



### 间作对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响

周 龙, 苏丽珍, 王思睿, 王瑞雪, 普正仙, 郑 毅, 汤 利

### Effect of intercropping on balancing effect of absorption and desorption characteristics of phosphorus in red soil

ZHOU Long, SU Lizhen, WANG Sirui, WANG Ruixue, PU Zhengxian, ZHENG Yi, and TANG Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210312>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 间作作物菌根菌丝对红壤磷形态的影响

Effects of intercropping and AMF inoculation on phosphorus forms in red soils

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1624–1633

#### 微塑料对典型污染物吸附解吸的研究进展

Research progress on the adsorption and desorption of typical pollutants on microplastics

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 961–969

#### 长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究

Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1876–1886

#### 水铁矿对磷的吸附及胶体态磷迁移能力预测

Phosphorus adsorption onto ferrihydrite and predicting colloidal phosphorus transport

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 85–93

#### 江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响

Yields and interspecific relationship of the maize–soybean intercropping system in the upland red soil of Jiangxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1127–1137

#### 硅、磷配施对玉米苗期生长及氮磷钾积累的影响

Effect of phosphorus and silicon application on the uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by maize seedlings

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(5): 677–688



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210312

周龙, 苏丽珍, 王思睿, 王瑞雪, 普正仙, 郑毅, 汤利. 间作对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11): 1867-1878

ZHOU L, SU L Z, WANG S R, WANG R X, PU Z X, ZHENG Y, TANG L. Effect of intercropping on balancing effect of absorption and desorption characteristics of phosphorus in red soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1867-1878

## 间作对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响\*

周 龙<sup>1,2</sup>, 苏丽珍<sup>1</sup>, 王思睿<sup>1</sup>, 王瑞雪<sup>1</sup>, 普正仙<sup>2</sup>, 郑 毅<sup>1</sup>, 汤 利<sup>1\*\*</sup>

(1. 云南农业大学 昆明 650201; 2. 云南云天化股份有限公司 昆明 650228)

**摘 要:** 磷素的吸附和解吸特性对土壤磷素迁移及其环境效应具有重要影响, 过量磷肥施入易造成土壤磷素固定和流失, 但合理间作可促进磷素吸收利用, 减少固定, 研究间作和不同施磷量条件下红壤磷素吸附解吸特性的平衡效应对促进红壤磷的高效利用, 兼顾环境效应具有重要意义。本研究采取 2 因素裂区组试验, 主因素为种植模式, 分别为与玉米||大豆 (IM)、单作玉米 (MM); 副因素为施磷水平, 分别为 P0 [0 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]、P60 [60 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]、P90 [90 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]、P120 [120 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>] 4 个施磷水平, 通过田间试验, 研究间作和施磷量对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响; 应用结构方程模型 (SEM) 和邻接树法 (ABT) 定量分析间作和施磷水平对磷吸附和解吸的相对贡献, 揭示间作影响红壤磷素吸附解吸的关键因子。结果表明: 1) Langmuir 等温吸附方程最适合红壤对磷的吸附特征拟合, 土壤磷吸附量随平衡溶液磷浓度的增加呈先增加再趋于饱和的趋势, 土壤磷吸附量随施磷量的增加逐渐降低。2) 种植模式和施磷水平以及交互作用极显著 ( $P < 0.01$ ) 影响红壤磷素的吸附量和解吸量。间作处理较单作磷素吸附量和解吸量分别增加 22.9% 和 9.2% ( $P < 0.05$ ); 不同施磷水平下, 间作磷吸附量较单作显著增加 13.0%、19.4%、41.5% 和 23.9% ( $P < 0.05$ ); 磷解吸量在 P0 和 P60 处理间作较单作显著增加 90.2% 和 194.4% ( $P < 0.05$ ), 而在 P90 和 P120 处理间作较单作减少 52.1% 和 34.1% ( $P < 0.05$ )。3) 不同种植模式与施磷水平下, 土壤磷吸附量与土壤 pH、有机质、树脂磷、有效磷、全磷以及磷吸附饱和度呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与游离氧化铁、游离氧化铝和磷吸附持指数呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤磷解吸量与标准需磷量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。红壤磷素的吸附和解吸主要受 pH、有机质和游离氧化铁的影响, 间作通过改变土壤的 pH、有机质和游离氧化铁含量影响红壤磷吸附量和解吸量。玉米||大豆间作具有较好的土壤磷缓冲能力, 低磷水平下促进磷素大量解吸供植物吸收利用, 高磷水平下促进磷素吸附有效减缓磷素的损失。

**关键词:** 磷; 吸附; 解吸; 玉米||大豆间作; 施磷量; 红壤

中图分类号: S312

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Effect of intercropping on balancing effect of absorption and desorption characteristics of phosphorus in red soil\*

ZHOU Long<sup>1,2</sup>, SU Lizhen<sup>1</sup>, WANG Sirui<sup>1</sup>, WANG Ruixue<sup>1</sup>, PU Zhengxian<sup>2</sup>, ZHENG Yi<sup>1</sup>, TANG Li<sup>1\*\*</sup>

(1. Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China)

**Abstract:** The migration and environment effect of phosphorus in soil are affected by its' adsorption and desorption. Although the ex-

\* 国家自然科学基金项目 (31760615)、国家重点研发计划项目 (2017YFD0200207) 和云南省科技人才与平台计划 (2019IC026) 资助

\*\* 通信作者: 汤利, 主要研究方向为养分资源高效利用。E-mail: ltang@ynau.edu.cn

周龙, 主要从事施肥与作物养分吸收利用研究。E-mail: 287834727@qq.com

收稿日期: 2021-05-24 接受日期: 2021-07-01

\* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31760615), the National Key Research & Development Program of China (2017YFD0200207), and the Scientific and Technological Talents and Platform of Yunnan Province (2019IC026).

\*\* Corresponding author, E-mail: ltang@ynau.edu.cn

Received May 24, 2021; accepted Jul. 1, 2021

cessive application of phosphorus fertilizer causes phosphorus fixation and loss, reasonable intercropping promotes the absorption and utilization and decreases fixation of phosphorus. This study investigated the adsorption and desorption of phosphorus in red soil under intercropping and phosphorus application, it is significant for promoting the efficient utilization of red soil phosphorus and balancing environmental effects. In this study, a two-factor split-plot block experiment was adopted through field trials, in which the first factor was the planting pattern, namely maize||soybean intercropping and maize monoculture; the second factor was phosphorus application levels: P0 (0), P60 [60 kg (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>], P90 [90 kg (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>], and P120 [120 kg (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]. This study aimed to explore the effects of intercropping and application of phosphorus on the adsorption and desorption of phosphorus in red soil, and to quantitatively analyze the relative contribution of intercropping and phosphorus application to phosphorus adsorption and desorption by using the structural equation model, and to reveal the key intercropping effect factors on the adsorption/desorption of phosphorus in red soil by using the aggregated boosted tree methods. Results showed that: 1) the Langmuir isothermal adsorption equation was most suitable for fitting phosphorus adsorption in red soil. The adsorption amount of soil phosphorus increased first and then tended toward saturation with the increase in phosphorus concentration in the equilibrium solution, while the adsorption amount of phosphorus decreased gradually with the increase in phosphorus application. 2) Phosphorus adsorption and desorption in red soil were significantly affected by planting pattern, phosphorus application, and the interaction between planting pattern and application of phosphorus ( $P < 0.01$ ). Compared with monoculture, the maize||soybean intercropping increased the adsorption and desorption of phosphorus by 22.9% and 9.2%, respectively ( $P < 0.05$ ). Under four application rates of phosphorus, compared with monoculture, the adsorption of phosphorus in intercropping increased significantly by 13.0%, 19.4%, 41.5%, and 23.9% ( $P < 0.05$ ), respectively. The desorption of phosphorus increased significantly by 90.2% and 194.4% in P0 and P60 intercropping ( $P < 0.05$ ), but decreased by 52.1% and 34.1% in P90 and P120 intercropping, respectively ( $P < 0.05$ ). 3) Under different planting patterns and phosphorus application levels, the adsorption of soil phosphorus had a significant negative correlation with soil pH, organic matter, resin phosphorus, available phosphorus, total phosphorus, and degree of phosphorus saturation ( $P < 0.01$ ), and a significant positive correlation with free iron oxide, free alumina, and phosphate sorption index ( $P < 0.01$ ). However, the desorption of phosphorus from red soil had a significant negative correlation with a standard phosphorus requirement ( $P < 0.01$ ). The adsorption and desorption of phosphorus in the red soil were mainly affected by pH, organic matter, and free iron oxide. Intercropping of maize and soybean changed soil pH and contents of organic matter and free iron oxide, resulting in differences in the phosphorus adsorption and desorption from that of maize monoculture in red soil, improving the soil phosphorus buffering capacity. At a low phosphorus level, intercropping can accelerate a large amount of phosphorus desorption for plants to absorb and utilize; at high phosphorus levels, intercropping can promote phosphorus adsorption and effectively slow down the loss of phosphorus.

