

DOI:10.11686/cyxb2018285

<http://cyxb.magtech.com.cn>

雷玮倩,胡玉福,杨泽鹏,等. 垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响. 草业学报, 2019, 28(5): 36—45.

Lei W Q, Hu Y F, Yang Z P, et al. Effects of reclamation on the soil phosphorus fractions of alpine meadow in Northwest Sichuan. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 36—45.

垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响

雷玮倩,胡玉福*,杨泽鹏,何剑锋,肖海华,舒向阳,阳帆,李正青

(四川农业大学资源学院,四川 成都 611130)

摘要:选择川西北高寒草地垦殖3和10年后的川贝母种植地为研究对象,以邻近未开垦天然草地土壤为对照,采用修正后的Hedley磷元素分级方法,探究垦殖对川西北高寒草地土壤磷组分含量变化的影响。结果表明,垦殖导致了高寒草地土壤全磷(TP)、水溶性磷($H_2O\text{-Pi}$)、活性磷($NaHCO_3\text{-P}$)、潜在活性磷($NaOH\text{-P}$)、中稳定性磷(Dil. HCl-Pi)、高稳定性磷(Conc. HCl-P)含量显著下降,残余态磷(Residual-P)显著上升。其中0~20 cm土层变化最显著,垦殖10年后,土壤TP、 $H_2O\text{-Pi}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 、 $NaOH\text{-P}$ 、Dil. HCl-Pi和Conc. HCl-P分别下降了16.48%、78.98%、57.43%、26.06%、16.38%、10.87%,而Residual-P增加了40.08%。其中 $H_2O\text{-Pi}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 和 $NaOH\text{-P}$ 含量变化显著高于其他组分的磷,说明磷的活性越高损失越明显。垦殖过程中,土壤 $H_2O\text{-Pi}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 和 $NaOH\text{-P}$ 占全磷比重显著下降,而Dil. HCl-Pi、Conc. HCl-P和Residual-P呈上升趋势。垦殖前3年,土壤全磷及各形态磷组分的年下降率显著高于垦殖3~10年,说明垦殖过程中磷的损失主要发生在垦殖前期。

关键词:川西北高寒草地;垦殖;土壤磷组分

Effects of reclamation on the soil phosphorus fractions of alpine meadow in Northwest Sichuan

LEI Wei-qian, HU Yu-fu*, YANG Ze-peng, HE Jian-feng, XIAO Hai-hua, SHU Xiang-yang, YANG Fan, LI Zheng-qing

College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Alpine grassland in northwest Sichuan, dominated by *Fritillaria cirrhosa* and subject to 3 or 10 years development, was compared with nearby uncultivated natural grassland (Control) to explore the effects of development on the soil phosphorus fractions. Soil phosphorus tests were performed using a modified Hedley method. It was found that after development the levels of total phosphorus (TP), water-soluble phosphorus ($H_2O\text{-Pi}$), active phosphorus ($NaHCO_3\text{-P}$), potentially active phosphorus ($NaOH\text{-P}$), stable phosphorus (Dil. HCl-Pi) and highly stable phosphorus (Conc. HCl-P) were significantly lower than those of Control plots, while residual phosphorus (Residual-P) levels were significantly increased. These changes were most pronounced in the 0—20 cm soil layer. After 10 years of development, the levels of TP, $H_2O\text{-Pi}$, $NaHCO_3\text{-P}$, $NaOH\text{-P}$, Dil. HCl-Pi and Conc. HCl-P decreased by 16.48%, 78.98%, 57.43%, 26.06%, 16.38%, and 10.87% respectively, while Residual-P levels increased by 40.08% ($P < 0.05$). $H_2O\text{-Pi}$, $NaHCO_3\text{-P}$ and $NaOH\text{-P}$ changed to a greater extent than the others, indicating the higher the activity, the greater the loss.

收稿日期:2018-05-07;改回日期:2018-10-08

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAC05B01, 2015BAC05B02), 国家自然基金面上项目(41771552)和四川省科技支撑计划项目(18ZDYF3210)资助。

作者简介:雷玮倩(1996-),女,四川成都人,在读硕士。E-mail: 452903023@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: huyufu@sicau.edu.cn

With increased time under development, the ratios of H₂O-Pi, NaHCO₃-P, and NaOH-P to TP significantly decreased, while the ratios of Dil. HCl-Pi, Conc. HCl-P, and Residual-P to TP increased. In the early stages of development (0—3 years), TP and various phosphorus fractions changed faster than at the later stages (3—10 years), indicating that the losses of the various phosphorus fractions mainly occurred in the early stages of development (0—3 years).

Key words: alpine meadow in northwest Sichuan; reclamation; soil phosphorus fractions

川西北高寒草地位于青藏高原东部边缘半湿润地区,是我国长江、黄河两大水系的重要水源涵养区,也是世界上最大的高原泥炭沼泽湿地^[1]。作为我国陆地生态系统的重要组成部分,川西北高寒草地系统有着不同于其他生态系统独特的生物地球化学过程^[2],在保持生态环境稳定、维护物种多样性等方面具有重要的作用^[3]。而土壤作为生态系统重要的支持者,是物质循环的源和汇。近年来,受经济利益驱动,川西北部分天然草地被开垦种植名贵中药材川贝母(*Fritillaria cirrhosa*)。草地的开垦使得天然草地长期形成的磷元素平衡状态遭到破坏,导致土壤肥力的下降。以往国内外关于草地开垦后土壤肥力变化研究多集中在碳、氮元素等方面^[4],对磷的研究甚少,这主要是由于分离有机磷和无机磷的相对困难性^[5]。但磷作为作物生长三大营养元素之一,在保证作物高质优产^[5—7]、维持草地生态系统平衡^[8]等方面的作用非常重要。土壤中存在多种化学形态的磷,不同形态磷的生物有效性不同,其循环过程也存在差异,并在系统有效磷的供应中起着不同的作用^[9],因此采用适当的磷元素分级方法研究川西北高寒草地开垦耕种后土壤磷动态的变化特征具有重要意义。

