

DOI: 10.11766/trxb201607220250

# 陇中黄土高原不同耕作措施下土壤磷动态研究\*

许艳 张仁陟†

(甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070)

**摘要** 依托陇中黄土高原旱作农田已实施 13 a 的保护性耕作试验, 研究传统耕作、免耕、传统耕作秸秆还田、免耕秸秆覆盖、传统耕作地膜覆盖和免耕地膜覆盖 6 种耕作措施下土壤全磷及磷组分动态变化特征。结果表明: 试验期各处理土壤全磷和总无机磷均逐年增长; 两个秸秆还田处理总有机磷逐年增长, 免耕地膜覆盖和免耕处理总体增长, 传统耕作和传统耕作地膜覆盖处理相对稳定; 各无机磷组分均总体增长, 其中氢氧化钠提取态无机磷、水溶态无机磷和碳酸氢钠提取态无机磷涨幅较大, 平均涨幅分别为 253.6%、128.6% 和 66.9%; 保护性耕作可不同程度地提高水溶态无机磷、碳酸氢钠提取态无机磷和氢氧化钠提取态无机磷含量, 相同覆盖条件下免耕较传统耕作效果明显, 尤其免耕秸秆覆盖处理最明显; 耕作方式对浓盐酸提取态无机磷和残留磷的影响不明显; 保护性耕作可提高碳酸氢钠提取态有机磷和氢氧化钠提取态有机磷含量, 两个秸秆还田处理最明显, 两处理也可提高浓盐酸提取态有机磷含量, 但免耕、传统耕作地膜覆盖和免耕地膜覆盖处理下该组分含量降低。综上, 采取保护性耕作可适当减少磷肥用量, 保护性耕作尤其是免耕秸秆覆盖方式值得在该区推广。

**关键词** 陇中黄土高原; 耕作措施; 土壤全磷; 土壤磷组分

**中图分类号** S343.1; S157.4<sup>+</sup>2 **文献标识码** A

磷是作物生长发育必需的营养元素, 它来源于土壤, 土壤中磷的丰缺程度对作物的生长发育有重大影响<sup>[1]</sup>。磷在土壤中存在多种形态, 不同形态对作物的有效性不同, 但它们很难直接测定, 人们通常采用一定的分组方法了解土壤供磷状况, Tiessen 和 Moir<sup>[2]</sup> 改进的 Hedley 法是目前公认的比较全面合理的磷素分组方法。

陇中黄土高原地处中国内陆, 气候干旱少雨, 植被稀疏, 生态环境脆弱。该区土壤类型以黄绵土为主, 土层深厚, 质地疏松绵软, 极易受侵蚀, 土壤养分含量低, 普遍缺磷, 是我国大量施用磷肥的区域之一<sup>[3]</sup>。但由于磷肥施入土壤后很快会发生形态转化, 使其可利用率降低, 大量残留在土壤中。加之该区耕作方式常年以传统耕作为主, 频

繁扰动土壤, 使土层更加疏松, 加剧了土壤侵蚀和水土流失, 增加了土壤磷引起的环境污染风险。因此, 如何通过改善农田管理措施, 减少土壤养分流失, 提高磷肥利用效率和土壤磷素有效性, 是该区亟待解决的农业问题。近年来, 已有学者研究证实黄土高原地区实施保护性耕作可以提高土壤全磷和有效磷含量<sup>[4-5]</sup>, 但目前缺乏长期定位试验的磷组分动态变化的报道, 因此, 本文依托陇中黄土高原旱作农田连续 13 a 的保护性耕作试验, 采用 Tiessen 和 Moir<sup>[2]</sup> 的土壤磷分组方法, 系统研究黄绵土全磷和磷组分对不同耕作措施的响应动态, 以期揭示不同耕作措施对土壤磷素的影响机制, 旨在为该区改革原有耕作方式, 建立新型的、可持续发展的耕作模式提供理论依据。

\* 国家自然科学基金项目 (31160269, 31571594) 和国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B03) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31160269 and 31571594) and the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B03)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangrz@gsau.edu.cn

作者简介: 许艳 (1980—), 女, 甘肃文县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土地生态和耕地保护研究。E-mail: xuy@gsau.edu.cn

收稿日期: 2016-07-22; 收到修改稿日期: 2016-12-15; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-01-06

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验设在黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市安定区李家堡镇麻子川村。该区平均海拔 2 000 m, 年均太阳辐射 594.7 kJ cm<sup>-2</sup>, 日照时数 2 476.6 h, 年均气温 6.4℃, ≥0℃年积温 2 933.5℃,

≥10℃年积温 2 239.1℃, 无霜期 140 d, 多年平均降水量 390.9 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 干燥度 2.53, 80%保证率的降水量为 365 mm, 变异系数为 24.3%。农田土壤为典型的钙积正常干旱土。试验期各年降水量见图 1。

### 1.2 试验设计

试验始于 2001 年 8 月, 采取春小麦—豌豆、豌豆—春小麦双序列年间轮作方式, 采用单因素随机

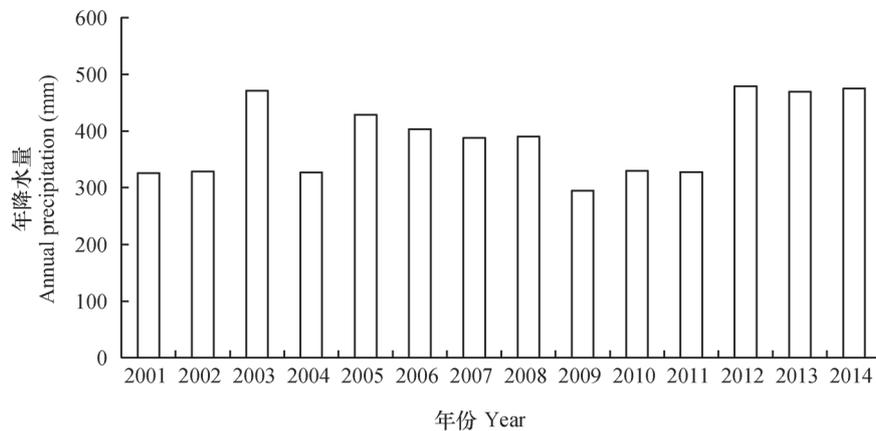


图1 试验区2001—2014年降水量

Fig. 1 Annual rainfall in the experimental area during the period of 2001—2014

区组设计, 共设6个处理, 包括传统耕作和5种保护性耕作方式, 3次重复, 小区大小 20 m × 4 m。具体处理如下: (1) 传统耕作 (T): 试验地前茬作物收获后 3 耕 2 耨, 8 月份收获后即进行第 1 次耕作, 8 月底和 9 月分别进行第 2、3 次耕作, 耕深依次为 20、10、5 cm, 第 3 次耕完耨 1 次, 土壤冻结后再耨 1 次。(2) 免耕 (NT): 全年免耕不覆盖。(3) 传统耕作秸秆还田 (TS): 耕作方式同 T, 但第 1 次耕作时将前茬作物收获的所有秸秆脱粒切碎后翻入原小区。(4) 免耕秸秆覆盖 (NTS): 全年免耕, 前茬作物收获的所有秸秆脱粒切碎后立即覆盖于原小区。(5) 传统耕作地膜覆盖 (TP): 试验地耕耨同 T, 10 月份最后 1 次耨后覆盖塑料薄膜。膜宽 40 cm, 膜两侧种作物, 因此该处理作物宽窄行种植, 宽行 40 cm, 窄行 10 cm, 平均 25 cm。(6) 免耕地膜覆盖 (NTP): 全年免耕, 覆膜方式同 TP。为避免前茬秸秆挂破薄膜, 收获后剪平或耨平残茬。