**Keywords:** Phosphorus; Adsorption; Desorption; Intercropping of maize and soybean; Phosphorus application level; Red soil

磷作为植物生长发育必需三大营养元素之一,是限制作物生长的重要营养元素,也是引发水体污染的重要因素。磷素在土壤中的吸附与解吸特性是影响磷素迁移及其环境效应的主要机制之一<sup>[1-2]</sup>。在我国农田土壤中,由于土壤对磷的吸附和固定能力较强,土壤磷有效性低,作物对磷肥的利用率较低,当季利用率仅为 10%~25%<sup>[3]</sup>。吸附/解吸通过制约土壤的养分供应能力进而影响植物对养分的吸收与利用,它对于土壤中养分的形态、有效性及其在环境中的迁移转化起到至关重要的作用。

土壤 pH、铁铝氧化物、钙、有机质、黏粒含量等均能影响土壤磷的吸附与解吸<sup>[4-6]</sup>。李寿田等<sup>[7]</sup>研究表明,磷肥施入土壤后很快被土壤中表面黏粒、有机质以及不定形铁、铝和钙等固定或吸附,大量磷素进入难溶性磷库,很难被植物利用<sup>[8]</sup>。尤其在吸附性较强的酸性红壤中铁铝富集,受铁、铝等无机胶体固磷作用的影响,磷肥利用率仅为 10% 左右<sup>[8-9]</sup>。Zhang 等<sup>[10]</sup>通过研究 5 种不同质地潮土长期施肥后磷吸附解吸特征,发现黏粒、粉粒、有机质和游离

铁氧化物是影响磷吸附的主要因素。Debicka 等<sup>[11]</sup>证明在砂质土壤中 pH、有机质和钙是影响磷吸附解吸的主要因素<sup>[12]</sup>。闫金龙等<sup>[13]</sup>通过选择性去除土壤组分的方法证实土游离铁氧化物是决定磷吸附和解吸的重要因素。此外,土壤颗粒组成<sup>[6]</sup>、黏粒含量<sup>[14]</sup>以及土壤类型<sup>[15]</sup>对磷素吸附与解吸变化特性均有显著影响。当前研究证实土壤类型<sup>[5,16-17]</sup>、土地利用方式<sup>[18-19]</sup>、施肥处理<sup>[20-21]</sup>和生物炭及外源物质添加<sup>[22-23]</sup>等均对土壤磷素吸附和解吸产生影响,尤其在不同于不同处理方式下土壤颗粒含量、土壤 pH、有机质、铁、铝氧化物和碳酸钙对土壤磷素吸附解吸影响显著<sup>[12,14,24]</sup>。

间作促进磷素吸收利用<sup>[25-26]</sup>,但间作对土壤磷吸附解吸的平衡效应鲜见报道<sup>[23]</sup>,尤其是间作和施磷条件下磷素吸附解吸的交互作用及机制更为少见。本文针对西南酸性红壤研究间作与施磷水平对土壤吸附和解吸平衡效应的影响,同时,应用结构方程模型(SEM)阐述间作和施磷水平下磷吸附量和解吸量的因果关系,通过邻接树法(ABT)定量分析影响磷吸附和解吸的相对贡献,以揭示间作和施磷水平下影



响磷吸附和解吸的关键因子, 为优化西南酸性红壤合理施磷, 提高磷肥有效性提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本试验于 2017 年 5—10 月在云南省昆明市官渡区云南农业职业技术学院小哨校区试验农场进行 (24°54'N、102°41'E), 位于昆明市东北部, 属北亚热带季风气候, 海拔 1820.00 m, 年平均气温 14.40 °C, 年降雨量为 850.00 mm, 土壤类型为红壤。土壤有机质含量 4.50 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.19 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 4.02 mg·kg<sup>-1</sup>, 容重 1.36 mg·cm<sup>-3</sup>, pH 4.53。

### 1.2 试验设计

本试验供试玉米 (*Zea mays* L.) 品种为‘云瑞 88’, 大豆 (*Glycine max* L.) 品种为‘开育十二’。小区试验采用裂区随机区组设计, 以种植模式为主处理, 施磷量为副处理, 每个处理设 3 次重复, 共 2 种植模式,

4 个施磷水平, 8 个处理, 24 个小区, 小区面积 28 m<sup>2</sup> (4 m×6.5 m)。

2 种植模式分别为玉米||大豆间作 (IM) 和单作玉米 (MM), 间作采取玉米: 大豆=1: 1 的种植密度, 玉米、大豆行距均为 50 cm, 株距均为 25 cm, 每行 15 株, 距边 25 cm; 单作玉米行距 50 cm, 株距 25 cm, 每行 15 株, 距边 25 cm (图 1)。4 个施磷水平为不施磷 (P0)、低磷 [P60, 60 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]、常规磷 [P90, 90 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>] 和高磷 [P120, 120 kg (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>]。氮肥和钾肥施用为当地常规施肥量, 分别为 250 kg(N)·hm<sup>-2</sup>、75 kg(K<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>。供试磷肥 (14% 过磷酸钙)、钾肥 (50% 硫酸钾) 均以基肥施入, 氮肥 (46% 尿素) 分基肥、小喇叭口期追肥、大喇叭口期追肥 3 次施入, 分别占总施氮量的 40%、25% 和 35%。

玉米于 2017 年 6 月 5 日穴播, 6 月 15 日出苗, 10 月 22 日收获。所有试验小区玉米生育过程中保持浇水、中耕除草、病虫害防控等措施一致。

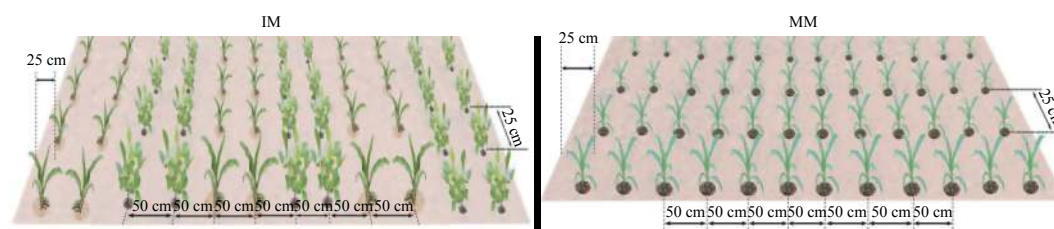


图 1 玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 田间设计示意图

Fig. 1 Field design diagrams of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems

### 1.3 样品采集及测定

玉米收获后使用土钻采集表层土壤样品, 间作处理取样点在玉米与大豆间作条带中间, 单作处理在玉米与玉米种植的条带中间, 去除边行随机选取 3 个点采集表层 (0~20 cm) 土壤样品。将所取样品混匀后挑出土壤中碎石、秸秆等杂物并通过四分法保留 300 g 左右土壤装于透明塑料袋中带回实验室, 风干磨细后分别过 0.25 mm 和 1 mm 筛备用。

土壤指标按照鲁如坤<sup>[27]</sup>的方法进行测定, 土壤 pH 采用电位法 (土水比为 1: 2.5), 有机质采用重铬酸钾外加热法, 树脂磷采用树脂膜 (46 mm×20 mm) 提取使用 Murphy-Riley 法测定, 速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法。速效磷和 pH 测定使用过 1 mm 筛土壤, 全磷、有机质测定土样过 0.25 mm 筛。