现在磷元素分级研究多采用 Guppy 等^[10]、Sui 等^[11] 和 Tiessen 等^[12] 修正后的 Hedley 土壤磷元素分级体系^[13],该方法克服了 Chang 等^[14] 关于磷元素分级法的缺陷,同时兼顾有机磷和无机磷两种形态,能够十分准确地评估土壤磷库中不同形态的磷含量及其生物有效性,是目前较为合理、颇具说服力的土壤磷元素分级方法,已被越来越多的学者采用^[15—17],并广泛应用于农田^[18]、森林^[19—20]、湿地^[21—22] 等生态系统研究。但国内采用此法对土壤磷元素进行分级的研究相对较少,且对川西北高寒草地垦殖过程中土壤不同磷元素形态含量变化特征的研究更是鲜见报道。因此本研究采用 Sui 等^[11] 修正后 Tiessen 等^[12] 1999 年发表的 Hedley 磷元素分级方法研究垦殖对川西北高寒草地土壤磷组分含量变化的影响,旨在揭示垦殖对高寒草地土壤磷元素的影响,为草地资源的保护和合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于川西北红原县瓦切乡境内,地理坐标 N 31°50'—33°22', E 101°51'—103°23'。平均海拔 3500 m,地势西北低、东北高,全县面积 8400 km²,其中草场面积为 6289 km²,占全县面积的 74.9%。草地类型以高山草甸为主,土壤类型为高山草甸土和亚高山草甸土,植物种类丰富,草质优良。年均温为 1.1 ℃,最高气温 26 ℃,最低气温 -36 ℃,冬冷夏热。年降水 650~800 mm,多集中在 5—9 月,水热同期,属大陆高原寒温带半湿润季风气候。该区域天然草地资源丰富,土地利用方式以放牧为主,主要牲畜为牦牛、藏绵羊等高原畜种。近年来,受经济利益驱动,部分天然草地先后被开垦种植名贵中药材川贝母。该区域天然草地有机质含量丰富,土壤肥力较高,在川贝母种植过程中无外源施肥、灌溉,仅靠自然肥力维持生长。

1.2 土样采集

土壤样品于 2015 年 10 月采集完成。采用以空间位置换算时间差异的方法,在走访调查当地农户和查阅瓦切乡开垦草地使用记录的基础上,以研究区境内的川贝母种植基地(E 102°36', N 32°52')为典型采样区域,分别选择垦殖 3 和 10 年的川贝母种植地作为研究对象,同时以邻近未开垦天然草地(0 年)作为对照,在每块垦殖年限种植地内随机设置 3 个 10 m×10 m 采样地,每个样地地形(坡度、坡向、海拔)、土壤、成土母质(均为河流冲积物)等立地条件基本一致(表 1)。每个样方内随机布设 5 个采样点,采用土壤剖面法,分别取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤样品,同一样方内的土壤样品挑除根系、砾石等杂物,并将 5 个采样点各土层土样混合均

匀,采用四分法取约 500 g 土样装入布袋带回实验室。采集的土壤样品经自然风干,研磨后分别过 2.0 和 0.5 mm 筛,用于测定全磷和磷组分含量。

表 1 草地样方信息记录

Table 1 Information of reclamation grassland quadrat

垦殖年限 Reclamation periods (yr)	样点编号 Sample number	经度 Latitude (E)	纬度 Longitude (N)	海拔 Altitude (m)	地面坡度 Surface slope (°)
0	I -1	102°36'40.0"	32°52'46.4"	3486	2
	I -2	102°36'40.5"	32°52'46.5"	3486	2
	I -3	102°36'39.9"	32°52'46.1"	3486	3
3	II -1	102°36'38.7"	32°52'47.7"	3501	3
	II -2	102°36'38.3"	32°52'47.3"	3501	2
	II -3	102°36'39.1"	32°52'48.0"	3501	3
10	III -1	102°36'36.1"	32°52'48.3"	3492	4
	III -2	102°36'36.8"	32°52'47.9"	3492	3
	III -3	102°36'37.2"	32°52'49.0"	3492	4

1.3 测定指标及方法

采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消煮—钼锑抗比色法测定全磷含量^[8]。采用 Sui 等^[11]修正后的 Hedley 磷元素分级方法测定土壤磷组分含量。该方法将土壤磷元素按照稳定性由弱到强分为 6 种类型:水溶性磷 H_2O-Pi ,活性磷 $NaHCO_3-P(NaHCO_3-Pi, NaHCO_3-Po)$,潜在活性磷 $NaOH-P(NaOH-Pi, NaOH-Po)$,中稳定性磷 Dil. $HCl-Pi$ 、高稳定性磷 Conc. $HCl-P(Conc. HCl-Pi, Conc. HCl-Po)$ 及残余态磷(Residual-P)。

提取的基本步骤如下:称取 0.5 g 土样于 50 mL 离心管中,逐级加入 30 mL 去离子水、0.5 mol·L⁻¹ $NaHCO_3$ (pH=8.2)、0.1 mol·L⁻¹ $NaOH$ 、1 mol·L⁻¹ 稀盐酸和浓盐酸进行提取。每次提取振荡时间为 16 h,每次提取后经离心分层取上清液后测定。最后残留土壤中加入 5 mL 浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 高温消煮后测得残余态磷含量。其中,去离子水、1 mol·L⁻¹ HCl 提取态磷用比色法直接测定; $NaOH$ 、 $NaHCO_3$ 和浓盐酸提取态磷包含有机和无机两种形态,无机磷部分采用钼蓝比色法直接测定;浸提液中加入过硫酸钾,经高压灭菌锅(120 kPa, 120 °C)消煮,测定总磷含量,通过总磷减去无机磷计算差值得到有机磷含量^[8]。

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 19.0 和 ORIGIN 9.0 对数据进行统计分析及绘图,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析各指标的差异性,采用最小显著差数法(LSD)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同垦殖年限土壤全磷含量变化

土壤全磷包括各种形态的磷元素,是评判土壤磷库总量的重要参考指标。垦殖导致不同土层土壤 TP 含量均呈现出降低的趋势(图 1)。其中,0~20 cm 土层变化最明显,与未开垦天然草地相比,垦殖