供试作物豌豆品种选用“绿农 1 号”, 于每年 4 月上旬播种, 播量 180.0 kg hm<sup>-2</sup>, 行距 24 cm, 每

公顷施纯 N 20 kg (尿素, 46% N), 纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg (过磷酸钙, 14% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 春小麦品种选用“定西 35 号”, 于每年 3 月中旬播种, 播量 187.5 kg hm<sup>-2</sup>, 行距 20 cm, 施肥种类和施肥量同豌豆种植期。所有肥料均作基肥在播种时一次施入。各处理均使用中国农业大学研制的免耕播种机播种, 豌豆和小麦分别于每年 7 月、8 月中旬收获。

### 1.3 土样采集与保存

每年豌豆和小麦收获后随即采用 S 形 5 点采样法, 分别采集各小区 0~30 cm 土层土样, 混匀后去除根系和石子, 带回实验室, 自然风干后研磨、过筛, 常温下保存于密封袋中。本研究取 2001 年实验前、2005 年、2008 年、2011 年和 2014 年豌豆地土样供磷组分测定和分析。

### 1.4 测定方法

磷素分级采用 Tiessen 和 Moir<sup>[2]</sup> 改进的 Hedley 法, 共用 6 种浸提液按由弱到强的顺序提取 9 种组分: 去离子水提取并用阴离子交换树脂膜吸附的水溶态无机磷 (Resin-Pi)、碳酸氢钠提取态无机磷 (NaHCO<sub>3</sub>-Pi) 和有机磷 (NaHCO<sub>3</sub>-Po)、氢氧化

钠提取态无机磷 (NaOH-Pi) 和有机磷 (NaOH-Po)、稀盐酸提取态无机磷 (D.HCl-Pi)、浓盐酸提取态无机磷 (C.HCl-Pi) 和有机磷 (C.HCl-Po) 以及残留磷 (Residual-P)。该法省去了土壤中微生物生物量磷, 更适用于长期保存土样磷组分的测定。土壤全磷为各组分含量之和。植株有机磷测定采用差减法, 其中全磷采用浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮-钼锑抗比色法测定, 无机磷测定采用钼锑抗比色法。

### 1.5 数据处理

利用Excel 2010软件进行数据计算和图表绘制, 利用SPSS 18.0软件进行方差分析, 采用单因素方差分析 (ANOVA)  $p < 0.05$  对数据进行显著性检验。

## 2 结果

### 2.1 不同耕作方式下土壤全磷动态变化

从表1可以看出, 试验期各处理土壤全磷含量年际间差异显著, 均呈逐年上升趋势, 涨幅在8.1%~15.6%, 涨幅顺序为NTS > TS > NTP ≈ NT ≈ T ≈ TP; NTS、TS和NTP处理均自2005年起显著高于T处理, TP处理2008年起显著高于T处理, NT处理各年与T处理差异不显著; 方差分析表明, 2005年处理间全磷含量差异达显著水平 ( $p=0.019$ ), 2008年、2011年和2014年差异达极显著水平 ( $p=0.000$ )。各处理总无机磷含量年际

表1 各处理土壤全磷、总无机磷和总有机磷动态变化

**Table 1** Dynamic changes of total phosphorus, inorganic phosphorus, and organic phosphorus relative to treatment ( $mg\ kg^{-1}$ )

类型 Type	处理 Treatment	年份Year				
		2001	2005	2008	2011	2014
全磷 Total P	T	797.8 ± 2.6aε	809.8 ± 1.5cδ	828.2 ± 4.7dγ	839.8 ± 1.0dβ	862.2 ± 4.8dα
	NT	797.8 ± 2.6aδ	812.1 ± 10.4bcγ	834.8 ± 3.4cdβ	844.9 ± 1.7cdβ	871.0 ± 8.9cda
	TS	797.8 ± 2.6aε	824.3 ± 3.6abδ	848.1 ± 5.0bγ	867.0 ± 4.5bβ	907.6 ± 4.3ba
	NTS	797.8 ± 2.6aε	831.3 ± 6.8aδ	865.3 ± 3.3aγ	882.6 ± 6.6aβ	922.2 ± 2.9aα
	TP	797.8 ± 2.6aε	822.1 ± 4.1abcδ	839.5 ± 2.6cγ	848.9 ± 3.5cβ	867.1 ± 5.6da
	NTP	797.8 ± 2.6aε	815.9 ± 9.9bcδ	837.6 ± 2.8cγ	852.0 ± 3.1cβ	879.0 ± 5.3ca
总无机磷 Total inorganic P	T	582.5 ± 2.1aε	593.4 ± 2.3cδ	607.5 ± 4.8dγ	621.1 ± 4.6cβ	636.1 ± 4.3dα
	NT	582.5 ± 2.1aε	596.8 ± 6.0bcδ	612.1 ± 2.4cdγ	626.0 ± 3.3bcβ	640.9 ± 5.3cda
	TS	582.5 ± 2.1aε	601.4 ± 5.8abcδ	617.3 ± 3.1bcγ	630.0 ± 3.2bβ	649.1 ± 1.8ba
	NTS	582.5 ± 2.1aε	608.4 ± 5.9aδ	628.1 ± 3.6aγ	645.6 ± 6.0aβ	667.1 ± 2.8aα
	TP	582.5 ± 2.1aε	606.6 ± 2.2abδ	619.9 ± 1.6bγ	628.1 ± 6.4bcβ	641.0 ± 3.4cda
	NTP	582.5 ± 2.1aε	599.6 ± 9.9abcδ	617.2 ± 2.7bcγ	630.9 ± 0.3bβ	647.0 ± 3.1bca
总有机磷 Total organic P	T	80.1 ± 1.6aβ	81.6 ± 2.1abβ	83.9 ± 2.5caβ	83.8 ± 2.0bαβ	87.1 ± 1.6ea
	NT	80.1 ± 1.6aγ	81.3 ± 2.7abβγ	84.7 ± 1.6cβ	83.7 ± 2.5bβγ	93.1 ± 1.4da
	TS	80.1 ± 1.6aδ	84.9 ± 3.1aγ	94.1 ± 2.9bβ	97.2 ± 1.1aβ	116.9 ± 0.7ba
	NTS	80.1 ± 1.6aδ	86.1 ± 0.3aγ	99.3 ± 1.8aβ	99.2 ± 1.2aβ	119.1 ± 1.1aα
	TP	80.1 ± 1.6aβγ	79.2 ± 1.9bγ	84.1 ± 0.7caβ	83.6 ± 1.4baβ	86.5 ± 1.1ea
	NTP	80.1 ± 1.6aγ	81.6 ± 3.6abγ	86.8 ± 1.4cβ	86.1 ± 1.0bβ	95.2 ± 1.0ca