土壤磷等温吸附试验<sup>[28]</sup>: 称取 18 份过 0.25 mm 筛的风干土 1.25 g 于 50 mL 离心管中, 向每个离心管中分别加入 (mg·L<sup>-1</sup>) 0、5、10、15、20、30、60、75 和 100 不同磷含量梯度的溶液 25 mL (0.01 mol·L<sup>-1</sup>

NaCl 配制定容), 同时加入甲苯 2~3 滴 (抑制微生物活动), 加盖后置于在 (25±1) °C 恒温振荡箱中振荡 24 h (180 r·min<sup>-1</sup>), 取出后离心 (8000 r·min<sup>-1</sup>) 10 min, 用钼锑抗比色法测定上清液磷浓度, 为平衡后液相磷浓度, 差减法计算土壤吸磷量。吸附过程采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 3 种等温吸附方程拟合。

土壤磷等温解吸试验<sup>[24]</sup>: 吸附试验完成后弃去上清液并加入 25 mL 饱和 NaCl 溶液, 摇匀后 8000 r·min<sup>-1</sup> 离心 5 min 弃去上清液, 再重复上述操作 1 次, 然后每管中加入不含磷的 0.01 mol·L<sup>-1</sup> NaCl 溶液 25 mL, 加入甲苯 2~3 滴, 摇匀后 (25±1) °C 恒温振荡箱中振荡 24 h, 取出后离心 10 min (8000 r·min<sup>-1</sup>), 上清液用钼锑抗比色法测定磷含量, 计算土壤磷解吸量。

### 1.4 相关计算与统计分析

#### 1.4.1 Langmuir 等温吸附方程<sup>[20,24]</sup>

$$C/Q = C/Q_m + 1/(K_1 \times Q_m) \quad (1)$$

式中:  $C$  为吸附试验平衡溶液磷浓度, mg·L<sup>-1</sup>;  $Q$  为土壤磷吸附量, mg·kg<sup>-1</sup>;  $Q_m$  为土壤最大磷吸附量,

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $K_1$  为与结合能有关的吸附亲和力常数。

土壤最大缓冲容量(maximum buffer capacity, MBC,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) =  $K_1 \times Q_m$  (2)

土壤标准需磷量(standard phosphorus requirement, SPR,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 使用吸附试验平衡溶液中磷质量浓度为  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时的磷吸附量来表征。

磷吸附指数(phosphorus sorption index, PSI), 指等温吸附试验中  $1.0 \text{ g}$  土壤加入  $1.5 \text{ mg}$  磷达到平衡时, 土壤磷吸附量 [ $X, \text{mg}\cdot(100\text{g})^{-1}$ ] 与上清液浓度 ( $C, \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 对数 ( $\lg C$ ) 的比例。

$$\text{PSI} = X/\lg C \quad (3)$$

土壤磷吸附饱和度(degree of phosphorus saturation, DPS, %) 指土壤有效磷(Olsen-P)与最大吸附量之比。

$$\text{DPS} = \text{Olsen-P}/Q_m 100\% \quad (4)$$

#### 1.4.2 Freundlich 等温吸附方程和 Temkin 等温吸附方程<sup>[24]</sup>

Freundlich 等温吸附方程:

$$Q = K_2 \times C^{1/n} \quad (5)$$

式中:  $K_2$  为容量参数, 代表土壤对磷的吸附容量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $1/n$  为吸附强度系数,  $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Temkin 等温吸附方程:

$$Q = a + K_3 \ln C \quad (6)$$

式中:  $K_3$  为容量参数, 代表土壤对磷的吸附容量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $a$  为吸附强度系数,  $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

#### 1.4.3 土壤磷解吸滞后系数(HI)<sup>[29]</sup>

$$\text{HI} = (Q_{\text{ad}} - Q_{\text{de}})/Q_{\text{ad}} \quad (7)$$

式中:  $Q_{\text{ad}}$  和  $Q_{\text{de}}$  分别为一定温度和浓度下土壤对磷

的吸附量和解吸量,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; HI 是不可逆吸附程度的量化指标, HI 越大代表吸附和解吸过程相差的规律性越大。

#### 1.4.4 其他计算

土壤磷活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC, %) 指土壤有效磷含量(Olsen-P)占全磷(total phosphorus, TP,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 含量的比例, 是土壤磷素有效性的重要指标。

$$\text{PAC} = \text{Olsen-P}/\text{TP} \quad (8)$$

土壤磷解吸率(phosphorus desorption rate, PDR, %) 指土壤磷解吸量( $Q_{\text{de}}$ )占土壤磷吸附量( $Q_{\text{ad}}$ )的比例, 表征土壤的供磷能力。

$$\text{PDR} = Q_{\text{de}}/Q_{\text{ad}} \times 100\% \quad (9)$$

采用 Excel 2013 进行数据处理, IBM-SPSS 24.0 进行处理间差异显著性检验和交互作用分析, Origin 2018 用于作图。结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)运行采用 Amos 24.0, 可有效地整合因子分析、回归分析、路径分析等多种方法, 揭示因果关系<sup>[30]</sup>, R 语言中的“*gbmpls*”程序包进行邻接树法(aggregated boosted tree, ABT)分析, 表征多个因子对某一因子单独的解释量<sup>[31]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作对红壤磷吸附的影响

图 2 所示为不同处理土壤磷吸附量与平衡溶液磷浓度的关系。由图 2 可看出, 不同间作和施磷处理磷等温吸附曲线变化规律一致, 土壤磷吸附量随平衡溶液磷浓度的增加呈先快速上升再缓慢增加趋于饱和的趋势。土壤对磷的吸附量在土壤平衡磷浓度小于  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时增长较快, 各处理等温线的斜率

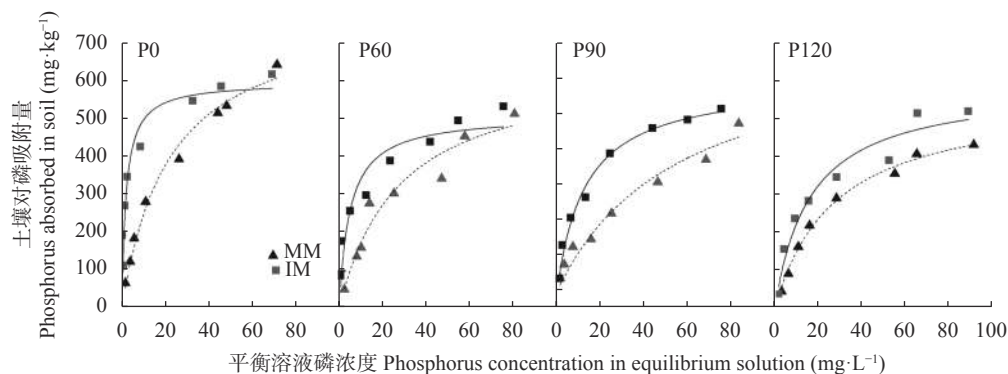


图 2 不同施磷水平下玉米||大豆间作(IM)和玉米单作(MM)的土壤磷等温吸附曲线

Fig. 2 Adsorption isotherms of phosphorus in soil of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

P0 为不施磷, P60 为低施磷量 [ $60 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ], P90 为常规施磷肥 [ $90 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ], P120 为高施磷量 [ $120 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ]. P0 is no phosphorus fertilizer, P60 is low-level phosphorus fertilizer [ $60 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ], P90 is conventional phosphorus fertilizer [ $90 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ], P120 is high-level phosphorus fertilizer [ $120 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ ].