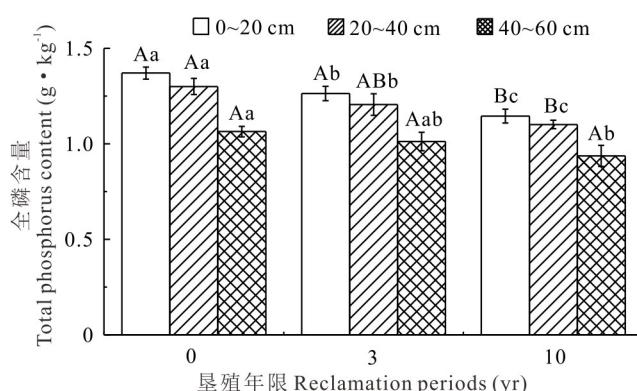


图 1 不同垦殖年限 0~60 cm 土层土壤全磷含量变化特征

Fig. 1 Changes of soil total phosphorus (TP) content of 0~60 cm soil depth from different reclamation years

不同大写字母表示同一土层不同垦殖年限在 $P < 0.01$ 水平差异显著。不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。Different capital letters mean significant difference among different treatments at the same soil layer at 0.01 level. Different small letters mean significant difference among different treatments at the same soil layer at 0.05 level. The same below.

10 年后 TP 含量极显著降低 16.49% ($P < 0.01$)。垦殖前 3 年、垦殖 3~10 年表层土壤全磷含量年减小率分别为 2.61%、1.34%，表明土壤 TP 损失主要集中在垦殖前期，随垦殖年限增加，其损失速率逐渐减缓。随土层深度增加，TP 含量随垦殖年限增加其降低幅度逐渐减小，垦殖 10 年后，20~40 cm 和 40~60 cm 土层 TP 含量较天然草地分别降低 15.31%、11.95%。

2.2 不同垦殖年限土壤磷组分含量变化特征

2.2.1 土壤 H_2O -Pi 及 $NaHCO_3$ -P 变化特征 H_2O -Pi 不仅可直接被作物吸收利用，对作物生长具有较高的有效性，同时作为一种环境形态的磷，可直接表征对环境尤其是水环境影响的程度^[23]。不同土层深度 H_2O -Pi 含量随垦殖年限增加均呈降低趋势（表 2），其中，0~20 cm 土层变化最明显，垦殖 3 和 10 年与未开垦天然草地土壤 H_2O -Pi 含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。垦殖 10 年后， H_2O -Pi 含量较未开垦天然草地降低 78.98%，垦殖前 3 年 H_2O -Pi 年减小率为 17.36%，显著高于垦殖 3~10 年 (8.02%)，表明土壤 H_2O -Pi 损失主要发生在垦殖前期，垦殖后期其损失速率有所减缓。20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤 H_2O -Pi 随垦殖年限增加均呈现出类似的变化特征，但其变化幅度和速度均低于 0~20 cm 土层。

$NaHCO_3$ -P 是由吸附于多晶磷化合物、倍半氧化物或碳酸盐表面的无机磷 ($NaHCO_3$ -Pi) 和有机磷 ($NaHCO_3$ -Po) 组成^[24]，通常被土壤颗粒吸附在土壤表面，可直接被作物吸收利用。不同土层深度 $NaHCO_3$ -P 含量随垦殖年限增加均呈降低趋势（表 2）。其中，0~20 cm 土层土壤 $NaHCO_3$ -P 含量变化最明显，垦殖 3 和 10 年与未开垦天然草地土壤差异达极显著水平 ($P < 0.01$)，垦殖 10 年后， $NaHCO_3$ -P 含量较未开垦天然草地降低了 57.43%，垦殖前 3 年 $NaHCO_3$ -P 年减小率为 11.01%，显著高于垦殖 3~10 年 (5.20%)，表明土壤 $NaHCO_3$ -P 损失主要发生在垦殖前期，垦殖后期其损失速率逐渐减缓。随土层深度增加，20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤 $NaHCO_3$ -P 随垦殖年限增加呈现出类似的变化特征，但其变化幅度和速度均低于 0~20 cm 土层。

$NaHCO_3$ -P 又分为有机、无机两部分。不同土层深度 $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 随垦殖年限增加均呈现降低趋势。其中，0~20 cm 土层变化最明显，垦殖 3 年、10 年和未开垦天然草地土壤 $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 含量均达极显著水平 ($P < 0.01$)，垦殖 10 年后， $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 较未开垦天然草地分别极显著减小 53.58%、60.93%。随土层深度增加， $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 变化趋势减弱。垦殖 10 年后，20~40 cm 土层 $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 分别减小 53.12%、60.03%，40~60 cm 土层 $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po 分别减小 39.66%、49.81%，表明可供植物利用的活性有机磷及活性无机磷含量均显著减少，且有机磷组分变动大于无机磷组分。

表 2 不同垦殖年限土壤 H_2O -Pi 及 $NaHCO_3$ -P 含量变化

Table 2 Changes of soil H_2O -Pi and $NaHCO_3$ -P content from different reclamation years ($mg \cdot kg^{-1}$)

垦殖年限 Reclamation periods (yr)	土层深度 Soil depth (cm)	水溶性磷 H_2O -Pi	活性磷 $NaHCO_3$ -P	活性无机磷 $NaHCO_3$ -Pi	活性有机磷 $NaHCO_3$ -Po
0	0~20	53.41±1.91Aa	127.17±2.98Aa	60.58±1.44Aa	66.59±1.53Aa
	20~40	44.97±1.36Aa	120.93±3.21Aa	57.96±1.05Aa	62.97±2.15Aa
	40~60	28.05±2.07Aa	87.35±3.65Aa	43.28±1.74Aa	44.08±1.91Aa
3	0~20	25.60±1.52Bb	84.16±6.09Bb	41.60±3.52Bb	42.56±2.56Bb
	20~40	22.40±2.22Bb	81.59±3.95Bb	40.11±1.21Bb	41.48±2.73Bb
	40~60	16.80±1.32Bb	67.85±6.32Bb	33.46±4.67ABb	34.39±1.64Bb
10	0~20	11.23±1.64Cc	54.14±4.86Cc	28.12±1.90Cc	26.02±2.96Cc
	20~40	10.26±1.68Cc	52.34±2.58Cc	27.17±3.95Cc	25.17±1.38Cc
	40~60	8.03±1.09Cc	48.23±6.12Cc	26.11±3.26Bc	22.12±2.87Cc

注：不同大写字母表示同一土层不同垦殖年限在 $P < 0.01$ 水平差异显著。不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Different capital letters mean significant difference among different treatments at the same soil layer at 0.01 level. Different small letters mean significant difference among different treatments at the same soil layer at 0.05 level. The same below.