注: 表中T、NT、TS、NTS、TP和NTP分别表示传统耕作、免耕、传统耕作秸秆还田、免耕秸秆覆盖、传统耕作地膜覆盖和免耕地膜覆盖。数据为平均值 ± 标准差 ( $n=3$ )。不同拉丁字母表示同一年份不同处理间在5%水平差异显著, 不同希腊字母表示同一处理不同年份间在5%水平差异显著。Note: In the table T, NT, TS, NTS, TP and NTP stands for conventional tillage, no-tillage, conventional tillage with straw incorporation, no-tillage with straw mulching, conventional tillage with plastic mulching and no-tillage with plastic mulching. Data shown in the table are means ± standard deviation ( $n=3$ ). Different Latin letters mean significant difference at 5% level between treatments in the same year. Different Greek letters mean significant difference at 5% level between years in the same treatment

间差异显著, 均呈逐年增长趋势, 其中NTS处理涨幅最大, 自2008年起显著高于其他处理; 不同处理总有机磷变化趋势不同, NTS和TS处理呈逐年增长趋势, 多数年份间差异显著, 截至2014年涨幅分别为48.7%、46.0%, NTP和NT处理总体增长, 但涨幅较前者小, 分别为18.9%、16.3%, 而T和TP处理相对稳定, 多数年份间差异不显著, 总体涨幅较小, 仅8.7%、8.0%。

## 2.2 不同耕作方式下土壤无机磷组分动态变化

由图2可知, 试验期总体上各处理Resin-Pi呈积累状态, 6个处理的平均涨幅为128.6%, 涨幅顺序为NTS $\approx$ NT>NTP $\approx$ TS>TP $\approx$ T; 各处理Resin-Pi含量多数年际间差异显著, 2011年较2008年显著降低, 降幅为13.0%~27.2%, 2014年较2011年大幅增长, 涨幅为65.8%~91.4%; NTS处理2005年起显著高于T处理, NT处理2011年起显著高于T处理, TS处理除2011年外其余年份均显著高于T处理, TP处理各年份均与T处理差异不显著, NTP处理至2014年显著高于T处理; 对比相同覆盖条件(秸秆或地膜)下的两处理, 至2014年免耕处理显著高于耕作处理; 试验期处理间的差异逐渐增大, 处理间的变异系数由2005年的9.5%增至2014年的15.7%。

试验期总体上各处理NaHCO<sub>3</sub>-Pi呈积累状态, 平均涨幅为66.9%, 涨幅顺序为NTS>NT $\approx$ TS $\approx$ NTP>TP $\approx$ T; NaHCO<sub>3</sub>-Pi的年际变化趋势与Resin-Pi相似, 2011年较2008年显著降低, 而2014年又出现大幅增长; NTS处理2005年起显著高于T处理, 至2014年显著高于其他保护性耕作处理, NT处理自2008年显著高出T处理, TS和NTP处理至2014年显著高于T处理, TP处理各年与T处理差异不显著; 至2014年相同覆盖条件下免耕处理显著高于耕作处理; 处理间的变异系数由2005年的3.9%增至2014年的5.8%。

试验期各处理NaOH-Pi含量呈逐年增长趋势, 涨幅较前两组分大, 平均涨幅为253.6%, 其中, NTS处理涨幅最大; 处理间的变异系数由2005年的8.1%上涨至2014年的9.3%; 试验前期各保护性耕作方式均与T处理差异不显著, 至2011年除TP外的其余处理均显著高于T处理, 2014年除NT外其余处理均显著高于T处理; 同种覆盖条件下, 各年免耕处理和耕作处理差异不显著。

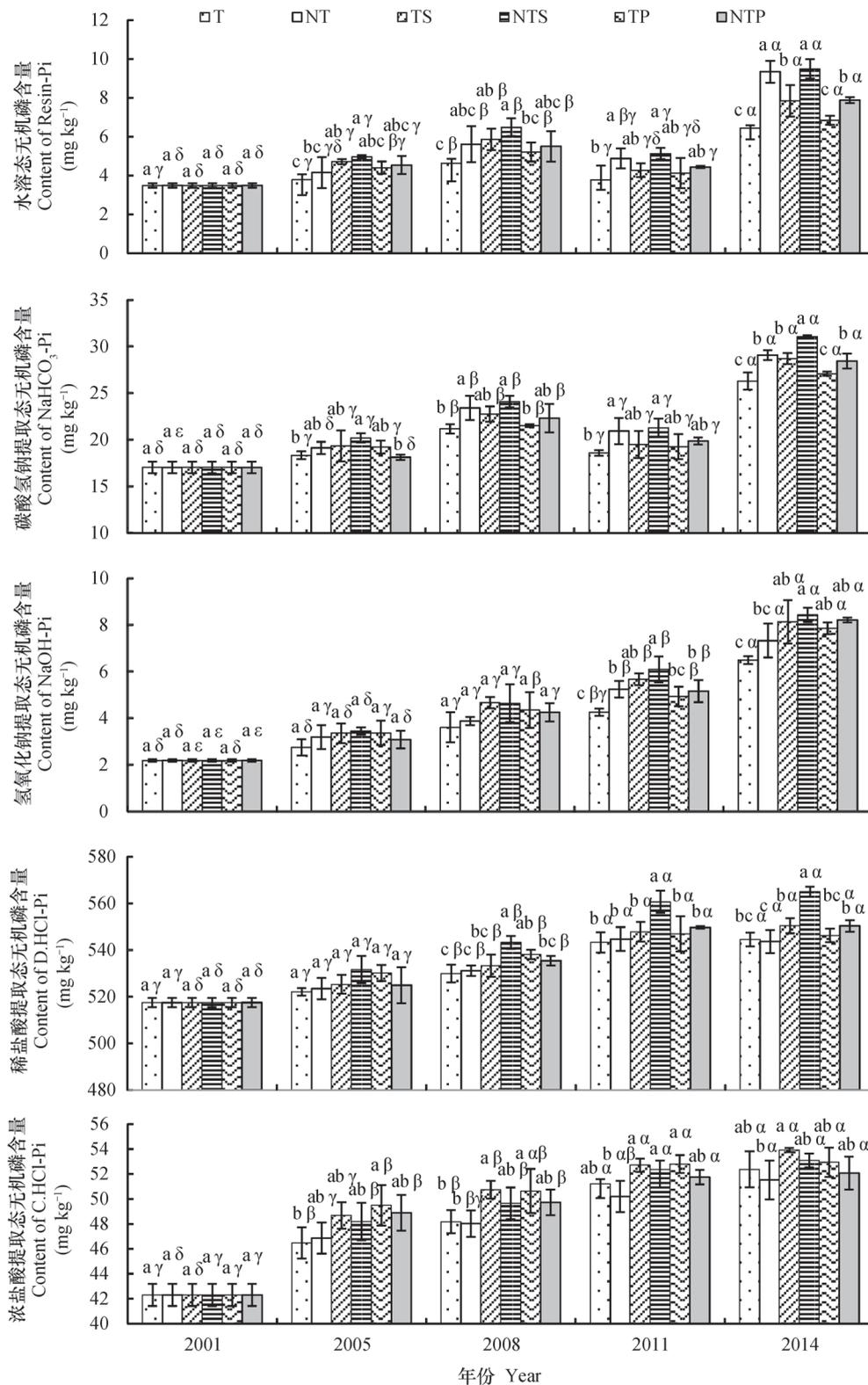
试验期总体上各处理D.HCl-Pi含量呈增长趋势, 但涨幅较前几种组分小, 平均涨幅为6.3%, 各处理除2014年较2011年变化不大外, 其余年际间差异显著, 其中2011年较2008年涨幅最大, 为1.6%~3.2%; 试验前期处理间的差异不显著, 至2008年NTS处理开始显著高于T处理和其他处理, NT、TS、TP和NTP处理各年均与T处理差异不显著; 秸秆覆盖条件下免耕处理2008年起显著高于耕作处理, 地膜覆盖条件下各年免耕与耕作处理差异不显著; 处理间差异呈逐渐增大趋势, 变异系数由2005年的0.7%增加至2014年的1.4%。