最大, 随平衡液磷浓度持续增加, 磷吸附曲线变化平缓并趋于饱和。

无论玉米||大豆间作或是玉米单作, 土壤磷吸附量随施磷量的增加均逐渐降低。在不同施磷水平下, 玉米||大豆间作土壤磷吸附量总体上高于玉米单作, 间作磷吸附量差异随不同平衡液磷浓度增加呈现先增加后降低的趋势。

土壤对磷的吸附过程采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 3 种等温吸附方程进行描述 (表 1), 3 种拟合方程均能较好地描述红壤对磷的吸附效应。其中, Langmuir 方程  $R^2$  值最大。因此, 本研究采用 Langmuir 方程的各个拟合参数来表征间作和不同施磷量下红壤对磷的吸附效应, 并将拟合参数用于后续相关指标计算。

表 1 不同施磷水平下玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 的土壤磷等温吸附方程

Table 1 Equations of adsorption isotherms of phosphorus (P) in soil of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

处理 Treatment	Langmuir 方程 Langmuir equation		Freundlich 方程 Freundlich equation		Temkin 方程 Temkin equation		
	$C/Q=C/Q_m+1/K_1 \times Q_m$	$R^2$	$Q=K_2 \times C^{1/n}$	$R^2$	$Q=a+K_3 \ln C$	$R^2$	
P0	IM	$C/Q=0.001\ 30C+0.025\ 29$	0.990**	$Q=233.560C^{0.239}$	0.932*	$Q=227.585+92.4259 \ln C$	0.948*
	MM	$C/Q=0.001\ 60C+0.004\ 295$	0.990**	$Q=73.682C^{0.511}$	0.993**	$Q=-58.744+151.8457 \ln C$	0.971**
P60	IM	$C/Q=0.001\ 60C+0.022\ 52$	0.940*	$Q=146.870C^{0.299}$	0.981**	$Q=132.150+85.2624 \ln C$	0.966**
	MM	$C/Q=0.001\ 85C+0.010\ 81$	0.980**	$Q=54.640C^{0.511}$	0.945*	$Q=-102.068+130.4687 \ln C$	0.935*
P90	IM	$C/Q=0.001\ 66C+0.023\ 42$	0.990**	$Q=91.126C^{0.413}$	0.963**	$Q=4.501+116.5802 \ln C$	0.988**
	MM	$C/Q=0.001\ 70C+0.022\ 94$	0.990**	$Q=31.421C^{0.600}$	0.986**	$Q=-48.210+97.3087 \ln C$	0.883*
P120	IM	$C/Q=0.001\ 73C+0.053\ 17$	0.990**	$Q=81.520C^{0.421}$	0.952**	$Q=-33.856+119.6437 \ln C$	0.970**
	MM	$C/Q=0.001\ 67C+0.029\ 91$	0.960**	$Q=48.804C^{0.497}$	0.962**	$Q=-114.631+120.6803 \ln C$	0.991**

P0、P60、P90、P120说明见图2的图注。C为平衡溶液磷浓度, Q为土壤对磷吸附量,  $Q_m$ 为磷最大吸附量,  $K_1$ 为吸附亲和力常数,  $K_2$ 、 $K_3$ 为吸附容量指标,  $1/n$ 、 $a$ 为吸附强度系数。Description of P0, P60, P90, P120 are shown in the note of Figure 2. C is phosphorus content at equilibrium solution; Q is phosphorus adsorbed capacity;  $Q_m$  is phosphorus maximum adsorbed capacity;  $K_1$  is adsorption affinity constant;  $K_2$  and  $K_3$  are adsorption capacity indexes; “ $1/n$ ” and “ $a$ ” are adsorption strength coefficients.

不同处理下土壤磷吸附量及由 Langmuir 方程拟合计算的相关参数见表 2。由表 2 可知, 种植模式和施磷水平以及种植模式与施磷水平的交互作用 (除磷吸附量和吸持指数) 均对磷吸附量、最大吸附量、吸附亲和力常数、最大缓冲容量、标准需磷量、磷吸持指数、吸附饱和度具有显著或极显著影响。不同种植模式下, 磷肥施用显著影响土壤磷素吸附量、

最大吸附量、吸持指数和吸附饱和度。其中, 施磷处理较不施磷处理土壤磷素吸附量、最大吸附量和吸持指数分别降低 13.7%~36.1%、4.4%~24.6% 和 16.4%~43.8% ( $P<0.05$ ), 吸附饱和度显著增加 182.4%~488.4% ( $P<0.05$ )。随施磷量增加土壤磷素吸附量、最大缓冲容量先增加后降低, 最大吸附量和土壤磷吸持指数总体呈降低趋势, 磷吸附饱和度呈逐渐增

表 2 不同施磷水平下玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 的土壤磷吸附量及等温吸附参数

Table 2 Soil phosphorus (P) adsorption and its isothermal adsorption parameters of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

处理 Treatment	吸附量 Absorption ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	最大吸附量 Maximal adsorption ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	吸附亲和力常数 Adsorption affinity constant	最大缓冲容量 Maximum buffer capacity ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	标准需磷量 Standard P requirement ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	磷吸持指数 P sorption index	吸附饱和度 Degree of P saturation (%)	
								种植模式 Planting pattern (Pp)
P0	IM	387.68a	768.04a	0.051bc	39.55c	7.75c	18.48ab	0.379f
	MM	342.98b	626.47b	0.172a	132.85a	43.38a	19.73a	0.455f
P60	IM	334.75bc	625.15b	0.071b	44.41c	8.75c	15.25bc	1.528d
	MM	280.34d	541.67c	0.171a	92.50b	17.91b	13.89cd	1.285e
P90	IM	309.90c	601.15bc	0.071b	42.70c	8.42c	14.69c	1.652cd
	MM	219.06f	588.42bc	0.074b	43.60c	8.58c	11.09e	1.720c
P120	IM	310.97c	579.09d	0.032c	18.81d	3.68d	15.46bc	2.229a
	MM	250.96e	598.97bc	0.056bc	33.43c	6.63cd	12.28de	1.997b
种植模式 Planting pattern (Pp)	**	**	**	**	**	**	*	
施磷量 P level (P)	**	**	**	**	**	**	**	
Pp×P	ns	**	**	**	**	ns	**	

P0、P60、P90、P120说明见图2的图注。同列数值后不同字母表示处理间差异达  $P<0.05$  显著水平; \*和\*\*分别表示达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平, ns 表示未达显著水平。Description of P0, P60, P90, P120 are shown in the note of Figure 2. Data followed by different letters in the same column are significantly different at  $P<0.05$  level. \* and \*\* denote significant difference at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively; ns denotes not significant.



加趋势;吸附亲和力常数和土壤标准需磷量在间作中呈现先增加后降低趋势,在单作中呈现逐渐降低趋势。

不同施磷水平下种植模式影响土壤磷素吸附量以及由 Langmuir 方程拟合计算相关参数。总体上,间作处理较单作磷素吸附量、最大吸附量、吸持指数和吸附饱和度分别增加 22.9%、9.3%、18.3% 和 6.1%,吸附亲和力常数、最大缓冲容量、标准需磷量分别降低 52.4%、51.9% 和 62.6%。其中,间作对吸附饱和度的影响在 P60 和 P120 处理达显著水平 ( $P<0.05$ ),对吸持指数的影响在 P90 和 P120 处理达显著水平 ( $P<0.05$ ),对最大吸附量和最大缓冲容量的影响在 P0、P60 和 P120 达显著水平 ( $P<0.05$ ),对吸附亲和力常数和土壤标准需磷量的影响在 P0 和 P60 达显著水平 ( $P<0.05$ )。

## 2.2 间作对红壤磷解吸的影响

土壤磷解吸量为土壤中吸附的磷部分解吸下来的量,图 3 为不同处理下土壤磷等温解吸曲线。不

同种植模式下,随施磷水平增加,土壤磷解吸量呈增加趋势。随土壤磷吸附量的增加,在 P0 和 P60 处理,间作土壤磷解吸量高于单作,但在 P90 和 P120 处理下,单作处理土壤磷解吸量高于间作,且随土壤磷吸附量增加,单作间作差异逐渐加大。表明玉米||大豆间作对土壤磷吸附和解吸具有良好的缓冲能力,低磷水平下促进磷素大量解吸供植物吸收利用,高磷水平下减缓磷素解吸有效降低磷素损失。

土壤磷解吸率指土壤磷解吸量占土壤磷吸附量的百分比,表征土壤供磷能力,磷解吸率值越大,土壤供磷能力越强,可供植物吸收利用的磷含量越多,反之亦然<sup>[32]</sup>。不同处理下土壤磷解吸率变化特征如图 4 所示,随加入土壤中磷质量浓度的增加,不同种植模式和施磷水平下红壤磷解吸率逐渐增加。不同种植模式下,随施磷水平增加,土壤磷解吸率呈增加趋势。随加入红壤磷质量浓度的增加,在 P0 和 P60 处理,间作土壤磷解吸率高于单作,但在 P90 和 P120 处理下,单作处理土壤磷解吸率高于间作,随加入红

