 $NaHCO_3$-Pi 含量明显增加。

在温带高山草原地区的黑钙土壤中,Ca-Pi 是主要的磷素形态,随着草原退化程度的增加和耕种时间的延长,这部分磷明显增加。对 Ca-Pi 来源的研究表明,有机磷矿化是退化草原和开垦耕种土壤 Ca-Pi 的主要来源,占 38%,而土壤侵蚀和施肥分别

占 Ca-Pi 增加量的 35%和 27%。

参考文献:

[1] Ronggui Wu and Tiessen H. Effect of land use on sol degradation in alpine grassland soils, China[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 1648-1655.

[2] Tiessen H. Characterization of soil phosphorus and its availability in different ecosystems[J]. Trends in Soil Science, 1991,1:83-99.

[3] Yang J E and Jacobsen J S. Soil inorganic phosphorus fractions and their uptake relationships in calcareous soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990,54:1666-1669.

[4] Chang S C and Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Sci.,1957,84:133-144.

[5] Williams J D H, Syers J K, Walker T W and Rex R W. A comparison of methods for the determination of organic phosphorus[J]. Soil Sci., 1970,110: 13-18.

[6] 蒋柏藩,顾益初.石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(3):58-66.

[7] Bowman R A and Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Sci., 1978,125: 49-54 ,95-101.

[8] Hedley M J, Stewart J W B and Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 970-976.

[9] Tiessen H, Stewart J W B and Cole C V. Pathways of phosphorous transformations in soils of differing pedogenesis[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1984,48:853-858.

[10] Cross A F and Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural systems[J]. Geoderma 1995,64: 197-214.

[11] Samadi A and Gilkes R J. Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of Southern Western Australia[J]. Soil Sci. Am. J.,1999,63:809-815.

[12] Maroko J B, Buresh R J and Smithson P C. Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1999,63:320-326.

[13] Daroub S H, Pierce F J and Ellis B G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,2000,64:170-176.

[14] Mueller-Dombois D and Ellenberg H. Aims and Methods of Vegetation Ecology[M]. New York:John Wiley & Son, 1974.

[15] Tiessen H and Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction[A]. *In* :Carter M R (ed.). Soil Sampling and Methods of Analysis[M]. Chelsea:Lewis Publishers, MI,1993, 75-86.

[16] 李酉开. 土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社, 1983.103-108.

[17] Lilienfein J, Wilcke W, Ayarza M A, Vilela L, Lima S C and Zech W. Chemical fraction of phosphorus, sulfur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use[J]. Geoderma, 2000,96: 31-46.

[18] Tiessen H, Salcedo I H and Sampaio E V S B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,1992,38: 139-151.

[19] 陈亚明,吴自立,朱兴运,胡自治. 高山禾草—嵩草型草地的磷循环[J]. 草业学报, 1995, 4(2): 75-81.

[20] Smeck N E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes[J]. Geoderma, 1985,36: 185-199.

[21] Tate K R. The biological transformation of phosphorus in soil[J]. Plant and Soil,1984,76:245-256.

[22] Paul E A and Clark F E. Soil Microbiology and Biochemistry[M]. California:Acadermic Press, 1996.