试验期各处理C.HCl-Pi含量呈逐年增长趋势, 涨幅在21.8%~27.4%, 多数处理2005年较2001年、2011年较2008年的涨幅较大, 年际差异达显著水平, 而2008年较2005年、2014年较2011年涨幅较小, 年际差异不显著; C.HCl-Pi对耕作方式的反应不敏感, 4个年份处理间最大相差分别仅3.0、2.7、2.6、2.4 mg kg<sup>-1</sup>, 各年份处理间的差异多不显著。

## 2.3 不同耕作方式下土壤有机磷组分动态变化

从图3可以看出, 试验期各处理的NaHCO<sub>3</sub>-Po含量总体呈增长趋势, TS和NTS两处理涨幅最大, 分别为57.1%、54.2%, T处理涨幅明显较其他处理小, 仅14.4%; 各处理2011年与2008年差异不显著, 变化较小, 而各保护性耕作处理2014年较2011年出现大幅增加, 涨幅为13.5%~23.0%; 试验前期各处理NaHCO<sub>3</sub>-Po含量差异不显著, 至2008年NTS、TS、NTP和TP处理显著高于T处理, NT处理至2014年也显著高于T处理; 秸秆覆盖条件下各年免耕处理和耕作处理差异不显著, 地膜覆盖条件下2014年免耕处理显著高于耕作处理; 处理间的差异呈逐渐增大趋势, 变异系数由2005年的2.7%增加至2014年的11.0%。

试验期各处理NaOH-Po含量呈总体增长趋势, 其中NTS和TS两处理涨幅最大, 分别为125.3%、104.7%, T处理涨幅最小, 仅20.2%; 5个保护性耕作处理除2011年与2008年差异不显著外, 其余年际间差异显著, 2014年涨幅最大, 较2011年增加29.5%~57.7%, T处理除2014年外其余年份间差异不显著; 试验前期各保护性耕作处理与T处理差异不显著, 自2008年起NTS、TS、NTP处理显著高于T处理, NT、TP处理至2014年显著高于



注：图中误差线为标准偏差 ( $n=3$ )。不同拉丁字母表示同一年份不同处理间在5%水平差异显著，不同希腊字母表示同一处理不同年份间在5%水平差异显著。下同 Note: In the table the error bars show standard deviation ( $n=3$ ). Different Latin letters mean significant difference at 5% level between treatments in the same year. Different Greek letters mean significant difference at 5% level between years in the same treatment. The same below

图2 各处理土壤无机磷组分动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of fractions of soil inorganic phosphorus relative to treatment

T处理；秸秆覆盖条件下免耕与耕作处理2011年起差异变显著，地膜覆盖条件下2014年免耕处理显著高于耕作处理；处理间的变异系数总体增大，由2005年的5.4%增至2014年的22.9%。

与前两种有机磷组分不同，试验期不同处理C.HCl-P<sub>o</sub>含量变化趋势不同，NTS和TS处理呈总体增长趋势，但涨幅较前两种有机磷组分小，分别为21.2%、20.5%，T处理相对稳定，年际间差异不显著，NT、TP和NTP处理总体呈下降趋势，降幅分别为5.7%、17.9%和11.6%；NTS和TS两处理自2008年起显著高于T处理，TP处理2008年起显著低于T处理，NT和NTP处理至2014年显著低于T处

理；秸秆覆盖条件下免耕处理2008年显著高于耕作处理，地膜覆盖条件下2014年免耕处理显著高于耕作处理；处理间的变异系数逐年增大，由2005年的2.8%增至2014年的16.2%。

### 2.4 不同耕作方式下残留磷动态变化

从图4可以看出，试验期各处理Residual-P含量相对稳定，多数年份间差异不显著，各处理年际变化无明显规律；处理间的差异较其他磷组分小，各年多数处理均与T处理差异不显著；秸秆覆盖条件下免耕处理2014年显著低于耕作处理，其余年份差异不显著，地膜覆盖条件下各年免耕处理与耕作处理差异不显著。