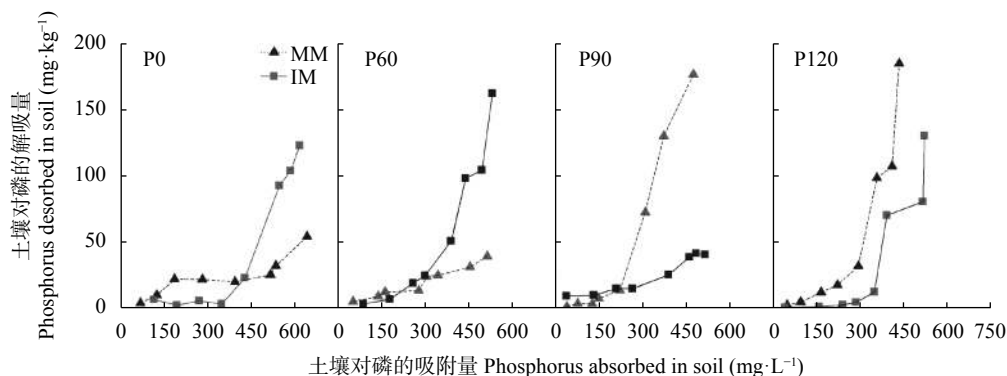


图 3 不同施磷水平下玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 的土壤磷等温解吸曲线

Fig. 3 Isothermal desorption curves of phosphorus in soil of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

P0、P60、P90、P120 说明见图 2 的图注。Description of P0, P60, P90, P120 are shown in the note of Figure 2.

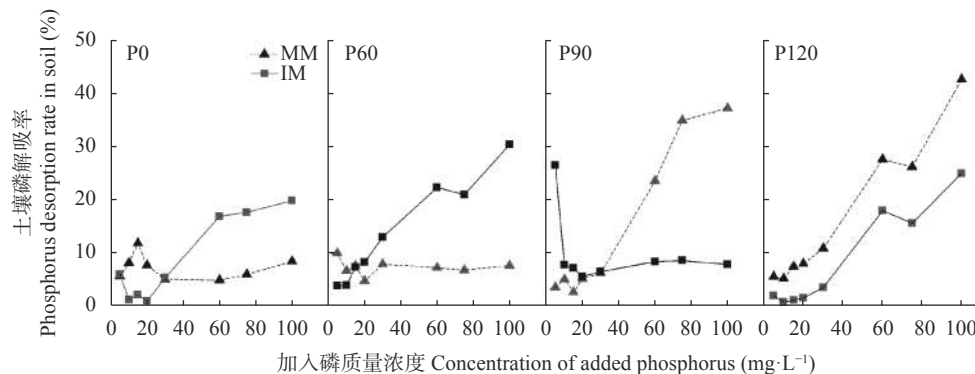


图 4 不同施磷水平下玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 的土壤磷解吸率变化特征

Fig. 4 Characteristics of desorption rates of soil phosphorus of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

P0、P60、P90、P120 说明见图 2 的图注。Description of P0, P60, P90, P120 are shown in the note of Figure 2.

壤磷质量浓度的增加, 单间作磷素解吸率差异逐渐加大。表明间作在低磷水平下可大量释放磷素供给植物吸收利用, 而在高磷水平下, 间作能够减少磷素解吸, 有效减缓过多磷素的损失。这可能是在低磷水平下间作种间竞争诱导根构型(根长、根尖数和根表面积等)发生改变、根系分泌磷活化物质(质子、有机酸、磷酸酶等)促进土壤磷素释放, 而在高磷水平下种间互作促进磷素高效吸收利用。

表 3 为不同种植模式和施磷水平下红壤磷素的解吸量、解吸率和滞后系数平均值。由表 3 可看出, 种植模式(除解吸量)、施磷水平以及种植模式与施磷水平的交互作用极显著影响红壤磷素的解吸量、解吸率和磷素滞后系数 ( $P<0.01$ )。总体上, 间作处理较单作磷素解吸量和滞后系数分别增加 9.2% 和 3.2%, 降低磷素解吸率 18.4%。不同施磷水平下, 间作对磷素的解吸特性不同, 其中, 磷解吸量在 P0 和 P60 处理间作较单作显著增加 90.2% 和 194.4%, 而在 P90 和 P120 处理间作较单作减少 52.1% 和 34.1%; 间作磷解吸率在 P0 和 P60 处理较单作显著增加 68.1% 和 148.1%, 而在 P90 和 P120 处理较单作降低 66.5% 和 46.7% (表 3)。

磷素滞后系数(HI)为一定温度和浓度下土壤对磷吸附量与解吸量的差值再除以吸附量, 作为不可逆吸附程度的量化指标, 其值越大代表吸附和解吸过程受外在因素影响的规律性越大<sup>[29]</sup>。随施磷量增加, 不同种植模式下土壤磷素滞后系数间作总体变化不大, 而单作呈降低趋势, 表明高磷施用增加土壤中磷素的活动性, 利于磷素的解吸。不同施磷水平下, 间作磷素滞后系数在 P0 和 P60 处理较单作显著减少 5.4% 和 11.8%, 而在 P90 和 P120 处理较单作显著增加 19.4% 和 14.3% ( $P<0.05$ )。

### 2.3 间作影响红壤磷吸附解吸的关键因子及其相对贡献

为进一步了解土壤理化特性对磷吸附解吸特征的影响, 运用土壤理化因子(数据未列出)与红壤磷吸附量和解吸量进行相关分析, 结果表明(表 4), 土壤磷吸附量与土壤 pH、有机质、树脂磷、速效磷、

表 3 不同施磷水平下玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 的土壤磷解吸量及滞后系数

Table 3 Desorption and desorption hysteresis coefficients of phosphorus in soil of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems under different phosphorus levels

处理 Treatment		解吸量 Desorption (mg·kg <sup>-1</sup> )	解吸率 Desorption rate (%)	滞后系数 Hysteresis coefficient
P0	IM	45.11bc	11.68c	0.88b
	MM	23.71d	6.95d	0.93a
P60	IM	58.72a	17.55b	0.82c
	MM	19.94d	7.07d	0.93a
P90	IM	24.43d	7.86d	0.92a
	MM	51.04ab	23.45a	0.77d
P120	IM	37.82c	12.19c	0.88b
	MM	57.41a	22.89a	0.77d
种植模式 Planting pattern (Pp)		ns	**	**
施磷量 Phosphorus level (P)		**	**	**
Pp×P		**	**	**

P0、P60、P90、P120说明见图2的图注。同列数值后不同字母表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平; \*和\*\*分别表示达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平, ns表示未达显著水平。Description of P0, P60, P90, P120 are shown in the note of Figure 2. Data followed by different letters in the same column are significantly different at  $P<0.05$  level. \* and \*\* denote significant differences at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively; ns denotes not significant.

全磷以及磷吸附饱和度呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与游离氧化铁、游离氧化铝和磷吸持指数呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ); 土壤磷解吸量与标准需磷量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 其他指标相关性不显著。

为深入探索不同种植模式与施磷水平对各理化因子的影响, 进而阐明间作和施磷水平对磷素吸附量和解吸量的关键因子, 本研究运用结构方程模型 (SEM), 对种植模式与磷水平下各指标因子分析、回归分析以及路径分析进行有效整合, 揭示不同种植模式和施磷水平下磷素吸附量和解吸量的因果关系 (图 5)。SEM 模型拟合不同种植模式和磷水平下土壤 pH、有机质、游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷、全磷调节土壤磷吸附量和解吸量的网络交互图是非常吻合的 ( $\chi^2=57.70$ , Df=17,  $P<0.01$ )。从图中可看出, 种植模式对土壤磷吸附量的影响主要是通过通过对游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷和全磷的调节, 对土壤磷解吸量的影响主要是通过

表 4 玉米||大豆间作和玉米单作红壤性质与磷吸附解吸特征参数的相关性

Table 4 Relationship between red soil properties and phosphorus (P) sorption-desorption parameters of maize-soybean intercropping and maize monoculture systems

指标 Index	pH	有机质 Organic matter	游离氧化铁 Free Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	游离氧化铝 Free Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	树脂磷 Resin-Pi	有效磷 Olsen-P	全磷 Total P	标准需磷量 Standard P requirement	磷吸持指数 P sorption index	吸附饱和度 Degree of P saturation
吸附量 Absorption	-0.645**	-0.609**	0.678**	0.692**	-0.886**	-0.612**	-0.735**	0.212	0.931**	-0.645**
解吸量 Desorption	0.232	0.278	-0.121	-0.200	0.189	0.372	0.394	-0.518**	-0.276	0.302

\*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ ); \*表示显著相关 ( $P<0.05$ )。 \*\* represents significant correlation at  $P<0.01$  level; \* represents significant correlation at  $P<0.05$  level.