2.2.2 土壤 NaOH-P 及 Dil. HCl-Pi 变化特征 NaOH-P 主要是通过化学吸附紧密结合在土壤 Fe、Al 化合物表面的无机磷(NaOH-Pi)^[23,25]和与土壤中腐殖酸结合的有机磷(NaOH-Po)^[25]两部分构成,用于磷的长期转化,对植物有一定的有效性。不同土层深度 NaOH-P 含量随垦殖年限增加均呈现出显著降低的变化特征(表 3),其中,0~20 cm 土层变化最明显,垦殖 3 和 10 年与未开垦天然草地土壤 NaOH-P 含量差异达极显著水平($P<0.01$),垦殖 10 年后,NaOH-P 含量较未开垦天然草地减少 26.06%。垦殖前 3 年,NaOH-P 含量年减小率达 4.43%,显著高于 3~10 年的 2.10%,表明 NaOH-P 损失主要发生在垦殖前期,垦殖后期其损失速率有所减缓。20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤 NaOH-P 随垦殖年限增加均呈现出类似的变化特征,但其变化幅度和速度均低于 0~20 cm 土层。

NaOH-P 又分为有机、无机两部分。不同土层深度 NaOH-Pi、NaOH-Po 随垦殖年限增加均呈现降低趋势。其中,0~20 cm 土层变化最明显,垦殖 3 年、10 年和未开垦天然草地土壤 NaOH-Pi、NaOH-Po 含量均达极显著水平($P<0.01$),垦殖 10 年后,NaOH-Pi、NaOH-Po 较未开垦天然草地分别下降 18.57%、31.07%。随土层深度增加,NaOH-Pi、NaOH-Po 变化趋势减弱,垦殖 10 年后,20~40 cm 土层 NaOH-Pi、NaOH-Po 分别减小 14.82%、29.31%,40~60 cm 土层 NaOH-Pi、NaOH-Po 分别减小 10.70%、23.23%,表明可供植物利用的活性有机磷及活性无机磷含量均显著减少,且有机磷组分变化大于无机磷组分。

Dil. HCl-Pi 是与 Ca 结合的中稳定性无机磷。不同土层深度 Dil. HCl-Pi 含量随垦殖年限增加均呈现出降低的变化特征(表 3),其中,0~20 cm 土层变化最明显,垦殖 3 和 10 年与未开垦天然草地 Dil. HCl-Pi 含量差异均达到极显著水平($P<0.01$),垦殖 10 年后,Dil. HCl-Pi 含量较未开垦天然草地下降 16.38%,垦殖前 3 年 Dil. HCl-Pi 年下降率为 2.78%,显著高于 3~10 年(1.25%),表明 Dil. HCl-Pi 损失主要发生在垦殖前期,而在垦殖后期损失速率有所减缓。随土层深度增加,垦殖导致 Dil. HCl-Pi 含量变化的趋势减弱,垦殖 10 年后,20~40 cm、40~60 cm 土层 Dil. HCl-Pi 含量较未开垦天然草地分别减小 13.16%、10.42%($P<0.01$)。

表 3 不同垦殖年限土壤 NaOH-P 和 Dil. HCl-Pi 含量变化

Table 3 Changes of soil NaOH-P and Dil. HCl-Pi content from different reclamation years ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

垦殖年限 Reclamation periods (yr)	土层深度 Soil depth (cm)	潜在活性磷 NaOH-P	潜在活性无机磷 NaOH-Pi	潜在活性有机磷 NaOH-Po	中稳定性磷 Dil. HCl-Pi
0	0~20	475.34±5.47Aa	190.50±3.18Aa	284.84±2.28Aa	271.67±1.45Aa
	20~40	447.92±3.51Aa	176.94±2.18Aa	270.98±1.33Aa	251.63±1.49Aa
	40~60	396.39±5.72Aa	165.30±2.83Aa	231.09±2.89Aa	215.99±3.13Aa
3	0~20	412.15±4.52Bb	176.09±1.69Bb	236.06±2.83Bb	248.98±3.00Ab
	20~40	393.83±4.39Bb	166.12±2.09Bb	227.71±2.30Bb	239.18±2.81Bb
	40~60	361.54±5.23Bb	160.30±1.83Ab	201.25±3.43Bb	208.91±1.17Bb
10	0~20	351.47±5.78Cc	155.12±3.00Cc	196.35±2.78Cc	227.18±2.91Bc
	20~40	342.29±5.82Cc	150.73±3.40Cc	191.56±2.42Cc	219.50±1.58Cc
	40~60	325.02±4.07Cc	147.60±1.41Bc	177.42±2.66Cc	193.48±2.33Cc

2.2.3 土壤 Conc. HCl-P 及 Residual-P 变化特征 不同土层深度 Conc. HCl-P 含量随垦殖年限增加总体呈降低的变化特征(表 4),其中,0~20 cm 土层变化最明显,垦殖 3 年、10 年和未开垦天然草地 Conc. HCl-P 含量差异达显著水平($P<0.05$),垦殖 10 年后,Conc. HCl-P 含量较未开垦天然草地降低 10.87%($P<0.01$)。垦殖前 3 年 Conc. HCl-P 年减小率为 1.33%,略高于垦殖 3~10 年(1.02%),表明土壤 Conc. HCl-P 损失主要发生在垦殖前期,垦殖后期其损失速率逐渐减缓。20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤 Conc. HCl-P 随垦殖年限增加均呈现出类似的变化特征,但其变化幅度低于 0~20 cm 土层。