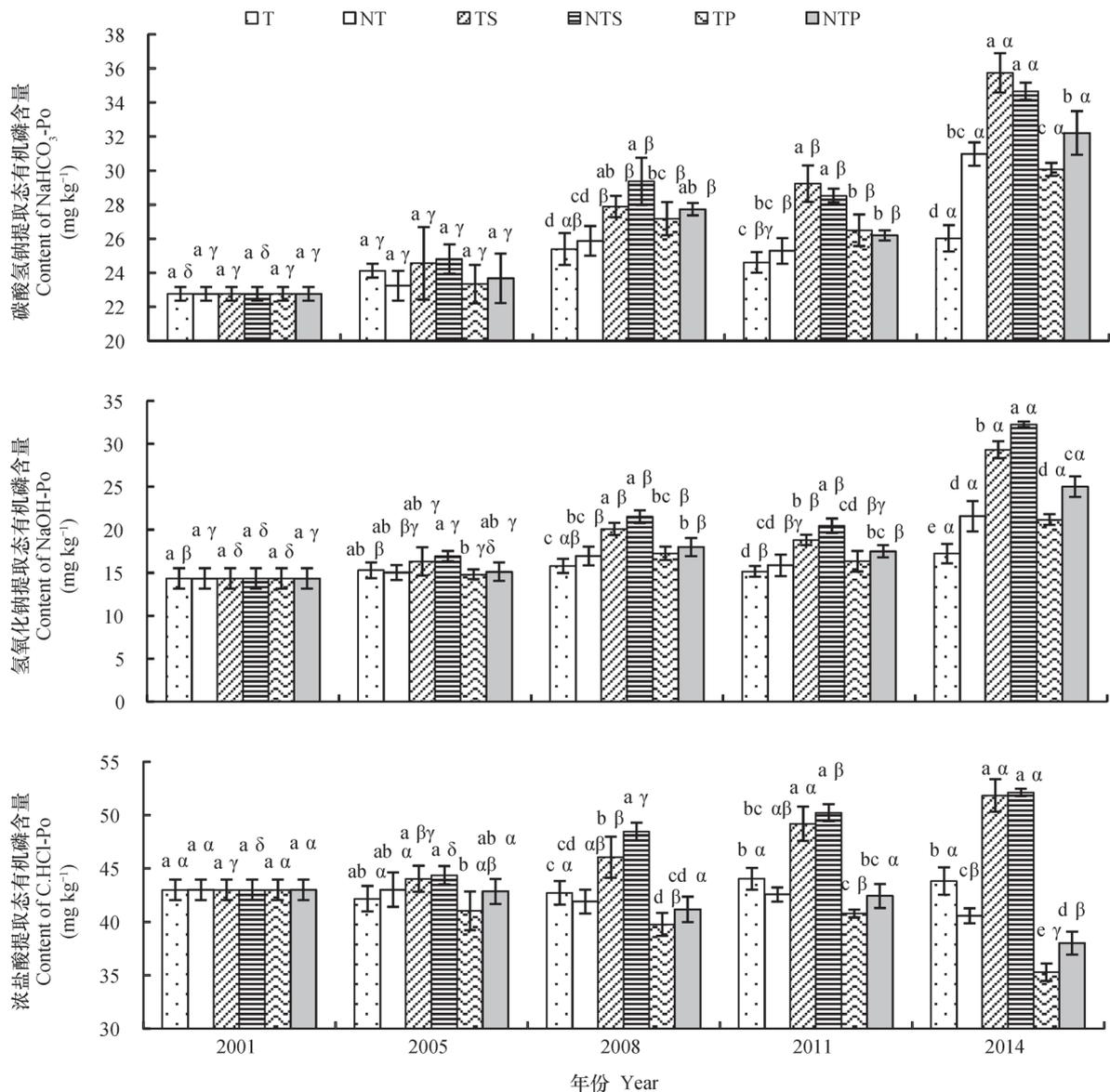


图3 各处理土壤有机磷组分动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of fractions of soil organic phosphorus relative to treatment

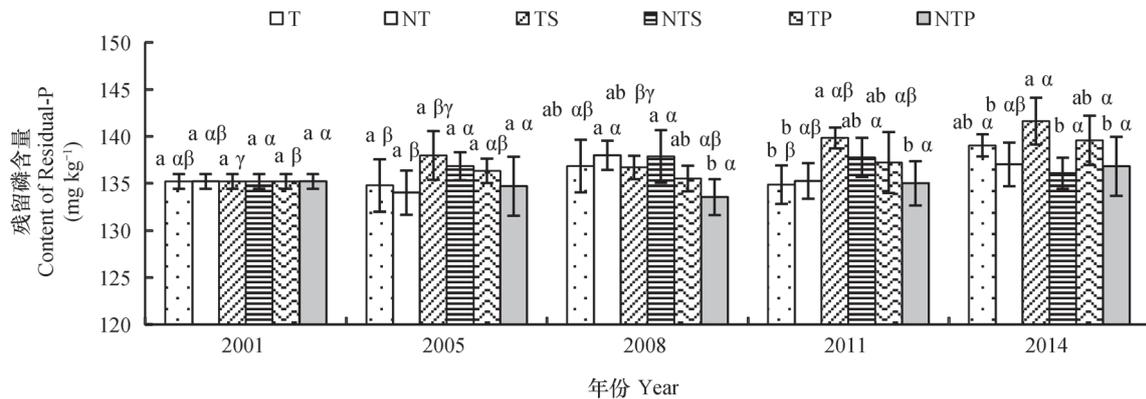


图4 各处理残留磷动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of Residual-P relative to treatment

### 2.5 不同耕作方式下土壤磷组分相对含量动态变化

从表2可以看出,截至2014年各处理无机磷组分中Resin-Pi、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaOH-Pi}$ 占全磷的百分比明显增加,  $\text{D.HCl-Pi}$ 相对含量有所降低,  $\text{C.HCl-Pi}$ 变幅较小, T、NT、TP和NTP处理下总无机磷比例有小幅增加, 而TS和NTS处理下则有

所下降; 有机磷组分中, T处理下3种有机磷组分及总有机磷比例变化不大, TS和NTS处理下3种有机磷组分和总有机磷比例均明显增长, NT、TP、NTP处理下 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 $\text{NaOH-Po}$ 的相对含量有所增加而 $\text{C.HCl-Po}$ 有所下降, 总有机磷比例变化不大; 各处理Residual-P相对含量略有下降。

表2 土壤磷组分相对含量动态变化

Table 2 Dynamic changes of relative content of soil phosphorus relative to fraction (%)

年份 Year	处理 Treatment	无机磷组分 Inorganic phosphorus fractions						有机磷组分 Organic phosphorus fractions				残留磷 Residual-P
		水溶态 无机磷 Resin- Pi	碳酸氢钠 提取态 无机磷 $\text{NaHCO}_3\text{-}$ Pi	氢氧化钠 提取态 无机磷 $\text{NaOH-Pi}$	稀盐酸 提取态 无机磷 $\text{D.HCl-Pi}$	浓盐酸 提取态 无机磷 $\text{C.HCl-Pi}$	总 无机磷 Total- Pi	碳酸氢钠 提取态 有机磷 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$	氢氧化钠 提取态 有机磷 $\text{NaOH-Po}$	浓盐酸 提取态 有机磷 $\text{C.HCl-Po}$	总 有机磷 Total-Po	
2001	T	0.4	2.1	0.3	64.9	5.3	73.0	2.9	1.8	5.4	10.0	16.9
2014	T	0.7	3.0	0.8	63.2	6.1	73.8	3.0	2.0	5.1	10.1	16.1
	NT	1.1	3.3	0.8	62.4	5.9	73.6	3.6	2.5	4.7	10.7	15.7
	TS	0.9	3.2	0.9	60.6	5.9	71.5	3.9	3.2	5.7	12.9	15.6
	NTS	1.0	3.4	0.9	61.3	5.8	72.3	3.8	3.5	5.7	12.9	14.8
	TP	0.8	3.1	0.9	63.0	6.1	73.9	3.5	2.4	4.1	10.0	16.1
	NTP	0.9	3.2	0.9	62.6	5.9	73.6	3.7	2.8	4.3	10.8	15.6