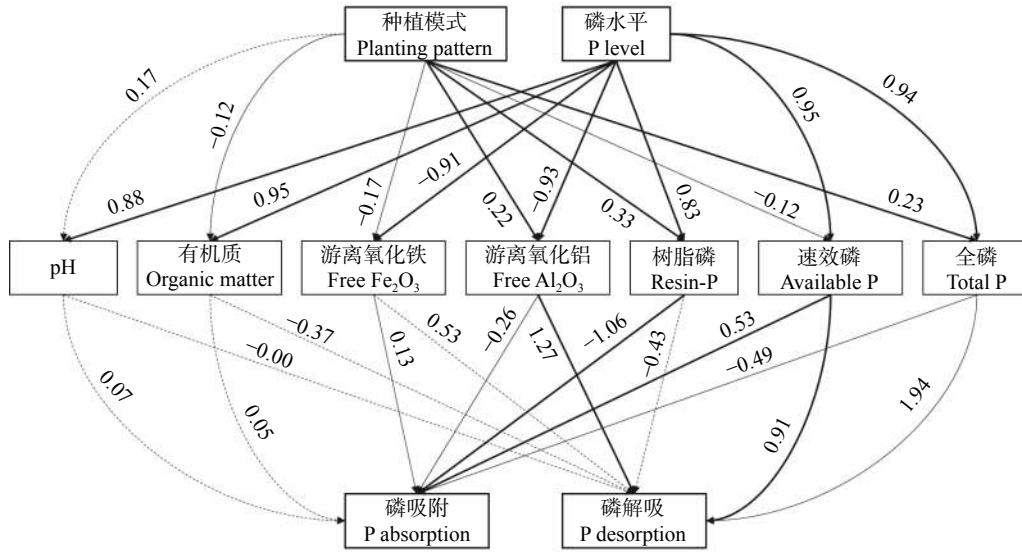


图 5 结构模型方程分析不同施磷水平下玉米||大豆间作和玉米单作土壤性质与磷吸附和解吸附的因果关系

Fig. 5 Structural equation model analysis of causal relationships among soil properties and phosphorus (P) adsorption, desorption of maize-soybean intercropping and maize monoculture systems under different phosphorus levels

细实线、粗实线和虚线箭头表示显著 ( $P < 0.05$ )、极显著 ( $P < 0.01$ ) 和不显著 ( $P > 0.05$ ) 路径,  $\chi^2 = 57.70$ ,  $Df = 17$ ,  $P < 0.01$ 。The thin lines, thick lines, and dotted arrows indicate significant ( $P < 0.05$ ), very significant ( $P < 0.01$ ), and no significant ( $P > 0.05$ ) path.  $\chi^2 = 57.70$ ,  $Df = 17$ ,  $P < 0.01$ .

游离氧化铝、速效磷和全磷的改善;磷水平对土壤磷吸附量的影响主要是通过对土壤游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷和全磷的调节,对土壤磷解吸量的影响主要是通过对游离氧化铝、有效磷和全磷的调节。

为进一步剖析不同种植模式下土壤理化指标与磷素吸附量和解吸量的关系,采用邻接树分析方法 (aggregated boosted tree analysis, ABT) 分析土壤理化指标对红壤磷吸附量和解吸量的相对重要性。从图 6 中可看出,影响玉米||大豆间作、玉米单作土壤磷吸附量的首要因子分别是 pH 和有机质,相对贡献率分别为 37.58% 和 47.49%,影响间作和单作土壤磷解吸量的首要因子均为有机质,相对贡献率分别为

48.67% 和 41.58%。总体上,红壤磷素的吸附和解吸不管在间作还是单作条件下,主要受 pH、有机质和游离氧化铁影响,其对间作和单作吸附量的相对贡献率以及解吸量的相对贡献率分别高达 87.61%、88.66%、88.05% 和 86.44%,不同种植模式改变土壤的 pH、有机质和游离氧化铁含量造成单间作红壤磷吸附量和解吸量的差异。

### 3 讨论

#### 3.1 施磷对红壤磷吸附解吸效应的影响

土壤中磷素的吸附解吸决定磷素在土壤中的有效性,二者转化直接影响土壤磷素的供应能力<sup>[33]</sup>。本研究中,间作和施磷处理磷等温吸附曲线变化规律

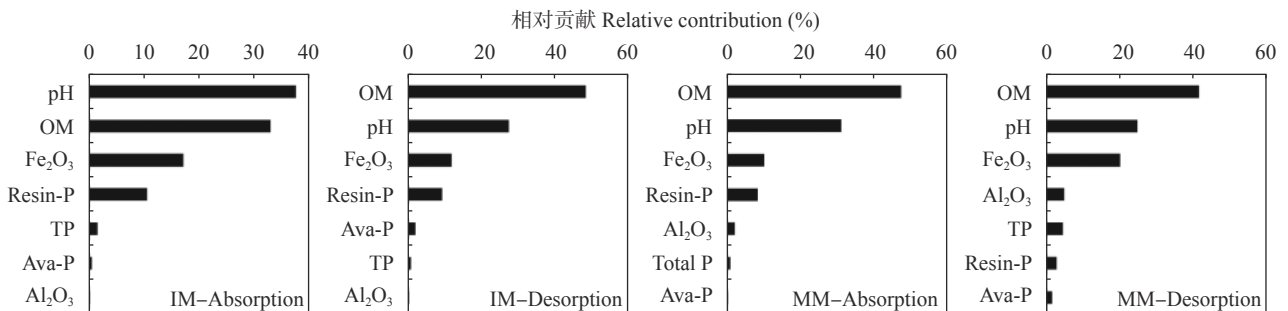


图 6 基于邻接树法分析玉米||大豆间作 (IM) 和玉米单作 (MM) 土壤因子对磷吸附 (Absorption) 和解吸 (Desorption) 的相对作用

Fig. 6 Aggregated boosted tree (ABT) analysis for relative importance of soil chemical properties for phosphorus absorption and desorption of maize-soybean intercropping (IM) and maize monoculture (MM) systems

OM 为有机质,  $Fe_2O_3$  为游离氧化铁, Resin-P 为树脂磷, TP 为全磷, Ava-P 为速效磷,  $Al_2O_3$  为游离氧化铝。OM is organic matter,  $Fe_2O_3$  is free  $Fe_2O_3$ , Resin-P is resin phosphorus, TP is total phosphorus, Ava-P is available phosphorus,  $Al_2O_3$  is free  $Al_2O_3$ .