Conc. HCl-P 也可分为有机、无机两部分。不同土层深度 Conc. HCl-Pi、Conc. HCl-Po 含量随垦殖年限增加总体呈降低的变化特征,其中,0~20 cm 土层变化最明显,垦殖 10 年后,Conc. HCl-Pi、Conc. HCl-Po 较未开垦天然草地分别减小 8.18%、12.47% ($P < 0.01$),有机磷组分变化大于无机磷组分。随着土层深度增加,Conc. HCl-Pi、Conc. HCl-Po 变化趋势与 0~20 cm 土层类似,但其变化幅度总体呈减小趋势,20~40 cm 土层 Conc. HCl-Pi 较未开垦天然草地下降 8.20% ($P < 0.01$),20~40 cm、40~60 cm 土层 Conc. HCl-Po 则分别下降 11.65%、8.56% ($P < 0.01$)。

残余态磷(Residual-P)是土壤中最稳定的磷元素形态,要经过浓 H_2SO_4 消化土壤(破坏土壤晶格结构)浸提剩余在土壤中的闭蓄态磷^[26],包括其他矿物质中的 Ca-P 和不能提取的 Po 混合物^[4]。不同土层深度 Residual-P 含量随垦殖年限增加总体呈增加的变化特征。其中 0~20 cm 土层最明显,垦殖 3 年、10 年和未开垦天然草地 Residual-P 含量差异均达极显著水平($P < 0.01$)。与天然草地相比,垦殖 10 年后 0~20 cm 土层土壤 Residual-P 含量上升 40.08%。20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤 Residual-P 随垦殖年限增加均呈现出类似的变化特征,但增幅均小于 0~20 cm 土层。

表 4 不同垦殖年限土壤 Conc. HCl-P 及 Residual-P 含量变化

Table 4 Changes of soil Conc. HCl-P and Residual-P content from different reclamation years ($mg \cdot kg^{-1}$)

垦殖年限 Reclamation periods (yr)	土层深度 Soil depth(cm)	高稳定性磷 Conc. HCl-P	高稳定性无机磷 Conc. HCl-Pi	高稳定性有机磷 Conc. HCl-Po	残余态磷 Residual-P
0	0~20	242.75±6.09Aa	90.50±2.37Aa	152.25±3.72Aa	200.34±3.78Cc
	20~40	238.55±4.79Aa	88.94±1.23Aa	149.61±3.66Aa	196.32±3.69Cc
	40~60	162.46±5.70Aa	47.29±2.79Aa	115.17±2.91Aa	173.67±2.19Cc
3	0~20	233.09±4.93Aa	87.51±2.55ABab	145.58±2.38Ab	259.45±1.76Bb
	20~40	230.03±4.16Aa	86.12±2.17ABab	143.91±2.00Aa	238.64±2.32Bb
	40~60	157.17±5.90Ab	45.91±2.06Aa	111.26±3.84ABa	199.54±2.43Bb
10	0~20	216.37±4.71Bb	83.10±2.11Bb	133.27±2.59Bc	280.64±6.33Aa
	20~40	213.82±5.12Bb	81.64±2.22Bc	132.18±2.89Bb	257.53±3.34Aa
	40~60	149.31±2.84Ab	34.99±1.10Aa	105.32±1.74Bb	212.67±3.29Aa

2.3 不同垦殖年限土壤磷组分相对含量变化

土壤中各形态磷组分含量及比例各不相同,各形态磷组分对土壤中全磷和速效磷的贡献能力也不相同,因此了解不同垦殖年限各形态磷组分相对含量变化是十分必要的(图 2)。该区域土壤 0~60 cm 土层 NaOH-P 占全磷总量的 30.80%~37.26%,在土壤中的比例最高。从相对含量变化上来看,随垦殖年限增加,不同土层 H_2O -Pi、 $NaHCO_3$ -P、NaOH-P 占全磷比例显著下降,而 Dil. HCl-Pi、Conc. HCl-P、Residual-P 总体呈上升的趋势。

3 讨论

本研究结果表明,垦殖导致土壤全磷含量显著下降,这和林诚等^[27]研究结果一致。这是由于在天然高寒草甸生态系统中,土壤中的磷含量没有人为方式的补给输入,仅依靠大气沉降且该区域大气磷沉降贡献

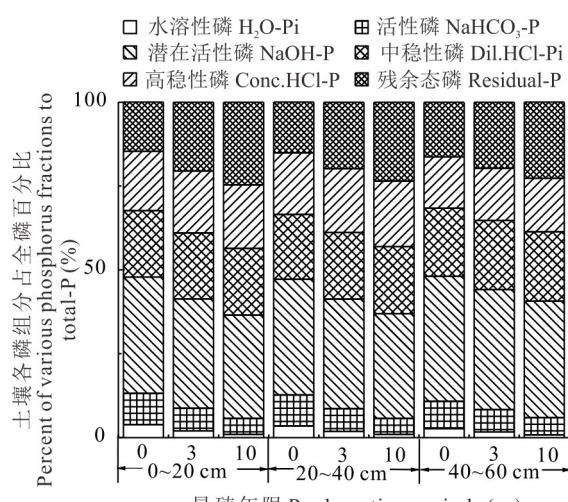


图 2 不同垦殖年限土壤磷组分相对含量变化

Fig. 2 Percent of various phosphorus fractions to total-P from different reclamation years