## 3 讨论

2001—2014年各处理土壤全磷呈增长趋势, 涨幅在8.1%~15.6%, 这说明施入土壤的过磷酸钙除一部分被植物吸收外, 还有盈余在土壤中积累。水溶性磷肥施入土壤很快会与土壤成分进行各种化

学、生物反应, 使磷肥形态发生转化, 磷肥的当季利用率只有10%~25%<sup>[6]</sup>, 其余未被作物吸收的磷会以多种形态积累下来, 但土壤类型不同磷组分积累程度亦不同<sup>[7]</sup>。朱佳颖等<sup>[8]</sup>认为棕壤经过30 a施肥 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaOH-Pi}$ 增加而 $\text{HCl-Pi}$ 减少, 各有机磷形态稳定; 戚瑞生等<sup>[9]</sup>认为黑垆土

的磷肥积累以 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占的比例最大；韩晓飞等<sup>[10]</sup>则认为紫色水稻土长期施肥过后土壤磷以闭蓄态 $\text{O-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主。本研究发现黄绵土施用等量磷肥的各处理中无机磷各组分均呈总体增长趋势，其中 $\text{NaOH-Pi}$ 涨幅最大，其次为 $\text{Resin-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ ，且3种组分的相对含量也明显提高，而稳定态的 $\text{D.HCl-Pi}$ 和 $\text{C.HCl-Pi}$ 变幅较小，且其相对含量较稳定，保护性耕作下有机磷组分有不同变化，但传统耕作下有机磷组分较稳定，说明残留的磷肥多以活性较强的无机磷组分 $\text{NaOH-Pi}$ 、 $\text{Resin-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 形态存在，其对有机磷组分影响不大，但耕作措施会使有机磷组分发生变化。

$\text{Resin-Pi}$ 是与土壤溶液处于平衡状态的土壤固相无机磷，有效性最高； $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 是吸附在土壤颗粒表面的活性无机磷和与低分子有机物（如核糖核酸、核苷酸和甘油磷酸盐等）结合的活性有机磷； $\text{NaOH-P}$ 是化学吸附在铁铝氧化物表面的中活性无机磷和与腐殖酸、褐菌素等结合的中活性有机磷； $\text{D.HCl-Pi}$ 是土壤母质中钙结合态磷； $\text{C.HCl-P}$ 是与铁铝氧化物、磷灰石紧密结合的稳定态无机磷和颗粒态有机质中含有的磷<sup>[11]</sup>。本研究发现活性无机磷组分 $\text{Resin-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 在2011年较2008年明显减少，有机磷组分 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 $\text{NaOH-Po}$ 在2011年较2008年无显著增长，几种磷组分却在2014年大幅增加，而较稳定的 $\text{D.HCl-Pi}$ 和 $\text{C.HCl-Pi}$ 呈相反的变化趋势——2011年较2008年显著增长，2014较2011年变幅不大。可能是由于受降雨的影响，实验区2009—2011年连续3 a降水低于多年平均降水量，而2012—2014年雨量充沛。水分是影响土壤磷形态转化和有效性的因素之一，较低的土壤水分条件下，磷扩散活化能高，降低了磷的扩散能力<sup>[12]</sup>，使可溶态的 $\text{Resin-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 被 $\text{Ca}$ 、 $\text{Al}$ 和 $\text{Fe}$ 离子固定而转化为 $\text{D.HCl-Pi}$ 、 $\text{C.HCl-Pi}$ ；而较高的土壤水分条件下，土壤还原条件改善，铁铝氧化物被还原，使 $\text{C.HCl-Pi}$ 中的磷酸根离子得以释放<sup>[13]</sup>，向 $\text{Resin-Pi}$ 或 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 转化；同时，充足的土壤水分条件下微生物活性提高，颗粒态有机质腐解产生有机酸（腐殖酸和低分子量有机酸等），使稳定态有机磷活化为 $\text{NaOH-Po}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 甚至活性无机磷。

国内外很多研究表明耕作方式会对磷组分产生影响<sup>[14-16]</sup>，本研究也发现，随着试验时间的延长，各磷组分在处理间的差异呈增大趋势。耕作方

式对磷素组分的影响主要通过水分运动、温度、生物和土壤磷素化学等的影响而实现<sup>[17]</sup>。本研究还发现保护性耕作会对不同磷组分产生不同影响。保护性耕作可以不同程度地提高活性无机磷组分 $\text{Resin-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和中活性 $\text{NaOH-Pi}$ 的含量，同种覆盖方式下，免耕较传统耕作效果明显，尤其以免耕秸秆覆盖最明显。这是因为：免耕避免了土壤扰动使土壤结构得到改善，使土壤保水能力增强<sup>[18]</sup>，地面覆盖又可减少土壤水分蒸发，秸秆覆盖还可减少地表径流促进雨水下渗，土壤水分的增加可提高可溶性磷肥的溶解度，减少磷肥的固定；秸秆腐解过程中产生的有机阴离子通过占据磷的吸附点位而使磷酸根离子释放<sup>[19]</sup>；此外，免耕保水、地膜覆盖和秸秆覆盖保温，这为微生物生长和繁殖提供了良好的环境条件，加快了有机磷的矿化分解和稳定无机磷的活化。 $\text{D.HCl-Pi}$ 、 $\text{C.HCl-Pi}$ 和 $\text{Residual-P}$ 是相对稳定的磷组分，研究发现免耕秸秆覆盖可提高 $\text{D.HCl-Pi}$ 含量，但耕作方式对 $\text{C.HCl-Pi}$ 和 $\text{Residual-P}$ 的影响不大，这是因为免耕秸秆覆盖不会使土壤裸露在地表，可以避免因水蚀或风蚀带走的磷素损失。张晓艳<sup>[20]</sup>在本试验区的研究数据表明，免耕秸秆覆盖较传统耕作可减少16.0%~45.9%的土壤侵蚀量，这在土壤含量最高的 $\text{D.HCl-Pi}$ （60.6%~64.5%）上体现最明显，而含量相对较少的 $\text{C.HCl-Pi}$ 和 $\text{Residual-P}$ 不明显。研究还发现保护性耕作可提高 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 $\text{NaOH-Po}$ 含量，尤其以 $\text{NTS}$ 和 $\text{TS}$ 处理最明显， $\text{NTS}$ 和 $\text{TS}$ 处理还可提高 $\text{C.HCl-Po}$ 含量，且两处理下3种有机磷组分和总有机磷组分相对含量不断增长，但 $\text{NT}$ 、 $\text{TP}$ 和 $\text{NTP}$ 处理下 $\text{C.HCl-Po}$ 下降。 $\text{NTS}$ 和 $\text{TS}$ 处理可提高3种有机磷组分含量，主要是因为作物残体含有机磷，据测算试验地豌豆秸秆有机磷含量（ $2.1 \pm 0.4$ ） $\text{mg kg}^{-1}$ ，春小麦秸秆有机磷含量（ $1.4 \pm 0.1$ ） $\text{mg kg}^{-1}$ ，秸秆还田处理一个轮作周期带入土壤总有机磷约 $6.4 \text{ kg hm}^{-2}$ ，秸秆中有机磷虽然以中活性和中稳性为主<sup>[21]</sup>，但秸秆降解过程中磷发生着一系列复杂变化，包括有机磷的活化、矿化和颗粒态有机质对磷的固定，因此，3种有机磷组分均较其他处理高，这与关连珠等<sup>[19]</sup>的研究结果相似。 $\text{NT}$ 、 $\text{TP}$ 和 $\text{NTP}$ 处理下 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 、 $\text{NaOH-Po}$ 含量升高而 $\text{C.HCl-Po}$ 含量下降是因为保护性耕作可增加土壤微生物含量；罗珠珠等<sup>[22]</sup>在本试验区的研究数据表明，保护性耕作下微生物数量较传统