一致, 土壤磷吸附量随平衡溶液磷浓度增加呈先快速上升再缓慢增加趋于饱和的趋势, Langmuir 等温吸附方程可以很好地拟合酸性红壤对磷的吸附特征, 这与大多数研究结果一致<sup>[10,20,24]</sup>。同时, 当土壤平衡磷浓度小于  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 各处理等温线斜率最大, 土壤对磷的吸附量增长较快, 随平衡液磷浓度持续增加, 磷吸附曲线变化平缓并趋于饱和, 王琼等<sup>[20,24]</sup>的研究结果与本研究结果一致。这可能是因为随着吸附反应的进行, 土壤表面的吸附位点逐渐趋于饱和, 从而使得磷吸附速率有所下降, 吸附反应逐渐趋于平衡<sup>[22]</sup>。

土壤磷吸附量和吸附强度受土壤磷素水平影响较大<sup>[34]</sup>。本研究中, 土壤磷吸附量随施磷量的增加均逐渐降低, 龚振平等<sup>[24]</sup>在黑土、Vu 等<sup>[35]</sup>在澳洲钙质土壤以及张海涛等<sup>[36]</sup>在潮褐土上研究施磷量对土壤磷吸附效应的结果也证实这一点。这可能与随着土壤中有效磷含量增加, 土壤胶体表面的磷吸附位点逐渐被占据, 从而减弱土壤对磷的吸附有关<sup>[37]</sup>。

土壤磷解吸过程是磷吸附的逆过程, 土壤解吸出的磷可转化成不同形态的无机磷供植物吸收利用, 在低磷水平下磷素的解吸比吸附更重要, 而高磷水平下磷素的吸附更加关键, 通常用解吸量和解吸率来表征土壤中磷的解吸特征<sup>[38-39]</sup>。张鑫等<sup>[40]</sup>研究表明, 土壤磷解吸量随加入外源磷浓度的增加而增加; Varinderpal-Singh 等<sup>[41]</sup>在印度玉米-小麦 (*Triticum aestivum* L.) 轮作区长达 32 a 的定位试验也表明, 随施磷量的增加, 土壤磷解吸率逐渐增大。本研究中, 随土壤磷吸附量的增加, 不同种植模式和施磷水平下土壤磷解吸量逐渐增加。同时, 在不同种植模式下, 随施磷水平增加, 土壤磷解吸量也呈增加趋势, 与王斌等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。这主要是因土壤有效磷竞争磷吸附位点而有效降低土壤矿物胶体对磷酸根离子的吸附潜能, 由此提高土壤磷的解吸特性<sup>[37]</sup>。此外, 本试验中不同处理下的平均磷素解吸率与龚振平等<sup>[24]</sup>的研究结果均小于 25%, 说明土壤对磷的吸附-解吸存在明显滞后现象。

### 3.2 间作对红壤磷吸附解吸效应的影响

土壤对磷的吸附与解吸特性除受土壤类型、施肥方式及施肥量等诸多因素的影响<sup>[42-43]</sup>, 不同种植模式也影响土壤磷素的吸附特性。前期研究表明间作处理能有效促进作物对磷素的吸收和利用<sup>[25-26]</sup>, 然而关于间作影响磷素吸附解吸的研究较少, 徐敏等<sup>[19]</sup>在紫色土上的研究表明, 玉米/大豆套作与玉米单作和大豆单作相比土壤对磷具有更强的固持能力, 套作在磷素利用率、磷流失风险等方面均表现出明显

优势。本研究中, 在不同施磷水平下, 玉米||大豆间作土壤磷吸附量总体上高于玉米单作, 单作和间作磷吸附量差异随不同平衡液磷浓度增加呈现先增加后降低的趋势。同时, 随土壤磷吸附量的增加, 在 P0 和 P60 处理, 间作土壤磷解吸量高于单作, 在 P90 和 P120 处理下, 单作处理土壤磷解吸量高于间作, 且随土壤磷吸附量增加, 单间作差异逐渐加大。随加入红壤的磷增加, 在 P0 和 P60 处理, 间作土壤磷解吸率高于单作, 在 P90 和 P120 处理下, 单作处理土壤磷解吸率高于间作, 单间作磷素解吸率差异随加入红壤磷的质量浓度的增加逐渐加大, 间作在低磷水平下可大量释放磷素供给植物吸收利用, 而在高磷水平下, 间作能够减少磷素解吸, 有效减缓过多磷素的损失, 表明间作玉米大豆对土壤磷吸附和解吸具有良好的缓冲能力, 这可能与间作改变土壤理化指标进而增强其对磷素吸附解吸的缓冲性能有关, 与本研究中最大吸附量、最大缓冲容量以及滞后系数结果一致。

### 3.3 间作和施磷红壤磷吸附解吸对土壤性质的响应

前人大量研究证实, 土壤 pH、黏土矿物的数量和数量、有机质含量和铁、铝氧化物含量影响土壤磷吸附<sup>[12]</sup>。土壤对磷的吸附解吸作用与土壤理化性质(如土壤 pH、黏粒含量和铁、铝氧化物以及有机质的含量等)显著相关<sup>[4-5]</sup>。本研究中土壤磷吸附量与土壤 pH、有机质、树脂磷、速效磷、全磷以及磷吸附饱和度呈极显著负相关, 与游离氧化铁、游离氧化铝和磷吸持指数呈极显著正相关, 土壤磷解吸量与标准需磷量呈极显著负相关, 其他指标相关性不显著。

种植模式(除解吸量)、施磷水平以及种植模式与施磷水平的交互作用(除吸附量)极显著影响红壤磷素的吸附量、解吸量、解吸率和磷素滞后系数。结构方程模型(SEM)对种植模式与磷水平下各指标因子分析、回归分析以及路径分析进行有效整合结果表明: SEM 模型拟合不同种植模式和磷水平下土壤 pH、有机质、游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷、全磷调节土壤磷吸附量和解吸量的网络交互图是非常吻合的。种植模式通过调节游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷和全磷影响土壤磷吸附量, 通过对游离氧化铝、速效磷和全磷的改善影响土壤磷解吸量; 磷水平对土壤磷吸附量的影响主要是通过对土壤游离氧化铁、游离氧化铝、树脂磷、速效磷和全磷的调节, 对土壤磷解吸量的影响主要是通过对游离氧化铝、速效磷和全磷的调节。ABT

分析显示,红壤磷素的吸附和解吸不管在间作还是单作条件下,主要受 pH、有机质和游离氧化铁的影响,间作玉米、单作玉米磷吸附量的首要因子分别是 pH 和有机质,不同种植模式改变土壤的 pH、有机质和游离氧化铁含量造成单作红壤磷吸附量和解吸量的差异。马良等<sup>[44]</sup>研究表明,在砖红壤和水稻土中,土壤中铁、铝氧化物含量和有机质含量是影响磷吸附的主要因素,且随 pH 的升高磷的吸附量和解吸量均降低,与我们的研究结果一致。另外,土壤中的有机质分解产生的有机酸释放出的氢离子可使矿物表面基团质子化而增加磷吸附位点,进而促进土壤对磷的吸附能力<sup>[45-46]</sup>,另一方面,土壤有机质具有明显的凝胶特点,以胶膜的形式包被氧化铁铝,从而降低土壤胶体对磷的吸附<sup>[47]</sup>。

#### 4 结论

1) Langmuir 等温吸附方程最适合拟合红壤对磷的吸附特征,随平衡溶液磷浓度的增加土壤磷吸附量呈先快速上升再缓慢增加趋于饱和的趋势,且土壤磷吸附量随施磷量的增加均逐渐降低;种植模式和施磷水平以及二者交互作用极显著影响红壤磷素的吸附量和解吸量。

2) 红壤磷素的吸附和解吸主要受 pH、有机质和游离氧化铁的影响,其中,土壤磷吸附量与土壤 pH、有机质、树脂磷、有效磷、全磷以及磷吸附饱和度呈极显著负相关,与游离氧化铁、游离氧化铝和磷吸附持指数呈极显著正相关;土壤磷解吸量与标准需磷量呈极显著负相关。

3) 间作具有较好的土壤磷缓冲能力,通过改变土壤的 pH、有机质和游离氧化铁含量影响单作红壤磷吸附量和解吸量。在低磷水平下可促进磷素解吸供植物吸收利用,提高磷素利用率,在高磷水平下,间作能降低磷素解吸,有效减缓磷素损失。