微弱^[28],土壤磷含量主要由成土母质中的磷含量决定^[29]。草地开垦后,土壤磷元素经矿化作用转化为有效磷,被作物直接吸收利用;同时连续的收割也从土壤中带出较多养分^[30],造成了磷元素含量的损失与减少,加之该区域为典型的高寒草地生态系统,冷热交替,日均温差大,水蚀、风蚀、冻融等综合作用影响剧烈,导致全磷含量显著下降^[31]。垦殖导致土壤有机磷、无机磷组分呈现显著降低的趋势,且有机磷含量降低较无机磷更为显著,这是由于土壤有机磷主要来自于动植物残体及其分泌物^[32],其含量多少取决于土壤中有机质数量以及有机质分解速率^[33]。土壤有机磷含量与有机质呈正相关关系,随着天然草地开垦,富含有机质的土壤受到侵蚀^[35],作物有机物质,尤其是作物根系大量死亡并集中分布在土壤表层^[36],土壤有机质分解速度加快,土壤有机磷含量降低^[5,34];且垦殖过程中的翻耕作用破坏了土壤团粒结构,改善了通气环境,微生物活性提高,加之作物的栽培,加速有机磷的矿化作用,从而导致了土壤有机磷组分变动大于无机磷组分。

随垦殖年限的增加,土壤水溶性磷($H_2O\text{-Pi}$)、活性磷($NaHCO_3\text{-P}$)、潜在活性磷($NaOH\text{-P}$)、中稳定性磷(Dil. $HCl\text{-Pi}$)、高稳定性磷(Conc. $HCl\text{-P}$)等各形态磷组分含量均有不同程度的下降,且下降幅度呈现出 $H_2O\text{-Pi} > NaHCO_3\text{-P} > NaOH\text{-P} > Dil. HCl\text{-Pi} > Conc. HCl\text{-P}$ 的特征。垦殖 10 年间, $H_2O\text{-Pi}$ 及 $NaHCO_3\text{-P}$ 含量受垦殖影响最大,这主要是由于 $H_2O\text{-Pi}$ 和 $NaHCO_3\text{-P}$ 是作物吸收最有效的磷源,在土壤磷元素中最易受到各种因素影响^[15],能被作物和微生物直接利用或转化^[23],故随着垦殖年限增加, $H_2O\text{-Pi}$ 及 $NaHCO_3\text{-P}$ 含量损失最大。贾莉洁等^[37]和苗淑杰等^[38]研究表明,O-P 和 Al-P 也是作物生长的潜在磷源, $NaOH\text{-P}$ 作为紧密结合在土壤 Fe、Al 化合物表面的无机磷和土壤中腐殖酸结合的有机磷两部分构成的潜在活性磷,随着垦殖年限增加其绝对含量也显著降低,这是由于 $NaOH\text{-P}$ 在无外源磷元素补充、其他活性较高的磷元素形态不能满足作物生长需求的情况下能被活化、为作物吸收利用,对土壤活性磷库具有补充作用,在土壤供磷中起着重要的缓冲作用^[24],故随垦殖年限增加其含量也显著降低。而土壤稳定性磷元素(Dil. $HCl\text{-Pi}$ 、Conc. $HCl\text{-P}$)随垦殖年限增加其含量也有所减少,这是由于在土壤中的活性及潜在活性磷元素被作物耗竭的情况下,促进了稳定性磷元素的释放,这在一定程度上对于补给作物可利用的磷源起到了一定的作用^[39]。而垦殖 10 年后,土壤 Residual-P 含量极显著上升,可能是由于作物利用有效磷的同时,还会引起 Residual-P 的固定^[40]。

从土壤剖面来看,0~20 cm 表层土壤受垦殖影响最明显,这主要是表层土壤受环境和植物同化产物影响而最易发生变化,且垦殖过程中的翻耕作用对表层土壤结构及性能的影响较底层土壤(20~40 cm、40~60 cm)更为显著。表层土壤有机质丰富、通气状况好,微生物活性强^[41],土壤中强烈的微生物活动促进了养分之间的转化,且草地凋落物的归还以及根系分泌物促进了对磷的活化^[42],故 0~20 cm 土层土壤受垦殖影响更为显著。

从相对数量来看, $NaOH\text{-P}$ 占全磷总量的 30.80%~37.26%,在土壤中的比例最高,表明该区域土壤潜在、可供转化的磷元素较多,是土壤磷最主要的储存库,这与杨小燕等^[43]关于典型黑土区土壤磷元素形态及有效性研究结果一致。从相对含量变化上来看,随垦殖年限增加,不同土层 $H_2O\text{-Pi}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 、 $NaOH\text{-P}$ 占全磷比例显著下降,而 Dil. $HCl\text{-Pi}$ 、Conc. $HCl\text{-P}$ 、Residual-P 呈不显著上升趋势。有研究表明,各磷组分之间可相互转化,作物有效磷源的多少取决于各磷组分之间的含量及转化方向^[29]。本研究中, $H_2O\text{-Pi}$ 、 $NaHCO_3\text{-P}$ 、 $NaOH\text{-P}$ 为作物吸收最有效和潜在可供转化的磷源,受垦殖的影响直接被作物吸收利用导致其相对含量显著下降。滕泽琴等^[44]研究发现,作物对磷元素的利用刺激稳定性磷元素向活性磷元素转化,而本研究中,随垦殖年限增加稳定性磷元素(Dil. $HCl\text{-Pi}$ 、Conc. $HCl\text{-P}$)及 Residual-P 绝对含量有所下降,而相对含量呈不显著上升趋势,稳定性磷元素有积累的趋势,这可能是由于土壤中磷矿化和微生物分解形成较多次生磷矿物,表明随垦殖年限增加潜在的土壤肥力也有所降低。这与吴荣贵等^[5]和王瑞等^[45]研究结果一致。

此外,研究还发现,垦殖对土壤全磷及各形态磷元素影响主要集中在前期(垦殖前 3 年),这是由于垦殖初期的人为耕作破坏了天然高寒草地草毡表层,土壤环境发生剧烈变化,长年积累的土壤养分矿化分解速度加快^[46],导致了土壤磷元素,尤其是受环境表征影响较大的 $H_2O\text{-P}$ 和 $NaHCO_3\text{-P}$ 含量的大幅降低;另一方面,作物生长吸收养分速度大于其补充速度^[47],使得土壤磷元素含量在垦殖初期大幅度降低。随垦殖年限的增加,土壤全磷及各形态磷组分减少率逐步降低。