耕作高2.4%~52.3%，微生物的增加一方面加快了稳定性有机磷的降解，另一方面微生物不断将无机磷合成磷酸酯（如核酸、甘油磷酸盐和磷脂等）储存在体内<sup>[23]</sup>。

## 4 结 论

试验地每年所施磷肥在土壤中有盈余，残留的磷肥主要以中活性NaOH-Pi、活性Resin-Pi和NaHCO<sub>3</sub>-Pi形态存在，其对有机磷组分影响不大；降雨较少的年份不利于活性Resin-Pi、NaHCO<sub>3</sub>-Pi和NaHCO<sub>3</sub>-Po以及中活性NaOH-Po的积累，而使稳定组分D.HCl-Pi、C.HCl-Pi积累较多；耕作措施会对多数磷组分动态产生影响，随着时间的延长，其影响越发明显；保护性耕作有利于无机磷组分Resin-Pi、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi和有机磷组分NaHCO<sub>3</sub>-Po、NaOH-Po的积累，尤其免耕秸秆覆盖效果最明显，此外，免耕秸秆覆盖方式下较稳定的磷组分D.HCl-Pi、C.HCl-Po含量也较其他耕作方式高。因此，采取保护性耕作可以适当减少磷肥用量，保护性耕作尤其是免耕秸秆覆盖方式是值得在该区推广的耕作方式。

**致 谢** 感谢甘肃农业大学资源与环境学院张冰桥和张春红老师、武均和程睿芳同学在实验过程中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 常龙飞, 王晓龙, 聂小飞, 等. 巢湖低丘山区典型植被覆盖类型土壤磷形态分异特征. 土壤, 2013, 45 (4): 633—640  
Chang L F, Wang X L, Nie X F, et al. Distribution characteristics of soil P as influenced by different vegetation type in Chao Lake mountain areas (In Chinese). Soils, 2013, 45 (4): 633—640
- [ 2 ] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction//Carter M R. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993: 75—86
- [ 3 ] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征. 中国生态农业学报, 2008, 16 (6): 1341—1347  
Mu X H, Li S Q, Dang R J. Distribution of phosphorus fractionations in calcareous soils of Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16 (6): 1341—1347
- [ 4 ] 张婧, 张仁陟, 左小安. 保护性耕作对黄土高原农田土壤理化性质的影响. 中国沙漠, 2016, 36 (1): 137—143  
Zhang J, Zhang R Z, Zuo X A. Effects of conservative tillage on physical and chemical characteristics under a pea-wheat rotation system in the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Desert Research, 2016, 36 (1): 137—143
- [ 5 ] 司正邦, 李军, 周婷婷. 耕作与施肥模式对渭北旱塬春玉米土壤肥力和产量的影响. 西北农业学报, 2016, 25 (1): 25—33  
Si Z B, Li J, Zhou T T. Effects of tillage practices and fertilization patterns on soil nutrients dynamics and yield performance of spring maize in Weibei Highland (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2016, 25 (1): 25—33
- [ 6 ] Zhang W F, Ma W Q, Ji Y X, et al. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80 (2): 131—144
- [ 7 ] 李中阳, 李菊梅, 徐明岗, 等. 外源磷对土壤无机磷的影响及有效性. 中国土壤与肥料, 2007 (3): 32—35, 62  
Li Z Y, Li J M, Xu M G, et al. Change and availability of soil inorganic phosphorus components influenced by phosphorus fertilizer application (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007 (3): 32—35, 62
- [ 8 ] 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  
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 (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (4): 891—895
- [ 9 ] 戚瑞生, 党廷辉, 杨绍琼, 等. 长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1136—1146  
Qi R S, Dang T H, Yang S Q, et al. Forms of soil phosphorus and P adsorption in soils under long-term crop rotation and fertilization systems (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (6): 1136—1146
- [ 10 ] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 长期定位施肥条件下紫色土无机磷形态演变研究. 草业学报, 2016, 25 (4): 63—72  
Han X F, Gao M, Xie D T, et al. Inorganic phosphorus in a regosol (purple) soil under long-term phosphorus fertilization (In Chinese). Acta Prataculturae Sinica,