#### 参考文献 References

- [1] 张新明, 李华兴, 刘远金. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 77-80  
ZHANG X M, LI H X, LIU Y J. Study progress of phosphate adsorption and desorption in soils[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1): 77-80
- [2] 王夏晖, 尹澄清, 颜晓, 等. 流域土壤基质与非点源磷污染物作用的3种模式及其环境意义[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 123-128  
WANG X H, YIN C Q, YAN X, et al. Three patterns of interaction between soil and non-point source P-pollutants in agricultural watershed[J]. Environmental Science, 2004, 25(4): 123-128
- [3] QUESADA C A, LLOYD J, ANDERSON L O, et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites[J]. Biogeosciences, 2011, 8(6): 1415-1440
- [4] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1369-1374  
XIA Y, LOU Y S, YANG C G, et al. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in paddy soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1369-1374
- [5] 赵庆雷, 王凯荣, 谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 355-362  
ZHAO Q L, WANG K R, XIE X L. Effects of organic nutrient recycling on phosphorus adsorption-desorption characteristics in a reddish paddy rice system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 355-362
- [6] 罗敏, 王旭东. 不同肥力土的土壤颗粒分布及其磷素吸附-解吸规律[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 106-109  
LUO M, WANG X D. Distribution of particles size and their phosphorus adsorption and desorption characteristics of Lou soils with different fertility[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(6): 106-109
- [7] 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 908-914  
LI S T, ZHOU J M, WANG H Y, et al. Characteristics of fixation and release of phosphorus in three soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 908-914
- [8] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 65-67  
LAI L, HAO M D, PENG L F. Development of researches on soil phosphorus[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 65-67
- [9] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763-768  
LI J, SHI Y L, CHEN Z W. Research on phosphorus in southern red soils of in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 763-768
- [10] ZHANG Y H, HUANG S M, GUO D D, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvo-aquic soils under long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1306-1318
- [11] DEBICKA M, KOCOWICZ A, WEBER J, et al. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, 62(6): 840-855
- [12] ARAI Y, SPARKS D L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach[J]. Advances in Agronomy, 2007, 94: 135-179
- [13] 闫金龙, 吴文丽, 江韬, 等. 土壤组分对磷形态和磷吸附-解吸的影响——基于三峡库区消落带落后期土壤[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1124-1131  
YAN J L, WU W L, JIANG T, et al. Effect of organic matter and iron oxides on phosphorus forms and adsorption-desorption on dry-period soils in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir[J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1124-1131
- [14] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同质地棉田土壤对磷吸附



- 与解吸研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 303-307
- CHEN B L, SHENG J D, JIANG P A, et al. Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 303-307
- [15] 韩旭, 吴东洋, 王新刚. 不同土壤对磷的吸附特性研究[J]. 现代农业科技, 2011, (20): 285-286
- HAN X, WU D Y, WANG X G. Study on the adsorption characteristics of phosphorus in different soils[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, (20): 285-286
- [16] 王斌, 刘骅, 李耀辉, 等. 长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 726-733
- WANG B, LIU H, LI Y H, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of gray desert soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 726-733
- [17] 杨艳芳, 孔令柱, 郑真, 等. 退耕还湖后湿地土壤对磷的吸附解吸特性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1063-1068
- YANG Y F, KONG L Z, ZHENG Z, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption of soils from wetlands recovered from farmlands in Caizi Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1063-1068
- [18] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7): 2757-2762
- QIU Y Q, GAN G J, LIU W, et al. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in soils under different utilization[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7): 2757-2762
- [19] 徐敏, 宋春, 毛璐, 等. 不同土地利用方式下紫色土磷吸附—解吸动力学特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 39-44
- XU M, SONG C, MAO L, et al. Dynamics of phosphorus adsorption-desorption in purple soil under different land use types[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 39-44
- [20] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3866-3877
- WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics and its response to soil properties of black soil under long-term different fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3866-3877
- [21] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移特性的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(2): 253-259
- LI X, LIU Y X, LIU Y R, et al. Interactive effects of combined inorganic and organic fertilizers on phosphorous adsorption, desorption and mobility[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27(2): 253-259
- [22] 李仁英, 吴洪生, 黄利东, 等. 不同来源生物炭对土壤磷吸附解吸的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1398-1403
- LI R Y, WU H S, HUANG L D, et al. Effect of biochar of different sources on adsorption and desorption of phosphorus in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1398-1403
- [23] 彭启超, 刘小华, 罗培宇, 等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1763-1772
- PENG Q C, LIU X H, LUO P Y, et al. Adsorption and desorption characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium by biochars from different raw materials[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1763-1772
- [24] 龚振平, 杜婷婷, 闫超, 等. 玉米秸秆还田及施磷量对黑土磷吸附与解吸特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 161-169
- GONG Z P, DU T T, YAN C, et al. Effects of corn straw returning and phosphorus application rate on phosphorus adsorption and desorption characteristics of black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 161-169
- [25] XIA H Y, WANG Z G, ZHAO J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 53-64
- [26] LI X F, WANG C B, ZHANG W P, et al. The role of complementarity and selection effects in P acquisition of intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2018, 422(1/2): 479-493
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 18, 638
- LU R K. *Soil Agrochemistry Analysis Protocols*[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999: 18, 638
- [28] 夏文建, 冀建华, 刘佳, 等. 长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1876-1886
- XIA W J, JI J H, LIU J, et al. Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1876-1886
- [29] HUANG W L, WEBER W J. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 10. relationships between desorption, hysteresis, and the chemical characteristics of organic domains[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(9): 2562-2569
- [30] 吴明隆. 结构方程模型: AMOS的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009
- WU M L. *Structure Equation Model: The Operation and Application of AMOS*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009
- [31] DE'ATH G. Boosted trees for ecological modeling and prediction[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 243-251
- [32] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12: 547-562
- [33] 曹志洪, 李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3): 218-226
- CAO Z H, LI Q K. Phosphorus sorption and desorption isotherms for some loessial soils of North China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(3): 218-226
- [34] 何振立, 朱祖祥, 袁可能, 等. 土壤对磷的吸持特性及其与土壤供磷指标之间的关系[J]. 土壤学报, 1988, 25(4): 397-404
- HE Z L, ZHU Z X, YUAN K N, et al. Potential phosphate



- sorptivity value from Langmuir equation and its application for phosphate fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(4): 397-404
- [35] VU D T, TANG C, ARMSTRONG R D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate[J]. *Plant and Soil*, 2008, 304(1/2): 21-33
- [36] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 284-290  
ZHANG H T, LIU J L, LIAO W H, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 284-290
- [37] BARROW N J, DEBNATH A. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of northern India[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378(1/2): 383-395
- [38] WANG L Q, LIANG T. Effects of exogenous rare earth elements on phosphorus adsorption and desorption in different types of soils[J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 148-155
- [39] SHARPLEY A N, MCDOWELL R W, KLEINMAN P J A. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 287-307
- [40] 张鑫, 谷会岩, 陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷吸附解吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 11-17  
ZHANG X, GU H Y, CHEN X W. Effects of selective cutting disturbance on soil phosphorus adsorption and desorption in a Korean pine and broad-leaved mixed forest in the Xiaoxing'an Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 11-17
- [41] VARINDERPAL-SINGH, DHILLON N S, BRAR B S. Influence of long-term use of fertilizers and farmyard manure on the adsorption-desorption behaviour and bioavailability of phosphorus in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75(1/2/3): 67-78
- [42] LI M, HOU Y L, ZHU B. Phosphorus sorption-desorption by purple soils of China in relation to their properties[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(3): 182-189
- [43] DJODJIC F, BÖRLING K, BERGSTRÖM L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 678-684
- [44] 马良, 徐仁扣. pH和添加有机物料对3种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 596-599  
MA L, XU R K. Effects of regulation of pH and application of organic material on adsorption and desorption of phosphorus in three types of acid soils[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 596-599
- [45] 夏汉平, 高子勤. 磷酸盐在土壤中的竞争吸附与解吸机制[J]. *应用生态学报*, 1993, 4(1): 89-93  
XIA H P, GAO Z Q. Mechanisms of competitive adsorption and desorption of phosphate in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(1): 89-93
- [46] 王而力, 王嗣淇, 徐颖. 沙土不同粒径微团聚体对磷的富集特征[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(3): 827-834  
WANG E L, WANG S Q, XU Y. Enrichment characteristics of phosphorus on micro-aggregates in different sizes of sandy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 827-834
- [47] 甘海华, 徐盛荣. 红壤及其有机无机复合体对磷的吸附与解吸规律探讨[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 264-266  
GAN H H, XU S R. Study on P adsorption-desorption characteristics of red soil and its organo-mineral complexes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 264-266