综上所述,土壤磷元素水平的变化与垦殖年限有着密切关系,在无外部磷源补充的情况下,草地的开垦在一定时间范围内导致土壤磷元素含量下降的趋势是不可避免的,在未来一定时期内可通过扩大土壤磷库,提高土壤磷元素供应能力,适当增加磷肥的投入来维持土壤磷元素供应能力,有效提高磷肥利用率及磷元素有效性等措施防止这种趋势的延续。同时,从维持生态平衡的角度出发,慎重对待草地开垦行为,保护好现有天然草地资源,采取科学合理的农业管理及生物保护措施,对于生态系统持续稳定发展有着重大意义^[48]。

参考文献 References:

- [1] Jiang S L, Hu Y F, Pu Q, et al. Changes in soil nitrogen characteristics during grassland desertification in Northwest Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4644—4653.
蒋双龙, 胡玉福, 蒲琴, 等. 川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征. 生态学报, 2016, 36(15): 4644—4653.
- [2] Qin Y, Yi S H, Li N J, et al. Advance in studies of carbon cycling on alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 275—285.
秦彧, 宜树华, 李乃杰, 等. 青藏高原草地生态系统碳循环研究进展. 草业学报, 2012, 21(6): 275—285.
- [3] Zhou Z, Meng J J, Qi Y, et al. Importance of ecological lands and their pattern optimization in China: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(1): 218—225.
周朕, 蒙吉军, 齐杨, 等. 中国生态用地重要性及其格局优化研究进展. 生态学杂志, 2016, 35(1): 218—225.
- [4] Yan Z Q, Qi Y C, Dong Y S, et al. Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 279—292.
闫钟清, 齐玉春, 董云社, 等. 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制. 草业学报, 2014, 23(6): 279—292.
- [5] Wu R G, Lin B, Tiessen H. Study on the dynamic of soil phosphorus in the transitional areas of grasslands and crop fields. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 131—138.
吴荣贵, 林葆, Tiessen H. 农牧交错带土壤磷素动态研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 131—138.
- [6] Liu D P, Yang S Q, Shi H B, et al. Crop yield and water-fertilizer utilization efficiency under combined application of nitrogen and phosphorous. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 902—909.
刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 氮磷配施条件下作物产量及水肥利用效率. 生态学杂志, 2014, 33(4): 902—909.
- [7] Sun G F, Jin J Y, Shi Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (2): 1—9.
孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 1—9.
- [8] Lin L, Li Y K, Zhang F W, et al. Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humulis* meadows in the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5245—5251.
林丽, 李以康, 张法伟, 等. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2013, 33(17): 5245—5251.
- [9] Qu F Z, Yu J B, Chen X B, et al. A review on soil phosphorus fractionation scheme on wetlands. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 243—248.
屈凡柱, 于君宝, 陈小兵, 等. 湿地土壤磷分级方法研究. 土壤通报, 2012, 43(1): 243—248.
- [10] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, et al. A simplified sequential phosphorus fractionation method. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2000, 31(11/12/13/14): 1981—1991.
- [11] Sui Y S, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1174—1180.
- [12] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction// Carter M R. *Soil sampling and methods of analysis*. Chelsea: Lew is Publishers, 1993: 75—86.
- [13] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 970—976.
- [14] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 1957, 84: 133—144.
- [15] Cross A F, Schlesinger W H. A literature-review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 1995, 64(3/4): 197—214.
- [16] Zhang J L, Chen A G. Phosphorus fractions and availability of tropical soil in rubber plantation. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(4): 284—286.
张教林, 陈爱国. 热带胶园土壤磷素形态和生物有效性. 土壤与环境, 1999, 8(4): 284—286.
- [17] Zhang J L, Chen A G, Liu Z Q. Phosphorus fractions and availability in rubber plantation with different tillage time. *Soils*,

- 2000, 32(6): 319—322.
- 张教林, 陈爱国, 刘志秋. 定植 3, 13, 34 年热带胶园的土壤磷素形态变化和有效性研究. 土壤, 2000, 32(6): 319—322.
- [18] Lan Z M, Lin X J, Wang F, et al. Phosphorus availability and rice grain yield in a paddy soil in response to long-term fertilization. *Biology & Fertility of Soils*, 2012, 48(5): 579—588.
- [19] Johnson A H, Frizano J, Vann D R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 2003, 135(4): 487—499.
- [20] Richter D D, Raikes J. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: Major restructuring of soil P fractions over four decades in an aggrading forest. *Oecologia*, 2006, 150(2): 259—271.
- [21] Qin S J, Liu J S, Wang G P, et al. Tillage effects on phosphorus fractions of freshwater wetlands. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2008, 34(3): 315—321.
- 秦胜金, 刘景双, 王国平, 等. 沼泽湿地开垦对土壤磷形态的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(3): 315—321.
- [22] Linquist B A, Ruark M D, Hill J E. Soil order and management practices control soil phosphorus fractions in managed wetland ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90(1): 51—62.
- [23] Xie Y H, Hong J P, Han X, et al. Study on soil bioavailability of the Hedley P forms in calcareous soil with different phosphorus level. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 141—144.
- 谢英荷, 洪坚平, 韩旭, 等. 不同磷水平石灰性土壤 Hedley 磷形态生物有效性的研究. 水土保持学报, 2010, 24(6): 141—144.
- [24] Yang X Y, Chen X W. Vertical distribution of soil phosphorus fractionation in uncultivated black soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2): 378—383.
- 杨小燕, 陈祥伟. 未开垦干扰黑土土壤磷素形态垂直分布特征. 土壤通报, 2016, 47(2): 378—383.
- [25] Tiessen H, Stewart J W B, Bettany J R. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon nitrogen and phosphorus in the grassland soil. *Agronomy Journal*, 1982, 74(5): 831—835.
- [26] Zhang Q C, Wang G H, Feng Y K. Research on soil phosphorus dynamic change under rice fertilization experiments. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2007, 33(1): 82—88.
- 张奇春, 王光火, 冯玉科. 水稻肥料定位试验中土壤各形态磷的变化动态研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(1): 82—88.
- [27] Lin C, Wang F, He C M, et al. Effects of long term fertilization on phosphorus pools and forms yellow paddy fields of southern China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 541—549.
- 林诚, 王飞, 何春梅, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 541—549.
- [28] Wei Z B, Bai Z H, Ma L, et al. Spatial characteristics of nitrogen and phosphorus flow in natural grassland of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 523—534.
- 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国天然草地氮磷流动空间特征. 中国农业科学, 2018, 51(3): 523—534.
- [29] Liu Q, Zheng X, Deng B L, et al. Effect of altitude on the phosphorus contents of soil and plant litter deposits in a Wugong Mountain meadow. *Pratacultural Science*, 2017, 34(11): 2183—2190.
- 刘倩, 郑翔, 邓邦良, 等. 武功山草甸不同海拔对土壤和植物凋落物磷含量的影响. 草业科学, 2017, 34(11): 2183—2190.
- [30] Li J C, Wang W L, Hu G Y, et al. Changes in ecosystem service values in Zoige Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 766—770.
- [31] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. The variation characteristics of soil organic carbon of typical alpine slope grasslands and its influencing factors in the “Three-River Headwaters” region. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2072—2087.
- 孙文义, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源典型高寒草地坡面土壤有机碳变化特征及其影响因素. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2072—2087.
- [32] Tang X L, Fan S H. Advances in phosphorus availability of soil //Zheng H. Advance of research on soil active organic carbon-The 9th annual Chinese forestry youth academic annual conference abstracts. Chengdu: Chinese Society of Forestry Press, 2010: 1—7.
- 唐晓鹿, 范少辉. 土壤磷有效性研究进展//郑红. 土壤活性有机碳的研究进展—第九届中国林业青年学术年会论文摘要集. 成都: 中国林学会出版社, 2010: 1—7.
- [33] Zhao S H, Yu W T, Zhang L, et al. Research advance in soil organic phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2189—2194.
- 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189—2194.
- [34] Gu S Y, Wang N J, Chen Y, et al. Changes of phosphorus contents and forms in black soils from different cultivation years.