- 2016, 25 (4): 63—72
- [ 11 ] 张林, 吴彦, 吴宁, 等. 林线附近主要植被类型下土壤非生长季磷素形态. 生态学报, 2010, 30 (13): 3457—3464  
Zhang L, Wu Y, Wu N, et al. The soil phosphorus forms under different vegetation types near timberline during non-growing season (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (13): 3457—3464
- [ 12 ] 马志敏, 傅瓦利, 胡宁, 等. 三峡库区消落带土壤无机磷组分的变化及其对有效磷的影响. 水土保持学报, 2009, 23 (3): 107—111  
Ma Z M, Fu W L, Hu N, et al. Inorganic phosphorus transformation and effected the phosphorus availability in drawdown areas of Three Gorges Reservoir (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (3): 107—111
- [ 13 ] 何园球, 樊剑波, 李成亮, 等. 水稻旱作下土壤水分状况和施用磷肥对红壤有效磷含量的影响. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1196—1202  
He Y Q, Fan J B, Li C L, et al. Effect of soil moisture and phosphorus application on concentration of available phosphorus in red soil under aerobic rice cultivation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1196—1202
- [ 14 ] 田秀平, 马艳梅, 韩晓日. 长期耕作、施肥对白浆土无机磷形态的影响. 土壤, 2003, 35 (4): 344—346  
Tian X P, Ma Y M, Han X R. Effect of long-term cultivation and fertilization on forms of inorganic phosphorus in ablic soil (In Chinese). *Soils*, 2003, 35 (4): 344—346
- [ 15 ] Pavinato P S, Merlin A, Rosolem C A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil & Tillage Reaearch*, 2009, 105 (1): 149—155
- [ 16 ] Moussa-Machraoui S B, Errouissi F, Ben-Hammouda M, et al. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106 (2): 247—253
- [ 17 ] 江晶, 张仁陟, 海龙. 耕作方式对黄绵土无机磷形态的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (2): 387—391  
Jiang J, Zhang R Z, Hai L. Effect of tillage methods on inorganic phosphorus forms in Loessal soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (2): 387—391
- [ 18 ] 陈强, Yuriy S Kravchenko. 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果. 土壤学报, 2014, 51 (1): 11—21  
Chen Q, Kravchenko Y S, Chen Y, et al. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 11—21
- [ 19 ] 关连珠, 禅忠祥, 张金海, 等. 炭化玉米秸秆对棕壤磷素组分及有效性的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (10): 2050—2057  
Guan L Z, Chan Z X, Zhang J H, et al. Influence of carbonized maize stalks on fractions and availability of phosphorus in brown soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (10): 2050—2057
- [ 20 ] 张晓艳. 保护性耕作条件下土壤物理性状及土壤侵蚀研究. 兰州: 甘肃农业大学林学院, 2008: 26—39  
Zhang X Y. Study on soil physical properties and soil erosion under conservation tillage (In Chinese). Lanzhou: College of forestry, Gansu Agricultural University, 2008: 26—39
- [ 21 ] 陈欣, 赵晶晶, 鲁彩艳, 等. 有机物料中磷素研究进展. 河南大学学报 (自然科学版), 2007, 37 (1): 56—60  
Chen X, Zhao J J, Lu C Y, et al. Review of the study of phosphorus in organic material (In Chinese). *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2007, 37 (1): 56—60
- [ 22 ] 罗珠珠, 黄高宝, 蔡立群, 等. 黄土高原旱地土壤质量评价指标研究, 中国生态农业学报, 2012, 20 (2): 127—137  
Luo Z Z, Huang G B, Cai L Q, et al. Assessment indicators of soil quality in rain-fed areas of the Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20 (2): 127—137
- [ 23 ] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 沉积物中有机磷在pH和温度影响下的矿化机制. 环境科学, 2011, 32 (4): 1008—1014  
Li N, Shan B Q, Zhang H, et al. Organic phosphorus mineralization in the sediments under the impact of pH and temperature (In Chinese). *Environmental Science*, 2011, 32 (4): 1008—1014

## Dynamics of Soil Phosphorus as Affected by Tillage on the Loess Plateau in Central Gansu, China

XU Yan ZHANG Renzhi<sup>†</sup>

(College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** 【Objective】 The Loess Plateau in Central Gansu is one of the most seriously eroded regions in China. In this area the soil is generally in lack of phosphorus, and the conventional tillage pattern prevailing in the region exacerbates the loss of phosphorus and other soil nutrients. Therefore, it is urgent to address the problem by improving farmland management and hence to uplift utilization efficiency of soil phosphorus. This study attempts to characterize dynamic changes of soil total phosphorus and phosphorus fractions in the soil under six different tillage patterns, so as to reveal mechanisms of the six tillage patterns affecting soil phosphorus, and provide a theoretical basis for remolding the original tillage pattern or establishing a new sustainable tillage pattern. 【Method】 For this study, a 13-year-long field experiment on tillage has been carried out in an upland farm on the Loess Plateau in Central Gansu. The experiment is designed to have six different tillage patterns, that is, conventional tillage (T), no-tillage (NT), conventional tillage with straw incorporation (TS), no-tillage with straw mulching (NTS), conventional tillage with plastic mulching (TP), and no-tillage with plastic mulching (NTP). For in-lab analysis, Tiessen's modified Hedley method was used for fractionation of soil phosphorus. Six extractants were used sequentially from weak to strong in capacity to extract nine fractions of phosphorus, that is, Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-Po, NaOH-Pi, NaOH-Po, D.HCl-Pi, C.HCl-Pi, C.HCl-Po and Residual-P. 【Result】 Results show: (1) During the experiment, soil total phosphorus in all the treatments increased year by year, with a rate ranging from 8.1% to 15.6%, and in terms of soil phosphorus increase rate, the six treatments exhibited an order of NTS > TS > NTP ≈ NT ≈ T ≈ TP. Total inorganic phosphorus also showed an increasing trend in all the treatments. In Treatments NTS and TS, total organic phosphorus increased the fastest or by 48.7% and 46.0%, respectively, and in Treatments NTP and NT it did by 18.9% and 16.3%, respectively, while in Treatments T and TP it remained almost unchanged; (2) During the experiment, all the fractions of inorganic phosphorus were on a rising trend, except for Resin-Pi and NaHCO<sub>3</sub>-Pi, which declined slightly in 2011. Among all the inorganic phosphorus fractions, NaOH-Pi rose the fastest with an average growth rate of all the six treatments reaching up to 253.6%; Resin-Pi and NaHCO<sub>3</sub>-Pi followed, with an average growth rate being 128.6% and 66.9%, respectively; And the relative content of the three fractions also some what increased; (3) NaHCO<sub>3</sub>-Po and NaOH-Po showed an overall increasing trend except for a slight fall in 2011 in the five treatments of conservation tillage, however, they did not change much in Treatment T, throughout the entire experiment. C.HCl-Po increased year by year in Treatments TS and NTS, and remained almost unchanged in Treatment T, and showed overall downward trends in Treatments NT, TP and NTP; (4) The five patterns of conservation tillage raised the content of Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-Pi and NaOH-Pi, and no tillage was more effective than conventional tillage, when the same in supplementary measure, with Treatment NTS in particular, which increased the content of D.HCl-Pi. The effect of tillage on C.HCl-Pi and Residual-P was not obvious. The five treatments of conservation tillage, especially Treatments NTS and TS, increased the content of NaHCO<sub>3</sub>-Po and NaOH-Po, and Treatments NTS and TS, also raised

the content of C.HCl-Po, but Treatments NT, TP and NTP reduced the content of C.HCl-Po, in comparison with Treatment T. 【Conclusion】 Phosphorus fertilizer would accumulate in the soil year by year, existing in the soil in the form of NaOH-Pi, moderate in activity and in the form of Resin-Pi and NaHCO<sub>3</sub>-Pi, high in activity, and the accumulation does not have much impact on fractions of organic phosphorus. Sparse rainfall is no good to accumulation of phosphorus of active fractions, such as Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-Pi and NaHCO<sub>3</sub>-Po, but conducive to that of phosphorus of stable fractions, such as D.HCl-Pi and C.HCl-Pi. Conservation tillages may increase the content of phosphorus of the fractions, moderate and high in activity, especially Treatment NTS. Therefore, it can be concluded that the adoption of conservation tillage can reduce the consumption of phosphorus fertilizer to a certain extent. Conservation tillage, especially the practice of no-tillage with straw mulching, is worth promoting in this area.

**Key words** Loess Plateau in Central Gansu; Tillage pattern; Soil total phosphorus; Soil phosphorus fractions

(责任编辑: 陈荣府)