- Soils, 2014, 46(4): 662—668.
- 谷思玉, 王宁娟, 陈渊, 等. 不同开垦年限农田黑土磷素形态及数量变化. 土壤, 2014, 46(4): 662—668.
- [35] Guo Y J, Ni Y, Han J G, et al. Effects of steppe cultivation and alfalfa plantation on the availability of soil phosphorus. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 88—92.
- 郭彦军, 倪郁, 韩建国, 等. 开垦草原与种植紫花苜蓿对土壤磷素有效性的影响. 水土保持学报, 2009, 23(1): 88—92.
- [36] Li D. Modelling dynamics of soil organic carbon in alpine meadow by using century model. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- 李东. 基于 CENTURY 模型的高寒草甸土壤有机碳动态模拟研究. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [37] Jia L J, Li Y H, Sun B H, et al. Effect of diverse soil managements on inorganic phosphorus and its fractions in a loess soil from a long-term experiment. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(3): 612—616.
- 贾莉洁, 李玉会, 孙本华, 等. 不同管理方式对土壤无机磷及其组分的影响. 土壤通报, 2013, 44(3): 612—616.
- [38] Miao S J, Han X Z, Qiao Y F, et al. Effects of crop species on phosphorus forms and utilization in black soil. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(1): 105—109.
- 苗淑杰, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同作物对黑土中磷素形态及有效性的影响. 土壤通报, 2009, 40(1): 105—109.
- [39] Zhu J Y, Han X R, Yang J F, et al. Effect of 30 years' crop rotated fertilization on the temporal variation of phosphorus pool in brown earth. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 891—895.
- 朱佳颖, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 30 年轮作施肥对棕壤磷库时间变异特征的影响. 土壤通报, 2011, 42(4): 891—895.
- [40] Xin N Q, Wang L X. The Study on dryland agriculture in north China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998.
- 信乃诠, 王立祥. 中国北方干旱区农业. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998.
- [41] Pu Q, Hu Y F, He J F, et al. Effect of vegetation restoration pattern on the soil microbial biomass and enzyme activity in desertification grassland of northwest Sichuan. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 323—328.
- 蒲琴, 胡玉福, 何剑锋, 等. 植被恢复模式对川西北沙化草地土壤微生物量及酶活性研究. 水土保持学报, 2016, 30(4): 323—328.
- [42] Zhao Q, Zeng D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its factors. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(1): 153—163.
- 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153—163.
- [43] Yang X Y, Fan R Y, Wang E H, et al. Topsoil phosphorus forms and availability of different soil and water conservation plantations in typical black soil region Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1555—1560.
- 杨小燕, 范瑞英, 王恩姐, 等. 典型黑土区不同水土保持林表层土壤磷素形态及有效性. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1555—1560.
- [44] Teng Z Q, Li X D, Han H G, et al. Effects of land use patterns on soil phosphorus fractions in the Longzhong part of the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(2): 30—37.
- 滕泽琴, 李旭东, 韩会阁, 等. 土地利用方式对陇中黄土高原土壤磷组分的影响. 草业学报, 2013, 22(2): 30—37.
- [45] Wang R, Li X Z, Zhou Z Y, et al. Soil phosphorus fractions with different reclamation periods in the Tibet Autonomous Region, China. Pratacultural Science, 2010, 27(11): 13—20.
- 王瑞, 李晓忠, 周志宇, 等. 西藏不同年限耕地土壤磷素分级研究. 草业科学, 2010, 27(11): 13—20.
- [46] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. Science, 2005, 309: 570—574.
- [47] Liu P, Li Y, Jiang L H, et al. Effects of fertilizer application on greenhouse vegetable yield: A case study of Shouguang City. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1752—1758.
- 刘萍, 李彦, 江丽华, 等. 施肥对蔬菜产量的影响: 以寿光市设施蔬菜为例. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1752—1758.
- [48] Jiao Y, Zhao J H, Xu Z. Effects of a conversion from grassland to cropland on soil physical-chemical properties in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia: Analysis of a 50-year chronosequence. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1965—1970.
- 焦燕, 赵江红, 徐柱. 农牧交错带开垦年限对土壤理化特性的影响. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1965—1970.